RESTORATİF DİŞ HEKİMLİĞİNDE GÜNCEL YAKLAŞIMLAR VE GELİŞEN TEKNOLOJİLER

EDİTÖR
ELİF ALKAN





BİDGE Yayınları

BİDGE Yayınları

Restoratif Diş Hekimliğinde Güncel Yaklaşımlar ve Gelişen Teknolojiler

Editör: Dr. Öğr. Üyesi Elif ALKAN

ISBN: 978-625-5057-12-9

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

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

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

ÖNSÖZ

Restoratif Diş Hekimliğinde Güncel Kavramlar ve Gelişmekte Olan Teknolojiler ile ilgili bölümlerin yer aldığı kitabımızın, meslektaşlarımıza, mesleğe yeni başlayan genç akademisyenlerimize, öğrencilerimize klinik açıdan katkıda bulunmasını diler, kitabın hazırlanmasında makaleleriyle büyük katkıda bulunan değerli yazarlarımıza ve emeği geçen yayın ekibine teşekkürlerimi sunarım.

Saygılarımla.

Dr. Öğr. Üyesi ELİF ALKAN

MARMARA ÜNİVERSİTESİ

İÇİNDEKİLER

ÇÜRÜK PROFİLAKSİSİ: RİSK TEMELLİ KORUYUCU YAKLAŞIMLAR 1
MEHMET ALPEREN ŞAHİN, MİNE BAŞAN TOSUN

Machine Learning- Based Diagnostic Approaches in Restorative Dentistry 29
EBRU YILMAZ, ONUR AKKURT

BEYAZ NOKTA LEZYONLARININ MİNİMAL İNVAZİV YÖNETİMİ 52
MERVE GÜLDİBİ

Pulpa Kuafajında Güncel Yaklaşımlar ve Materyaller 64
FATMA BEYZA KOÇYİĞİT, VAHTİ KILIÇ

KAVİTE DEZENFEKTANLARI: ANTİMİKROBİYAL ETKİNLİK VE ADEZİV BAĞLANMA AÇISINDAN GÜNCEL YAKLAŞIMLAR 106
SONGUL OZDOGEN

ADEZİV SİSTEMLERDE GÜNCEL MONOMERLER 116
NİLGÜN AKGÜL, SERPİL ŞENOCAK

KENDİNİ ONARAN KOMPOZİT REZİNLER: TEMEL MEKANİZMALAR VE GÜNCEL GELİŞMELER 134
CANSIN AŞKIN ÖZCAN

KENDİ KENDİNİ İYİLEŞTİREN DENTAL KOMPOZİTLER 166
ZEYNEP SU SÖNMEZ, NURCAN ÖZAKAR

DİŞ HEKİMLİĞİNDE RENK SEÇİM 202
MELİKE BİLCE, YEŞİM DEMİREL KARADUMAN

ESTETİK RESTORATİF DİŞ HEKİMLİĞİNDE AKILLI MONOKROMATİK KOMPOZİTLER 222

İÇİNDEKİLER

YEŞİM DEMİREL KARADUMAN, MELİKE BİLCE

LAMİNATE VENEERLERDE PREPARASYON TEKNİKLERİ 235
NİLGÜN AKGÜL, MELİS ALTUN

REPAIR VERSUS REPLACEMENT OF COMPOSITE RESTORATIONS 261
AHMAD BİTTAR

BÖLÜM 1

ÇÜRÜK PROFİLAKSİSİ: RİSK TEMELLİ KORUYUCU YAKLAŞIMLAR

MEHMET ALPEREN ŞAHİN[1]
MİNE BAŞAN TOSUN[2]

Giriş

Önlenebilir bir hastalık olmasına karşın dünya genelinde en yaygın kronik hastalıklardan biri olmayı sürdürmekte olan diş çürükleri; bireylerin yaşam kalitesini olumsuz etkilemesinin yanı sıra, tedavi maliyetleri ve sağlık sistemleri üzerinde oluşturduğu yük nedeniyle önemli bir halk sağlığı sorunu olarak kabul edilmektedir (Peres et al., 2019). Günümüzde diş çürüğü, yalnızca diş sert dokularında meydana gelen bir doku kaybı olarak değil; dental biyofilm, konak faktörleri, beslenme alışkanlıkları ve çevresel etmenler arasındaki dengenin bozulması sonucu gelişen dinamik bir biyolojik süreç olarak değerlendirilmektedir (Pitts et al., 2017; Takahashi & Nyvad, 2011). Bu bakış açısıyla çürük yönetimindeki temel hedef, sadece oluşan doku kaybını restoratif yöntemlerle

[1] Dr. Öğr. Üyesi, Kütahya Sağlık Bilimleri Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi, Restoratif Diş Tedavisi A.D. Kütahya/ Türkiye Orcid: 0000-0003-0462-4067

[2] Dr. Öğr. Üyesi, Kütahya Sağlık Bilimleri Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi, Restoratif Diş Tedavisi A.D. Kütahya/ Türkiye Orcid: 0009-0009-9181-6980

tedavi etmek değil, hastalığın altında yatan nedenleri kontrol altına alarak çürük oluşumunu önleyebilmek veya erken dönemde durdurabilmektir (Pitts et al., 2014; Pitts et al., 2017).

Koruyucu diş hekimliğinde son yıllarda yaşanan gelişmeler, restoratif tedavi odaklı geleneksel anlayıştan risk temelli ve minimal invaziv uygulamalara geçişi hızlandırmıştır. Günümüzde bireylerin çürük geliştirme riski birbirinden farklı kabul edilmekte ve koruyucu uygulamalar bu risk düzeyine göre planlanmaktadır (Pitts et al., 2014). Bu kapsamda çürük profilaksisi; flor uygulamaları, etkili biyofilm kontrolü ve ağız hijyeninin sağlanmasının yanı sıra beslenme alışkanlıklarının değerlendirilmesi, remineralizasyonun desteklenmesi, bireysel risk faktörlerinin belirlenmesi ve düzenli klinik takibi içeren kapsamlı bir koruyucu bakım anlayışını ifade etmektedir (Fejerskov et al., 2015; Pitts et al., 2014).

Bu bölümde öncelikle diş çürüğünün biyolojik temeli ve başlıca risk faktörleri ele alınacak, ardından çürük risk değerlendirmesinin temel prensipleri açıklanacaktır. Daha sonra biyofilm kontrolü, flor uygulamaları, beslenmenin düzenlenmesi, flor dışı koruyucu ajanlar, fissür örtücüler ve minimal invaziv koruyucu uygulamalar güncel bilimsel kanıtlar doğrultusunda incelenecek; son olarak risk temelli koruyucu yaklaşımların klinik uygulamadaki yeri değerlendirilecektir.

Diş Çürüğünün Biyolojik Temeli ve Risk Faktörleri

Diş çürüğü, dental biyofilm içerisindeki mikroorganizmaların fermente edilebilir karbonhidratları metabolize etmesi sonucu oluşan organik asitlerin diş sert dokularında demineralizasyona neden olduğu biyolojik bir hastalıktır (Pitts et al., 2017; Takahashi & Nyvad, 2011). Günümüzde çürük oluşumu yalnızca belirli mikroorganizmaların varlığı ile açıklanmamakta; biyofilm, konak ve çevresel faktörler arasındaki dengenin bozulmasıyla gelişen dinamik, multifaktöriyel

bir süreç olarak kabul edilmektedir (Marsh, 1994; Pitts et al., 2017; Takahashi & Nyvad, 2011). Bu yaklaşım, çürüğün yalnızca ortaya çıkan lezyon üzerinden değil, hastalığın gelişimine katkıda bulunan biyolojik mekanizmalar ve risk faktörleri çerçevesinde değerlendirilmesini sağlamıştır (Marsh, 1994; Pitts et al., 2017).

Sağlıklı ağız ortamında demineralizasyon ve remineralizasyon süreçleri fizyolojik bir denge içinde devam etmektedir (Featherstone, 2004). Ancak fermente edilebilir karbonhidratların sık tüketilmesiyle biyofilm pH'sının kritik seviyenin altına düşmesi, mineral kaybının remineralizasyonu aşmasına sebep olmaktadır (Featherstone, 2004; Takahashi & Nyvad, 2011). Bu dengenin uzun süre bozulması başlangıç mine lezyonlarının gelişmesine, sürecin devam etmesi ise kavitasyon ve geri dönüşümsüz sert doku kaybına yol açmaktadır (Featherstone, 2004; Pitts et al., 2017). Buna karşılık tükürüğün tamponlama kapasitesi, içerdiği kalsiyum ve fosfat iyonları ile ağız ortamındaki flor, remineralizasyonu destekleyerek bu döngünün yeniden dengeye ulaşmasına katkı sağlamaktadır (Dawes & Wong, 2019; Featherstone, 2004).

Çürük gelişimi; biyofilmin miktarı ve kompozisyonu, fermente edilebilir karbonhidrat tüketim sıklığı, flor maruziyeti, tükürük akış hızı ve tamponlama kapasitesi gibi biyolojik faktörlerin yanı sıra ağız hijyeni, beslenme alışkanlıkları, sosyoekonomik durum, eğitim düzeyi ve bireyin sağlık davranışları gibi birçok değişkenin ortak etkisi altında şekillenmektedir (Fejerskov et al., 2015; Pitts et al., 2017). Bu faktörlerin önemli bir bölümü değiştirilebilir nitelikte olduğundan, koruyucu uygulamalar öncelikle bu risk faktörlerinin kontrolüne odaklanmaktadır (Featherstone & Chaffee, 2018; Pitts et al., 2014). Yaş ve geçmiş çürük deneyimi gibi değiştirilemeyen özelliklerin yanı sıra sistemik hastalıklar ve ilaç kullanımı da bireyin çürük riskinin belirlenmesinde dikkate alınmalıdır (Fejerskov et al., 2015).

Günümüzde çürük yönetimi, mevcut lezyonların tedavisi ile sınırlı olmayıp bireyin risk profilinin belirlenmesini ve değiştirilebilir risk faktörlerinin kontrol altına alınmasını esas almaktadır (Fejerskov et al., 2015; Pitts et al., 2014). Bu sebeple hastalığın biyolojik temelinin doğru anlaşılabilmesi, uygun koruyucu stratejilerin seçilebilmesi ve bireye özgü koruyucu uygulamaların planlanabilmesi başarılı çürük yönetiminin temel basamaklarından birini oluşturmaktadır (Fejerskov et al., 2015).

Risk Temelli Çürük Yönetimi

Modern kariyolojide çürük yönetimi, yalnızca mevcut lezyonların değerlendirilmesine değil, bireyin gelecekte çürük geliştirme olasılığının öngörülmesine de dayanmaktadır. Bu doğrultuda koruyucu uygulamalar tüm bireylere aynı şekilde uygulanmamakta, hastanın çürük riskine göre planlanmaktadır. Böylelikle düşük riskli bireylerde gereksiz girişimlerden kaçınılabilirken, yüksek riskli bireylerde daha yoğun koruyucu uygulama ve takip programlarının yürütülmesi mümkün olabilmektedir (Featherstone & Chaffee, 2018; Pitts et al., 2014).

Çürük risk değerlendirmesi; mevcut çürük deneyimi, aktif lezyon varlığı, ağız hijyeni, dental biyofilm birikimi, flor maruziyeti, beslenme alışkanlıkları, tükürük akış hızı ve tamponlama kapasitesi, sistemik hastalıklar ile bireyin davranışsal özellikleri gibi çok sayıda değişkenin birlikte değerlendirilmesini gerektirmektedir (Cagetti et al., 2018; Featherstone & Chaffee, 2018; Pitts et al., 2014). Bu değişkenler arasında geçmiş çürük deneyimi, gelecekte yeni lezyon gelişimini öngörmede en güçlü belirteçlerden biri olarak kabul edilmektedir (Tellez et al., 2013). Bununla birlikte güvenilir bir risk değerlendirmesi, tek bir parametreye değil, klinik ve bireysel bulguların birlikte yorumlanmasına dayanmalıdır (Cagetti et al., 2018; Featherstone & Chaffee, 2018).

Çürük riskinin sistematik olarak değerlendirilmesi amacıyla farklı klinik modeller geliştirilmiştir. Bunlar arasında CAMBRA (Caries Management by Risk Assessment) ve ICCMS™ (International Caries Classification and Management System), en yaygın kullanılan yaklaşımlar arasında yer almaktadır (Pitts et al., 2014). Her iki sistem de çürüğün erken tanılanmasını, bireysel risk faktörlerinin belirlenmesini ve koruyucu uygulamaların risk düzeyine göre planlanmasını esas almaktadır (Featherstone & Chaffee, 2018; Pitts et al., 2014). Bununla birlikte klinik uygulamada belirli bir modeli birebir uygulamaktan çok, bu sistemlerin ortaya koyduğu risk temelli karar verme anlayışının benimsenebilmesi daha önemlidir (Pitts et al., 2014).

Risk temelli çürük yönetiminin temel amacı sadece yeni lezyonların oluşumunu önlemek değil, mevcut başlangıç lezyonlarının ilerlemesini durdurabilmek ve ağız ortamındaki biyolojik dengeyi koruyabilmektir (Featherstone & Chaffee, 2018). Bu sebeple risk değerlendirmesi tek seferlik bir işlem olarak görülmemeli; bireyin klinik durumu ve risk profili düzenli aralıklarla yeniden gözden geçirilmelidir. Bu değerlendirme doğrultusunda koruyucu uygulamaların kapsamının ve takip sıklığının güncellenmesi, uzun dönem çürük kontrolünün sürdürülebilmesi açısından büyük önem taşımaktadır (Pitts et al., 2014).

Koruyucu Yaklaşımlar

Çürük profilaksisinin temel hedefi, ağız ortamındaki koruyucu ve hastalık oluşturucu faktörler arasındaki biyolojik dengenin korunması, yeni çürük lezyonlarının önlenmesi ve başlangıç lezyonlarının ilerlemesinin durdurulmasıdır. Koruyucu uygulamalar planlanırken bireyin çürük riski, yaşı, mevcut lezyonların aktivitesi, ağız hijyeni alışkanlıkları, flor maruziyeti, beslenme düzeni ve tükürük özellikleri birlikte değerlendirilmelidir (Pitts et al., 2014). Etkin bir koruyucu program; biyofilm kontrolü, uygun flor kullanımı, beslenme alışkanlıklarının düzenlenmesi ve

gereksinim duyulan olgularda profesyonel koruyucu uygulamaların bir arada yürütülmesini gerektirmektedir (Featherstone & Chaffee, 2018; Pitts et al., 2014).

Biyofilm Kontrolü ve Ağız Hijyeni

Dental biyofilm ağız ekosisteminin doğal bir bileşeni olup tamamen ortadan kaldırılması hedeflenmemektedir. Ancak biyofilmin uzun süre uzaklaştırılmaması ve sık aralıklarla fermente edilebilir karbonhidratlara maruz kalması, mikrobiyal dengenin asit üreten ve asidik ortama uyum sağlayabilen türler lehine değişmesine sebep olmaktadır (Takahashi & Nyvad, 2011). Bu koşullarda biyofilmin kariyojenik potansiyeli artmakta, demineralizasyon süreci hızlanmakta ve çürük gelişimi için uygun bir ortam oluşmaktadır. Bu nedenle biyofilm kontrolündeki amaç, biyofilmi tamamen ortadan kaldırmak değil, ekolojik dengeyi koruyarak kariyojenik özellik kazanmasını önleyebilmektir (Marsh, 1994, 2004; Takahashi & Nyvad, 2011).

Dental biyofilmin günlük mekanik kontrolünde temel yöntem diş fırçalamadır. Florlu diş macunu ile günde iki kez yapılan düzenli fırçalama, biyofilmin mekanik olarak uzaklaştırılmasını sağlarken florun topikal etkisi sayesinde remineralizasyonu da desteklemektedir (Twetman, 2018; Walsh et al., 2010). Fırçalamanın başarısı kullanılan diş fırçasından çok, doğru teknikle ve düzenli uygulanmasına bağlıdır. Manuel ve elektrikli diş fırçaları doğru kullanıldığında biyofilm kontrolüne katkı sağlamaktadır. Bununla birlikte sistematik derleme bulguları, elektrikli diş fırçalarının plak ve gingivitisin azaltılmasında manuel fırçalara göre ilave yarar sağlayabildiğini göstermektedir. Özellikle el becerisi sınırlı bireylerde, ortodontik tedavi gören hastalarda veya ağız hijyenini sağlamada güçlük yaşayan kişilerde elektrikli diş fırçaları kullanım kolaylığı sağlayarak daha etkin plak kontrolüne katkıda bulunabilmektedir (Yaacob et al., 2014).

Çocuklarda ağız hijyeni uygulamaları ilk süt dişinin sürmesi ile başlamalı ve yaşa uygun miktarda florlu diş macunu kullanılmalıdır. Motor becerilerin yeterince gelişmediği erken çocukluk döneminde diş fırçalama ebeveyn tarafından yapılmalı veya yakından denetlenmelidir (American Academy of Pediatric Dentistry, 2025a, 2025b). Yaşlı bireylerde, özel gereksinimli hastalarda ve fiziksel kısıtlılığı bulunan kişilerde ise elektrikli diş fırçaları, kalınlaştırılmış fırça sapları veya bakım veren desteği gibi bireysel gereksinimlere uygun yardımcı yöntemlerden yararlanılabilir (Tonetti et al., 2015; Yaacob et al., 2014).

Diş fırçalarının ulaşamadığı aproksimal bölgelerin temizliği de günlük ağız hijyeninin önemli bir bileşenidir. Diş ipi ve interdental fırçalar bu amaçla en sık kullanılan yardımcı araçlardır. Ara yüz temizleme yönteminin seçiminde interdental boşluğun genişliği, periodontal dokuların durumu, dişlerin dizilimi ve bireyin uygulama becerisi dikkate alınmalıdır (Tonetti et al., 2015). Dar kontak alanlarında diş ipi daha uygun bir seçenek iken, periodontal desteğin azaldığı veya ara yüz boşluklarının genişlediği olgularda interdental fırçalar daha etkili sonuçlar sağlayabilmektedir. Ancak hangi yöntem tercih edilirse edilsin, koruyucu etkinliğin temel belirleyicisi düzenli ve doğru kullanımdır (Sälzer et al., 2015).

Ağız hijyeni eğitimi yalnızca diş fırçalama tekniğinin gösterilmesinden ibaret değildir. Hastanın mevcut alışkanlıklarının değerlendirilebilmesi, ağız hijyenini sürdürmesini zorlaştıran sebeplerin belirlenebilmesi ve bireysel gereksinimlerine uygun önerilerin sunulabilmesi uzun dönem başarı açısından kritik önemdedir (Pitts et al., 2014). Düzenli klinik kontroller sırasında ağız hijyeni uygulamalarının yeniden değerlendirilmesi, gerekli durumlarda teknik hataların düzeltilmesi ve hastanın motivasyonunun desteklenmesi biyofilm kontrolünün sürdürülebilirliğine katkı sağlamaktadır. Bu yönüyle biyofilm kontrolü, tek seferlik bir öneri değil, düzenli takip ve hasta iş birliği

gerektiren koruyucu bakımın temel bileşenlerinden biridir (Pitts et al., 2014; Tonetti et al., 2015).

Flor Uygulamaları

Flor, çürüğün önlenmesi ve başlangıç lezyonlarının kontrol altına alınmasında etkinliği en güçlü bilimsel kanıtlarla desteklenen koruyucu ajandır. Günümüzde çürük önleyici etkisinin, diş gelişimi sırasında mine yapısına katılmasından çok, sürme sonrasında diş yüzeyi ile sürekli temas etmesine bağlı olduğu kabul edilmektedir (Featherstone, 2004; Walsh et al., 2010). Topikal flor uygulamaları demineralizasyonu azaltırken remineralizasyonu desteklemekte, yeniden oluşan mineral yapının asitlere karşı direncini artırmakta ve biyofilm metabolizmasını baskılayarak çürük gelişimini sınırlandırmaktadır. Bu özellikleri nedeniyle flor uygulamaları, risk temelli çürük yönetiminin temel bileşenlerinden biri olarak kabul edilmektedir (Featherstone, 1999, 2004; Walsh et al., 2010).

Günlük flor uygulamalarının temelini florlu diş macunları oluşturmaktadır. Florlu diş macunu ile günde iki kez düzenli diş fırçalanması, biyofilmin mekanik olarak uzaklaştırılması ile topikal flor etkisini bir araya getirerek çürükten korunmada en etkili yöntemlerden biri olarak kabul edilmektedir (Walsh et al., 2010). Koruyucu etkinlik; flor konsantrasyonu, kullanım sıklığı ve düzenli ağız hijyeninin sürdürülmesi ile yakından ilişkilidir. Bu sebeple özellikle çürük riski yüksek bireylerde sadece diş fırçalama alışkanlığı değil, kullanılan diş macununun flor konsantrasyonu ve doğru kullanım şekli de göz önünde bulundurulmalıdır (Toumba et al., 2019; Walsh et al., 2010).

Florlu diş macunu kullanımına ilk süt dişinin sürmesiyle başlanmalıdır. Erken çocukluk döneminde yaşa uygun miktarda diş macunu kullanılması ve diş fırçalamanın ebeveyn tarafından yapılması veya denetlenmesi önem taşımaktadır (American Academy of Pediatric Dentistry, 2025a). Üç yaşından küçük

çocuklarda pirinç tanesi büyüklüğünde, üç ile altı yaş arasındaki çocuklarda ise bezelye tanesi büyüklüğünde florlu diş macunu önerilmektedir. Fırçalama sonrasında yalnızca fazla diş macununun tükürülmesi yeterli olup, aşırı su ile çalkalamadan kaçınılması florun diş yüzeyindeki etkisinin devam etmesine katkı sağlamaktadır (American Academy of Pediatric Dentistry, 2025a; Toumba et al., 2019).

Profesyonel flor uygulamaları, günlük flor kullanımının yerine geçen yöntemler değil, bireyin risk düzeyine göre koruyucu programı destekleyen uygulamalardır. Bu amaçla en yaygın kullanılan materyaller flor vernikleridir. Diş yüzeyi ile uzun süre temas edebilmeleri, kolay uygulanabilmeleri ve yutulma riskinin düşük olması nedeniyle özellikle çocuklarda, ortodontik tedavi gören bireylerde, kök çürüğü riski bulunan hastalarda ve yüksek çürük riski taşıyan olgularda sıklıkla tercih edilmektedir (Weyant et al., 2013). Uygulama sıklığı ise bireyin çürük riski ve lezyon aktivitesine göre belirlenmeli, yüksek riskli bireylerde daha kısa aralıklarla uygulanmalıdır (Marinho et al., 2013; Weyant et al., 2013).

Flor jelleri de profesyonel uygulamalar arasında yer almakta ve yüksek çürük riski taşıyan uygun hasta gruplarında kullanılabilmektedir. Bununla birlikte yutulma riski nedeniyle altı yaşından küçük çocuklarda profesyonel topikal flor uygulamalarında vernik tercih edilmelidir; jel uygulamalarında hastanın ürünü güvenli şekilde tükürebilmesi dikkate alınmalıdır (American Academy of Pediatric Dentistry, 2025a; Weyant et al., 2013). Ayrıca asidüle fosfat florür içeren jeller bazı seramik ve estetik restoratif materyallerin yüzey özelliklerini etkileyebileceğinden, bu hastalarda nötr sodyum florür preparatları daha uygun bir seçenek oluşturabilmektedir (American Academy of Pediatric Dentistry, 2025a).

Evde kullanılan ek flor ürünleri de seçilmiş hasta gruplarında koruyucu programa katkı sağlayabilmektedir. Florlu ağız gargaraları; ortodontik tedavi gören, aktif çürük lezyonları bulunan, ağız hijyeni yetersiz olan veya tükürük akışının azaldığı bireylerde günlük flor uygulamalarını desteklemek amacıyla kullanılabilmektedir (Toumba et al., 2019). Ancak gargaranın güvenli şekilde çalkalanıp tükürülebilmesi gerektiğinden küçük çocuklarda rutin olarak önerilmemektedir. Ayrıca florlu gargaraların diş fırçalamadan hemen sonra değil, günün farklı bir zamanında kullanılması, diş macunundan sağlanan topikal etkinin korunabilmesi açısından daha uygun kabul edilmektedir (Marinho et al., 2016; Toumba et al., 2019).

Yüksek konsantrasyonlu flor içeren reçeteli diş macunları ve jeller, tüm bireylerde rutin kullanım için önerilen ürünler değildir; seçilmiş yüksek riskli hastalarda diş hekiminin değerlendirmesi doğrultusunda kullanılmalıdır. Bu preparatlar; yaygın aktif çürüğü bulunan, kök çürüğü riski yüksek olan, belirgin ağız kuruluğu görülen veya baş-boyun bölgesine radyoterapi uygulanmış hastalar gibi özel gereksinimi bulunan bireylerde düşünülebilir (Weyant et al., 2013). Ürün seçimi yapılırken hastanın yaşı, çürük riski, mevcut flor kaynakları ve ürünü doğru kullanabilme durumu birlikte değerlendirilmelidir (Slayton et al., 2018; Toumba et al., 2019).

Flor uygulamalarında temel ilke, mümkün olan en yüksek flor dozunu sağlamak değil, bireyin gereksinimlerine uygun flor konsantrasyonunu güvenli ve düzenli şekilde uygulamaktır. Özellikle erken çocukluk döneminde flor içeren ürünlerin gereğinden fazla yutulması dental florozis riskini artırabileceğinden, yaşa uygun miktarda diş macunu kullanılması ve ebeveyn denetimi büyük önem taşımaktadır (American Academy of Pediatric Dentistry, 2025a). Sonuç olarak flor uygulamaları, bireyin yaşı, çürük riski ve klinik gereksinimleri doğrultusunda planlandığında çürüğün önlenmesi ve başlangıç lezyonlarının kontrolünde en etkili

koruyucu uygulamalardan biri olmayı sürdürmektedir (American Academy of Pediatric Dentistry, 2025a; Toumba et al., 2019).

Beslenmenin Düzenlenmesi

Beslenme alışkanlıkları, çürük gelişimini etkileyen en önemli değiştirilebilir risk faktörlerinden biridir. Günümüzde çürük oluşumunda yalnızca tüketilen şeker miktarının değil, tüketim sıklığı ve tüketim şeklinin de belirleyici olduğu bilinmektedir (Takahashi & Nyvad, 2011). Özellikle serbest şekerlerin gün içerisinde sık aralıklarla tüketilmesi, dental biyofilm pH'ının kritik seviyenin altına daha sık düşmesine neden olmakta ve demineralizasyon süresini uzatmaktadır. Buna karşılık öğünler arasında yeterli süre bırakılması, tükürüğün tamponlama kapasitesinin ve remineralizasyon mekanizmalarının yeniden etkinleşmesine olanak sağlayarak çürük gelişme riskini azaltmaktadır (Moynihan & Kelly, 2014; Takahashi & Nyvad, 2011; World Health Organization, 2015).

Beslenme danışmanlığının amacı, bireyin tüm beslenme alışkanlıklarını değiştirmekten çok çürük riskini artıran davranışların belirlenmesi ve bunların kontrol altına alınmasıdır. Bu kapsamda değerlendirme yalnızca şeker tüketimi ile sınırlı tutulmamalı; öğün düzeni, ara öğün sıklığı, serbest şeker tüketimi, asitli içecek alışkanlığı ve gıdaların ağız ortamında kalış süresi birlikte ele alınmalıdır. Özellikle sık tüketilen şekerli atıştırmalıklar ve şeker içeren içecekler biyofilmin uzun süre asidik kalmasına neden olarak çürük gelişimini kolaylaştırmaktadır (Moynihan & Kelly, 2014; Sheiham & James, 2014; World Health Organization, 2015).

Şekerli yiyecek ve içeceklerin ana öğünlerle birlikte tüketilmesi, ara öğünlerde sık tüketilmelerine göre daha düşük çürük riski ile ilişkilendirilmektedir. Benzer şekilde gece yatmadan önce şekerli gıda veya içecek tüketimi de tükürük akış hızının fizyolojik olarak azalması nedeniyle çürük riskini artırabilmektedir (World

Health Organization, 2015). Bu nedenle bireylere yalnızca şeker tüketimini azaltmaları değil, tüketim sıklığını düzenlemeleri ve mümkün olduğunca şekerli gıdaları ana öğünlerle birlikte tüketmeleri önerilmelidir (Sheiham & James, 2014; World Health Organization, 2015).

Beslenme danışmanlığı bireyin yaşı, çürük riski, sistemik durumu, sosyoekonomik koşulları ve yaşam tarzı dikkate alınarak planlanmalıdır (Pitts et al., 2014). Çocuklarda ailelerin beslenme alışkanlıkları ve ebeveyn farkındalığı ön planda tutulurken, ergen ve yetişkinlerde günlük yaşamla uyumlu ve sürdürülebilir önerilerin geliştirilmesi daha gerçekçi sonuçlar vermektedir. Çürük riski yüksek bireylerde beslenme danışmanlığı tek başına yeterli olmayıp flor uygulamaları, etkili biyofilm kontrolü ve düzenli klinik takip ile birlikte yürütülmelidir. Risk temelli koruyucu yaklaşımın bir parçası olarak planlanan beslenme danışmanlığı, uzun dönemde çürük kontrolünün sağlanmasına önemli katkı sunmaktadır (Moynihan & Kelly, 2014; Pitts et al., 2014; World Health Organization, 2015).

Flor Dışı Koruyucu Ajanlar

Flor, çürük profilaksisinde etkinliği en güçlü bilimsel kanıtlarla desteklenen koruyucu ajan olmayı sürdürmektedir. Bununla birlikte son yıllarda remineralizasyonun desteklenmesi, biyofilm ekolojisinin düzenlenmesi ve çürük riskinin azaltılması amacıyla çeşitli flor dışı ajanlar geliştirilmiştir. Bu ürünler özellikle başlangıç lezyonlarının yönetiminde veya flor temelli uygulamaların etkinliğini desteklemek amacıyla değerlendirilebilmektedir (Amaechi, 2017; Cochrane et al., 2010). Mevcut kanıtlar göz önünde bulundurulduğunda, bu ajanların çoğunun florun yerine kullanılmasından çok, uygun endikasyonlarda koruyucu programa tamamlayıcı olarak dâhil edilmesi daha doğru görünmektedir (Amaechi, 2017; Cochrane et al., 2010).

CPP-ACP (kazein fosfopeptid-amorf kalsiyum fosfat), biyoyararlanımı yüksek kalsiyum ve fosfat iyonları sağlayarak remineralizasyonu desteklemeyi amaçlayan en yaygın flor dışı ajanlardan biridir (Amaechi, 2017). Özellikle başlangıç mine lezyonlarının ve ortodontik tedavi sırasında gelişen beyaz leke lezyonlarının yönetiminde olumlu sonuçlar bildirilmiştir. Bununla birlikte CPP-ACP'nin tek başına flor uygulamalarına üstünlük sağladığına ilişkin kanıtlar sınırlıdır. Flor ile birlikte kullanımı remineralizasyon üzerine ilave katkı sağlayabilse de klinik etkinliği, ürünün özellikleri ve uygulama koşulları dikkate alınarak değerlendirilmelidir (Amaechi, 2017; Cochrane et al., 2010).

Biyomimetik özellik gösteren hidroksiapatit içeren ürünler de son yıllarda dikkat çekmektedir. Nano veya mikrokristalin hidroksiapatit partiküllerinin diş sert dokularıyla etkileşimi yoluyla mineral kaybının azaltılması ve remineralizasyonun desteklenmesi amaçlanmaktadır. Hidroksiapatit içeren diş macunlarının çürük lezyonlarının ilerlemesini sınırlandırmada umut verici sonuçlar sunduğunu bildiren klinik çalışmalar bulunmaktadır (Schlagenhauf et al., 2019). Bu ürünlerin dentin hassasiyetinin azaltılmasına da katkı sağlayabildiği sistematik derleme ve meta-analiz bulgularıyla gösterilmiştir (Limeback et al., 2023). Bununla birlikte farklı yaş gruplarında ve farklı çürük risk profillerinde uzun dönem etkinliğin ortaya konulabilmesi için daha fazla klinik çalışmaya ihtiyaç vardır (Schlagenhauf et al., 2019).

Arjinin, biyofilm içerisindeki arginolitik bakteriler tarafından metabolize edilmesi sonucunda amonyak oluşumunu artırmakta ve biyofilm pH'sının yükselmesine katkı sağlamaktadır. Bu mekanizma ile demineralizasyonun azaltılması ve biyofilm ekolojisinin daha dengeli hâle getirilmesi hedeflenmektedir. Arjinin içeren diş macunlarının çürük riskini azaltmaya katkı sağlayabileceğini bildiren çalışmalar bulunmakla birlikte, mevcut

kanıtlar bu ürünlerin rutin kullanımını güçlü biçimde destekleyecek düzeyde değildir (Nascimento & Burne, 2014).

Ksilitol, oral mikroorganizmalar tarafından fermente edilemeyen bir şeker alkolüdür. Biyofilmde asit oluşumunu azaltması ve özellikle sakız formunda kullanıldığında tükürük akışını uyarması nedeniyle uzun yıllardır çürük profilaksisinde değerlendirilmiştir. Düzenli kullanımının yüksek çürük riski taşıyan bazı bireylerde yarar sağlayabileceği bildirilse de güncel sistematik derlemeler, ksilitolün tek başına belirgin bir çürük önleyici etki gösterdiğine ilişkin kanıtların sınırlı olduğunu ortaya koymaktadır (Riley et al., 2015). Probiyotikler ise oral mikrobiyotanın kompozisyonunu ve metabolik aktivitesini düzenlemeyi hedefleyen güncel uygulamalar arasında yer almaktadır. Bazı probiyotik suşlarının Streptococcus mutans düzeylerini geçici olarak azaltabildiği gösterilmiş olmakla birlikte, bu mikrobiyolojik değişimin uzun dönemde çürük insidansını azaltıp azaltmadığı henüz açıklığa kavuşmamıştır. Bu sebeple probiyotikler umut verici bir seçenek olarak değerlendirilmekte, ancak rutin çürük profilaksisinin standart bir bileşeni olarak önerilebilmeleri için daha güçlü ve uzun süreli klinik kanıtlara gereksinim duyulmaktadır (Gruner et al., 2016).

Flor dışı koruyucu ajanlar, bireyin çürük riski, lezyon özellikleri ve klinik gereksinimleri doğrultusunda seçildiğinde koruyucu programa katkı sağlayabilmektedir. Bununla birlikte bu ürünlerin flor temelli uygulamaların yerine geçen bağımsız tedaviler olarak değil, kanıt düzeyi ve endikasyonları dikkate alınarak kullanılan tamamlayıcı seçenekler olarak değerlendirilmesi daha uygundur (Amaechi, 2017; Cochrane et al., 2010).

Fissür Örtücüler

Pit ve fissürler, oklüzal yüzeylerin anatomik özellikleri nedeniyle dental biyofilmin uzaklaştırılmasının en güç olduğu

bölgeler arasında yer almaktadır (Ahovuo-Saloranta et al., 2017). Özellikle yeni sürmüş daimi molarlarda mine matürasyonunun henüz tamamlanmamış olması, dişin oklüzal düzleme tam olarak ulaşmaması ve yüzey temizliğinin güçleşmesi bu bölgeleri çürük gelişimine daha yatkın hâle getirmektedir. Pit ve fissürlerin koruyucu materyallerle örtülmesi, bu nedenle oklüzal çürüklerin önlenmesinde etkinliği kanıtlanmış minimal invaziv uygulamalardan biri olarak kabul edilmektedir (Ahovuo-Saloranta et al., 2017; Kühnisch et al., 2016).

Fissür örtücüler, pit ve fissürleri fiziksel olarak izole ederek dental biyofilm ile fermente edilebilir karbonhidratların bu alanlara ulaşmasını sınırlandırmaktadır. Böylece biyofilm retansiyonu azalmakta ve oklüzal yüzeylerin temizlenebilirliği artmaktadır (Ahovuo-Saloranta et al., 2017). Günümüzde rezin esaslı ve cam iyonomer esaslı fissür örtücüler en yaygın kullanılan materyallerdir. Uygun izolasyonun sağlanabildiği olgularda rezin esaslı materyaller, daha yüksek ve uzun süreli retansiyon göstermeleri nedeniyle genellikle ilk tercih olarak önerilmektedir. Cam iyonomer esaslı materyaller ise özellikle nem kontrolünün güç olduğu yeni sürmüş dişlerde veya hasta kooperasyonunun sınırlı olduğu durumlarda uygun bir alternatif oluşturmaktadır. Rezin esaslı materyallere göre daha düşük retansiyon göstermelerine karşın flor salımı yapmaları ve diş dokularına kimyasal olarak bağlanabilmeleri önemli avantajlarıdır (Ahovuo-Saloranta et al., 2017; Kühnisch et al., 2016; Wright, Tampi, et al., 2016).

Fissür örtücü uygulama kararı yalnızca dişin sürme zamanı dikkate alınarak verilmemelidir. Bireyin çürük riski, dişin morfolojisi, önceki çürük deneyimi, ağız hijyeni, flor maruziyeti ve düzenli kontrole gelebilme durumu birlikte değerlendirilmelidir (Pitts et al., 2014). Derin ve dar fissürlere sahip, biyofilm retansiyonunun fazla olduğu ve temizlenmesi güç oklüzal yüzeyler bu uygulamadan en fazla yarar gören alanlardır. Buna karşılık düşük

çürük riskine sahip, yüzey morfolojisi daha temizlenebilir ve ağız hijyeni yeterli olan bireylerde tüm oklüzal yüzeylerin rutin olarak örtülmesi gerekli olmayabilir (Ahovuo-Saloranta et al., 2017; Pitts et al., 2014; Urquhart et al., 2019).

Güncel kariyoloji anlayışına göre fissür örtücüler yalnızca sağlam oklüzal yüzeylerde değil, radyografik olarak dentine ulaşmamış ve klinik olarak kavitasyon göstermeyen başlangıç oklüzal lezyonlarda da uygulanabilmektedir (Urquhart et al., 2019). Lezyonun biyofilm ile temasının kesilmesi ve marjinal sızdırmazlığın korunması, çürük aktivitesinin baskılanmasına ve lezyon ilerlemesinin durdurulmasına katkı sağlamaktadır. Bu yönüyle fissür örtücüler, uygun olgularda başlangıç oklüzal lezyonların minimal invaziv yönetiminde de önemli bir seçenektir (Urquhart et al., 2019; Wright, Crall, et al., 2016).

Fissür örtücülerin uzun dönem başarısı yalnızca uygulama sırasındaki başlangıç retansiyonuna değil, materyalin bütünlüğünün ve marjinal uyumunun düzenli olarak izlenmesine bağlıdır. Klinik kontroller sırasında kısmi veya tam materyal kaybı, marjinal bozulma ve lezyon aktivitesi değerlendirilerek gerekli durumlarda onarım veya yeniden uygulama yapılmalıdır. Bu nedenle fissür örtücüler tek seferlik bir işlem olarak değil, risk temelli koruyucu bakım programının düzenli takip gerektiren bir bileşeni olarak ele alınmalıdır (Ahovuo-Saloranta et al., 2017; Urquhart et al., 2019).

Minimal İnvaziv Koruyucu Uygulamalar

Koruyucu diş hekimliğinde güncel anlayış, çürüğü yalnızca restoratif tedavi gerektiren bir doku kaybı olarak değil, uygun müdahalelerle kontrol altına alınabilen biyolojik bir hastalık süreci olarak değerlendirmektedir (Pitts et al., 2014). Bu anlayış doğrultusunda geliştirilen minimal invaziv uygulamalar, sağlıklı diş dokusunun mümkün olduğunca korunmasını ve başlangıç ya da erken dönem çürük lezyonlarının gereksiz doku kaybı oluşturmadan

yönetilmesini amaçlamaktadır. Tedavi kararı yalnızca lezyonun boyutu ve derinliğine göre değil; bireyin çürük riski, lezyon aktivitesi, kavitasyon durumu, pulpal bulgular ve hastanın düzenli olarak takip edilebilirliği birlikte değerlendirilerek verilmelidir (Banerjee et al., 2017; Pitts et al., 2014).

Kavitasyon göstermeyen mine lezyonlarında ilk seçenek non-operatif koruyucu uygulamalardır. Etkin biyofilm kontrolü, uygun flor kullanımı, beslenme alışkanlıklarının düzenlenmesi ve düzenli klinik takip ile birçok başlangıç lezyonunun ilerlemesi durdurulabilmekte veya lezyon inaktif hâle getirilebilmektedir (Banerjee et al., 2017). Özellikle aktif beyaz leke lezyonlarında yüzey bütünlüğü korunmuşsa, uygun koruyucu uygulamalarla remineralizasyonun desteklenmesi mümkündür. Bu nedenle lezyonun erken dönemde saptanması ve aktivitesinin doğru değerlendirilmesi, minimal invaziv yönetimin başarısında belirleyici rol oynamaktadır (Pitts et al., 2014; Slayton et al., 2018).

Kavitasyon göstermeyen başlangıç aproksimal lezyonlarda rezin infiltrasyon, non-operatif tedavi ile restoratif girişim arasında yer alan mikro-invaziv bir seçenek olarak kullanılabilmektedir. Bu teknikte düşük viskoziteli rezin, demineralize mine içerisindeki poröz yapılara infiltre edilerek asit ve çözünmüş mineral difüzyon yollarını kapatmakta, böylece lezyon ilerlemesi sınırlandırılmaktadır. Özellikle mine ile sınırlı veya dentinin dış bölümüne ulaşmış, ancak kavitasyon göstermeyen aproksimal lezyonlarda rezin infiltrasyonun yalnızca non-operatif takip uygulanan olgulara göre progresyonu azaltabildiği gösterilmiştir. Tedavinin başarısı ise doğru olgu seçimine, etkin izolasyona ve uygulama basamaklarının eksiksiz gerçekleştirilmesine bağlıdır (Cebula et al., 2023; Slayton et al., 2018).

Gümüş diamin florür (silver diammine fluoride, SDF), özellikle aktif dentin çürük lezyonlarının ilerlemesini durdurmak amacıyla kullanılan minimal invaziv bir ajandır. İçeriğindeki gümüş

iyonlarının antibakteriyel etkisi ile yüksek flor konsantrasyonunun mineral kaybını azaltıcı ve remineralizasyonu destekleyici etkisi bir araya gelerek çürük aktivitesinin kontrol altına alınmasına katkı sağlamaktadır (Slayton et al., 2018). SDF; özellikle küçük çocuklarda, hasta kooperasyonunun sınırlı olduğu durumlarda, özel gereksinimli bireylerde, yaşlı hastalarda ve restoratif tedavinin ertelenmesinin uygun görüldüğü olgularda önemli bir seçenek oluşturmaktadır. Bununla birlikte uygulama sonrasında aktif çürük dokusunda siyah renklenmeye neden olması, özellikle estetik bölgelerde kullanımını sınırlandırabilmektedir. Bu nedenle SDF uygulaması; uygun olgu seçimi, hastanın veya ebeveynin ayrıntılı olarak bilgilendirilmesi ve düzenli klinik takip ile birlikte planlanmalıdır (Slayton et al., 2018).

Lezyonun dentine ilerlediği ve restoratif tedavinin gerekli olduğu olgularda ise sağlıklı diş dokusunun korunması ve pulpa ekspozu riskinin azaltılması öncelik taşımaktadır. Derin çürük lezyonlarında seçici çürük uzaklaştırma, günümüzde minimal invaziv tedavinin başlıca uygulamalarından biri olarak kabul edilmektedir. Bu yöntemde kavitenin periferinde restorasyonun sızdırmazlığını sağlayacak sağlam mine ve sert dentin dokusu oluşturulurken, pulpaya yakın bölgede daha yumuşak dentinin kontrollü olarak bırakılması tercih edilmektedir. Yeterli marjinal sızdırmazlığın sağlanmasıyla kavite içerisinde kalan mikroorganizmaların dış ortamla ilişkisi kesilmekte, metabolik aktiviteleri baskılanmakta ve lezyon ilerlemesi kontrol altına alınmaktadır. Böylece gereksiz doku kaybı ile pulpa ekspozu olasılığı azaltılabilmektedir (Banerjee et al., 2017; Schwendicke et al., 2016).

Minimal invaziv uygulamaların başarısı yalnızca seçilen materyal veya tekniğe değil, doğru endikasyonun belirlenmesine ve hastalık sürecinin uzun dönem izlenmesine bağlıdır. Bireyin çürük riskinin düzenli olarak yeniden değerlendirilebilmesi, lezyon

aktivitesinin izlenebilmesi ve koruyucu uygulamaların klinik gereksinimlere göre güncellenebilmesi tedavinin devamlılığı açısından önem taşımaktadır. Minimal invaziv diş hekimliği bu yönüyle sadece belirli tekniklerin kullanımını değil, risk temelli çürük yönetimini esas alan ve doğal diş dokusunun korunmasını ön planda tutan çağdaş bir klinik anlayışı ifade etmektedir (Banerjee et al., 2017; Pitts et al., 2014).

Sonuç

Diş çürüğü; biyolojik, çevresel ve davranışsal faktörlerin etkileşimi sonucunda gelişen, ancak büyük ölçüde önlenebilen kronik bir hastalıktır. Güncel çürük yönetiminde hedef yalnızca oluşan sert doku kayıplarını restoratif yöntemlerle tedavi etmek değil, hastalığın gelişimine katkıda bulunan risk faktörlerini belirleyerek çürük sürecini kontrol altına alabilmektir. Koruyucu uygulamalar bu yönüyle restoratif tedavinin alternatifi değil, çağdaş çürük yönetiminin vazgeçilmez bir parçasıdır.

Risk temelli çürük yönetimi, bireyin mevcut risk profilinin belirlenmesini, bu profilin düzenli aralıklarla yeniden değerlendirilmesini ve koruyucu programın elde edilen bulgular doğrultusunda güncellenmesini gerektirmektedir. Etkin biyofilm kontrolü, uygun flor kullanımı, beslenme alışkanlıklarının düzenlenmesi, gerekli durumlarda flor dışı ajanlardan yararlanılması ve uygun endikasyonlarda fissür örtücü uygulanması, bu sürecin kanıta dayalı başlıca bileşenlerini oluşturmaktadır. Bununla birlikte uzun dönem başarı, yalnızca seçilen yöntemlere değil, bireyin gereksinimlerine uygun, uygulanabilir ve sürdürülebilir bir koruyucu bakım programının oluşturulmasına bağlıdır.

Minimal invaziv diş hekimliği anlayışının yaygınlaşmasıyla erken tanı, lezyon aktivitesinin doğru değerlendirilmesi ve sağlıklı diş dokusunun korunması klinik karar verme sürecinin merkezine yerleşmiştir. Başlangıç lezyonlarının non-operatif veya mikro-

invaziv yöntemlerle yönetilebilmesi, gereksiz restoratif girişimlerin azaltılmasına ve doğal diş dokusunun uzun süre korunmasına katkı sağlamaktadır. Benzer şekilde, restoratif tedavinin gerekli olduğu olgularda da mümkün olan en az doku kaybıyla biyolojik bütünlüğün korunması öncelikli olmalıdır.

Başarılı çürük kontrolü; koruyucu uygulamaların sürekliliğini, risk değerlendirmesinin düzenli olarak yenilenmesini, hasta uyumunun desteklenmesini ve klinik izlem sonuçlarına göre tedavi planının gerektiğinde değiştirilmesini gerektirir. Bu nedenle çürük profilaksisi tek bir ürüne veya uygulamaya dayanan sabit bir program olarak değil, birbirini tamamlayan kanıta dayalı yöntemlerin bireysel risk profiline göre bir arada kullanıldığı dinamik bir süreç olarak ele alınmalıdır.

Koruyucu diş hekimliği ilkelerinin günlük klinik uygulamaya daha etkin biçimde aktarılması, yalnızca yeni çürük lezyonlarının ve restoratif tedavi gereksiniminin azaltılmasına değil, aynı zamanda doğal diş dokusunun yaşam boyu korunmasına da katkı sağlayacaktır. Böylece tedavi odaklı geleneksel anlayıştan, hastalığın kontrolünü ve doku koruyucu klinik kararları önceleyen daha sürdürülebilir bir çürük yönetimine geçiş mümkün olacaktır.

Kaynakça

Ahovuo-Saloranta, A., Forss, H., Walsh, T., Nordblad, A., Mäkelä, M., & Worthington, H. V. (2017). Pit and fissure sealants for preventing dental decay in permanent teeth. *Cochrane Database of Systematic Reviews, 2017*(7), Article CD001830. https://doi.org/10.1002/14651858.CD001830.pub5

Amaechi, B. T. (2017). Remineralisation—the buzzword for early MI caries management. *British Dental Journal, 223*(3), 173–182. https://doi.org/10.1038/sj.bdj.2017.663

American Academy of Pediatric Dentistry. (2025a). Fluoride therapy. In *The reference manual of pediatric dentistry* (pp. 372–378). https://www.aapd.org/media/Policies_Guidelines/BP_FluorideTherapy.pdf

American Academy of Pediatric Dentistry. (2025b). *The reference manual of pediatric dentistry*. https://store.aapd.org/index.php/books/reference-manual-2025-2026.html

Banerjee, A., Frencken, J. E., Schwendicke, F., & Innes, N. P. T. (2017). Contemporary operative caries management: Consensus recommendations on minimally invasive caries removal. *British Dental Journal, 223*(3), 215–222. https://doi.org/10.1038/sj.bdj.2017.672

Cagetti, M. G., Bontà, G., Cocco, F., Lingström, P., Strohmenger, L., & Campus, G. (2018). Are standardized caries risk assessment models effective in assessing actual caries status and future caries increment? A systematic review. *BMC Oral Health, 18*(1), Article 123. https://doi.org/10.1186/s12903-018-0585-4

Cebula, M., Göstemeyer, G., Krois, J., Pitchika, V., Paris, S., Schwendicke, F., & Effenberger, S. (2023). Resin infiltration of non-cavitated proximal caries lesions in primary and permanent teeth: A systematic review and scenario analysis of randomized controlled trials. *Journal of Clinical Medicine, 12*(2), Article 727. https://doi.org/10.3390/jcm12020727

Cochrane, N. J., Cai, F., Huq, N. L., Burrow, M. F., & Reynolds, E. C. (2010). New approaches to enhanced remineralization of tooth enamel. *Journal of Dental Research, 89*(11), 1187–1197. https://doi.org/10.1177/0022034510376046

Dawes, C., & Wong, D. T. W. (2019). Role of saliva and salivary diagnostics in the advancement of oral health. *Journal of Dental Research, 98*(2), 133–141. https://doi.org/10.1177/0022034518816961

Featherstone, J. D. B. (1999). Prevention and reversal of dental caries: Role of low level fluoride. *Community Dentistry and Oral Epidemiology, 27*(1), 31–40. https://doi.org/10.1111/j.1600-0528.1999.tb01989.x

Featherstone, J. D. B. (2004). The continuum of dental caries—evidence for a dynamic disease process. *Journal of Dental Research, 83*(Spec No C), C39–C42. https://doi.org/10.1177/154405910408301s08

Featherstone, J. D. B., & Chaffee, B. W. (2018). The evidence for caries management by risk assessment (CAMBRA®). *Advances in Dental Research, 29*(1), 9–14. https://doi.org/10.1177/0022034517736500

Fejerskov, O., Nyvad, B., & Kidd, E. (Eds.). (2015). *Dental caries: The disease and its clinical management* (3rd ed.). Wiley-Blackwell.

Gruner, D., Paris, S., & Schwendicke, F. (2016). Probiotics for managing caries and periodontitis: Systematic review and meta-analysis. *Journal of Dentistry, 48*, 16–25. https://doi.org/10.1016/j.jdent.2016.03.002

Kühnisch, J., Ekstrand, K. R., Pretty, I., Twetman, S., van Loveren, C., Gizani, S., & Spyridonos Loizidou, M. (2016). Best clinical practice guidance for management of early caries lesions in children and young adults: An EAPD policy document. *European Archives of Paediatric Dentistry, 17*(1), 3–12. https://doi.org/10.1007/s40368-015-0218-4

Limeback, H., Enax, J., & Meyer, F. (2023). Clinical evidence of biomimetic hydroxyapatite in oral care products for reducing dentin hypersensitivity: An updated systematic review and meta-analysis. *Biomimetics, 8*(1), Article 23. https://doi.org/10.3390/biomimetics8010023

Marinho, V. C. C., Chong, L. Y., Worthington, H. V., & Walsh, T. (2016). Fluoride mouthrinses for preventing dental caries in children and adolescents. *Cochrane Database of Systematic Reviews, 7*(7), Article CD002284. https://doi.org/10.1002/14651858.CD002284.pub2

Marinho, V. C. C., Worthington, H. V., Walsh, T., & Clarkson, J. E. (2013). Fluoride varnishes for preventing dental caries in children and adolescents. *Cochrane Database of Systematic Reviews, 2013*(7), Article CD002279. https://doi.org/10.1002/14651858.CD002279.pub2

Marsh, P. D. (1994). Microbial ecology of dental plaque and its significance in health and disease. *Advances in Dental Research, 8*(2), 263–271. https://doi.org/10.1177/08959374940080022001

Marsh, P. D. (2004). Dental plaque as a microbial biofilm. *Caries Research, 38*(3), 204–211. https://doi.org/10.1159/000077756

Moynihan, P. J., & Kelly, S. A. M. (2014). Effect on caries of restricting sugars intake: Systematic review to inform WHO guidelines. *Journal of Dental Research, 93*(1), 8–18. https://doi.org/10.1177/0022034513508954

Nascimento, M. M., & Burne, R. A. (2014). Caries prevention by arginine metabolism in oral biofilms: Translating science into clinical success. *Current Oral Health Reports, 1*(1), 79–85. https://doi.org/10.1007/s40496-013-0007-2

Peres, M. A., Macpherson, L. M. D., Weyant, R. J., Daly, B., Venturelli, R., Mathur, M. R., Listl, S., Celeste, R. K., Guarnizo-Herreño, C. C., Kearns, C., Benzian, H., Allison, P., & Watt, R. G. (2019). Oral diseases: A global public health challenge. *The Lancet, 394*(10194), 249–260. https://doi.org/10.1016/s0140-6736(19)31146-8

Pitts, N. B., Ismail, A. I., Martignon, S., Ekstrand, K., Douglas, G. V. A., & Longbottom, C. (2014). *ICCMS™ guide for practitioners and educators*. ICDAS Foundation. https://www.iccms-web.com/uploads/asset/592845add7ac8756944059.pdf

Pitts, N. B., Zero, D. T., Marsh, P. D., Ekstrand, K., Weintraub, J. A., Ramos-Gomez, F., Tagami, J., Twetman, S., Tsakos, G., & Ismail, A. I. (2017). Dental caries. *Nature Reviews Disease Primers, 3*, Article 17030. https://doi.org/10.1038/nrdp.2017.30

Riley, P., Moore, D., Ahmed, F., Sharif, M. O., & Worthington, H. V. (2015). Xylitol-containing products for preventing dental caries in children and adults. *Cochrane Database of Systematic Reviews, 2015*(3), Article CD010743. https://doi.org/10.1002/14651858.CD010743.pub2

Sälzer, S., Slot, D. E., Van der Weijden, F. A., & Dörfer, C. E. (2015). Efficacy of inter-dental mechanical plaque control in managing gingivitis—a meta-review. *Journal of Clinical Periodontology, 42*(Suppl 16), S92–S105. https://doi.org/10.1111/jcpe.12363

Schlagenhauf, U., Kunzelmann, K.-H., Hannig, C., May, T. W., Hösl, H., Gratza, M., Viergutz, G., Nazet, M., Schamberger, S., & Proff, P. (2019). Impact of a non-fluoridated microcrystalline hydroxyapatite dentifrice on enamel caries progression in highly caries-susceptible orthodontic patients: A randomized, controlled 6-month trial. *Journal of Investigative and Clinical Dentistry, 10*(2), Article e12399. https://doi.org/10.1111/jicd.12399

Schwendicke, F., Frencken, J. E., Bjørndal, L., Maltz, M., Manton, D. J., Ricketts, D., Van Landuyt, K., Banerjee, A., Campus, G., Doméjean, S., Fontana, M., Leal, S., Lo, E., Machiulskiene, V., Schulte, A., Splieth, C., Zandona, A. F., & Innes, N. P. T. (2016). Managing carious lesions: Consensus recommendations on carious tissue removal. *Advances in Dental Research, 28*(2), 58–67. https://doi.org/10.1177/0022034516639271

Sheiham, A., & James, W. P. T. (2014). A reappraisal of the quantitative relationship between sugar intake and dental caries: The need for new criteria for developing goals for sugar intake. *BMC Public Health, 14*, Article 863. https://doi.org/10.1186/1471-2458-14-863

Slayton, R. L., Urquhart, O., Araujo, M. W. B., Fontana, M., Guzmán-Armstrong, S., Nascimento, M. M., Nový, B. B., Tinanoff, N., Weyant, R. J., Wolff, M. S., Young, D. A., Zero, D. T., Tampi, M. P., Pilcher, L., Banfield, L., & Carrasco-Labra, A. (2018). Evidence-based clinical practice guideline on nonrestorative treatments for carious lesions: A report from the American Dental

Association. *Journal of the American Dental Association, 149*(10), 837–849.e19. https://doi.org/10.1016/j.adaj.2018.07.002

Takahashi, N., & Nyvad, B. (2011). The role of bacteria in the caries process: Ecological perspectives. *Journal of Dental Research, 90*(3), 294–303. https://doi.org/10.1177/0022034510379602

Tellez, M., Gomez, J., Pretty, I., Ellwood, R. P., & Ismail, A. I. (2013). Evidence on existing caries risk assessment systems: Are they predictive of future caries? *Community Dentistry and Oral Epidemiology, 41*(1), 67–78. https://doi.org/10.1111/cdoe.12003

Tonetti, M. S., Chapple, I. L. C., Jepsen, S., & Sanz, M. (2015). Primary and secondary prevention of periodontal and peri-implant diseases: Introduction to, and objectives of the 11th European Workshop on Periodontology consensus conference. *Journal of Clinical Periodontology*, *42*(Suppl 16), S1–S4. https://doi.org/10.1111/jcpe.12382

Toumba, K. J., Twetman, S., Splieth, C., Parnell, C., van Loveren, C., & Lygidakis, N. A. (2019). Guidelines on the use of fluoride for caries prevention in children: An updated EAPD policy document. *European Archives of Paediatric Dentistry*, *20*(6), 507–516. https://doi.org/10.1007/s40368-019-00464-2

Twetman, S. (2018). Prevention of dental caries as a non-communicable disease. *European Journal of Oral Sciences, 126*(Suppl 1), 19–25. https://doi.org/10.1111/eos.12528

Urquhart, O., Tampi, M. P., Pilcher, L., Slayton, R. L., Araujo, M. W. B., Fontana, M., Guzmán-Armstrong, S., Nascimento, M. M., Nový, B. B., Tinanoff, N., Weyant, R. J., Wolff, M. S., Young, D. A., Zero, D. T., Brignardello-Petersen, R., Banfield, L., Parikh, A., Joshi, G., & Carrasco-Labra, A. (2019). Nonrestorative treatments for caries: Systematic review and network meta-analysis. *Journal of*

Dental Research, 98(1), 14–26. https://doi.org/10.1177/0022034518800014

Walsh, T., Worthington, H. V., Glenny, A. M., Appelbe, P., Marinho, V. C. C., & Shi, X. (2010). Fluoride toothpastes of different concentrations for preventing dental caries in children and adolescents. *Cochrane Database of Systematic Reviews, 2010*(1), Article CD007868. https://doi.org/10.1002/14651858.CD007868.pub2

Weyant, R. J., Tracy, S. L., Anselmo, T. T., Beltrán-Aguilar, E. D., Donly, K. J., Frese, W. A., Hujoel, P. P., Iafolla, T., Kohn, W., Kumar, J., Levy, S. M., Tinanoff, N., Wright, J. T., Zero, D., Aravamudhan, K., Frantsve-Hawley, J., Meyer, D. M., & American Dental Association Council on Scientific Affairs Expert Panel on Topical Fluoride Caries Preventive Agents. (2013). Topical fluoride for caries prevention: Executive summary of the updated clinical recommendations and supporting systematic review. *Journal of the American Dental Association, 144*(11), 1279–1291. https://doi.org/10.14219/jada.archive.2013.0057

World Health Organization. (2015). *Guideline: Sugars intake for adults and children*. https://www.who.int/publications/i/item/9789241549028/

Wright, J. T., Crall, J. J., Fontana, M., Gillette, E. J., Nový, B. B., Dhar, V., Donly, K., Hewlett, E. R., Quinonez, R. B., Chaffin, J., Crespin, M., Iafolla, T., Siegal, M. D., Tampi, M. P., Graham, L., Estrich, C., & Carrasco-Labra, A. (2016). Evidence-based clinical practice guideline for the use of pit-and-fissure sealants: A report of the American Dental Association and the American Academy of Pediatric Dentistry. *Journal of the American Dental Association, 147*(8), 672–682.e12. https://doi.org/10.1016/j.adaj.2016.06.001

Wright, J. T., Tampi, M. P., Graham, L., Estrich, C., Crall, J. J., Fontana, M., Gillette, E. J., Nový, B. B., Dhar, V., Donly, K., Hewlett, E. R., Quinonez, R. B., Chaffin, J., Crespin, M., Iafolla, T., Siegal, M. D., & Carrasco-Labra, A. (2016). Sealants for preventing and arresting pit-and-fissure occlusal caries in primary and permanent molars. *Pediatric Dentistry, 38*(4), 282–308. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27557916/

Yaacob, M., Worthington, H. V., Deacon, S. A., Deery, C., Walmsley, A. D., Robinson, P. G., & Glenny, A. M. (2014). Powered versus manual toothbrushing for oral health. *Cochrane Database of Systematic Reviews, 2014*(6), Article CD002281. https://doi.org/10.1002/14651858.CD002281.pub3

BÖLÜM 2

MACHINE LEARNING-BASED DIAGNOSTIC APPROACHES IN RESTORATIVE DENTISTRY

EBRU YILMAZ[1]
ONUR AKKURT[2]

Introduction

Artificial intelligence (AI), including machine learning (ML) and deep learning (DL), has become increasingly relevant to dental diagnosis because it can process large imaging datasets, identify patterns, and support clinical decision-making (Carrillo-Perez et al., 2022; Gao et al., 2025; Najeeb & Islam, 2025). In restorative dentistry, these capabilities are particularly important for the early detection of caries, interpretation of radiographic and photographic data, tooth identification, and recognition of existing restorations (Carrillo-Perez et al., 2022; Najeeb & Islam, 2025).

Convolutional neural networks (CNNs) have driven many of the recent advances in dental image analysis by enabling automated classification, localization, and segmentation (Ahmed et al., 2021;

[1]Dr. Öğr. Üyesi, Pamukkale Üniversitesi, Diş Hekimliği Fakültesi, Restoratif Diş Tedavisi Anabilim Dalı, ORCID: 0000-0001-8793-3273

[2]Uzm. Dt., Pamukkale Üniversitesi, Diş Hekimliği Fakültesi, Restoratif Diş Tedavisi Anabilim Dalı, ORCID: 0009-0000-2010-1632

Schwendicke et al., 2019). Nevertheless, diagnostic performance remains dependent on dataset characteristics, image modality, annotation and reference standards, and validation using independent data (Schwendicke et al., 2019). This chapter focuses on machine learning-based diagnostic applications in restorative dentistry, including clinical decision support, caries detection, tooth detection and numbering, and restoration recognition.

Use of AI in Diagnosis and Treatment Planning

AI-related research in dental diagnosis has increased substantially in recent years (Allani et al., 2024). CNN-based approaches have become important tools in dental image analysis, particularly for classification, detection, and segmentation tasks (Schwendicke et al., 2019; Ahmed et al., 2021). Across dentistry, AI applications have also been investigated for diagnosis and treatment planning in several clinical fields (Carrillo-Perez et al., 2022; Allani et al., 2024).

AI-assisted tools can integrate and analyze different forms of clinical and imaging data, supporting more individualized assessment and treatment planning (Carrillo-Perez et al., 2022; Naeimi et al., 2024). Such applications may improve workflow efficiency and support clinical decision-making, although their outputs should remain subject to professional interpretation (Arjumand, 2024; Gao et al., 2025).

An AI-based program has been evaluated for articulating maxillary and mandibular intraoral scans in the maximum intercuspal position (MIP) and for correcting occlusal collisions in scans previously articulated at MIP. The software used to articulate or correct the scans significantly influenced the trueness and precision of the maxillomandibular relationship, with the AI-articulated scans demonstrating significantly better trueness and

precision than the non-corrected intraoral scanner group (Revilla-León et al., 2025).

ML-based models can identify patterns in imaging data that may support diagnosis and treatment planning (Carrillo-Perez et al., 2022; Asiri & Altuwalah, 2022). Earlier detection can facilitate timely intervention and potentially reduce the need for more invasive treatment (Batra & Reche, 2023). When combined with relevant clinical information, AI-based decision-support systems may contribute to more individualized treatment planning, but AI should complement rather than replace clinician judgment (Carrillo-Perez et al., 2022; Batra & Reche, 2023).

The integration of AI into dental clinical workflows may improve efficiency in patient management and administrative processes. AI-based systems can reduce routine workload through functions such as data entry, record-keeping, and appointment scheduling. AI-assisted communication tools, including chatbots and virtual assistants, can answer common patient queries, support appointment scheduling, and provide automated reminders (Batra & Reche, 2023). Data security and patient privacy should remain important considerations when AI systems are integrated into dental workflows (Batra & Reche, 2023; Gao et al., 2025).

Image preprocessing is an important component of AI-based caries analysis. Techniques such as noise reduction and contrast enhancement can improve image quality before subsequent segmentation, feature extraction, and classification (Anil et al., 2023). AI may then be used to identify subtle image features that can support diagnostic assessment, including features that may be difficult for the human eye to detect (Patil et al., 2022).

AI-based applications can make significant contributions to patient education focused on oral health and hygiene. These systems have the capacity to provide personalized information,

recommendations, and guidance by considering patients' dental records, habits, risk factors, and individual needs. Such personalized recommendations may increase the likelihood that patients follow preventive and oral health guidance (Batra & Reche, 2023).

AI systems can analyze large datasets and support diagnosis and treatment planning, but their recommendations should be interpreted in accordance with evidence-based clinical guidelines and professional judgment (Batra & Reche, 2023; Gao et al., 2025).

AI applications have been reported across multiple dental specialties, including restorative dentistry, prosthodontics, endodontics, orthodontics, and other areas of clinical dentistry. This broad range of applications indicates the potential for AI-based tools to support diagnosis and treatment planning across different dental specialties (Allani et al., 2024; Naeimi et al., 2024).

Use of AI for Dental Caries Detection

AI-based approaches have demonstrated promising performance in the detection and classification of dental caries and may support clinical decision-making (Khanagar et al., 2022; Batra & Reche, 2023). Some aspects of AI-based caries diagnosis discussed in this section were previously addressed by the authors in a conference proceedings paper (Akkurt et al., 2025).

Current AI applications for caries detection are largely based on machine learning and deep learning approaches applied to dental images (Khanagar et al., 2022; Moharrami et al., 2024). In particular, CNN-based models have been used for caries detection and classification on radiographs and oral photographs, while CNN-based segmentation approaches have also been investigated in dental imaging (Lee et al., 2018; Ahmed et al., 2021; Moharrami et al., 2024). Their performance, however, depends on factors such as image acquisition characteristics, dataset characteristics, annotation

and reference procedures, and the imaging modality used (Khanagar et al., 2022; Moharrami et al., 2024).

In image-based caries assessment, classification generally assigns an image or region to a predefined category, whereas detection combines classification with localization of the suspected lesion. Segmentation provides more detailed spatial information by delineating the lesion at the pixel level (Khan & Al-Habsi, 2020; Moharrami et al., 2024). These approaches have been investigated as diagnostic support tools for caries assessment and may enhance diagnostic performance in clinical practice (Khanagar et al., 2022).

AI and DL models have demonstrated promising accuracy and sensitivity in caries diagnosis through the analysis of radiographic and photographic images (Mertens et al., 2021; Zhang et al., 2022). CNN-based approaches have been successfully applied to intraoral photographs for caries detection and categorization and to bitewing radiographs for the detection of interproximal carious lesions (Kühnisch et al., 2022; Bayraktar & Ayan, 2022). These systems may provide useful diagnostic support by assisting clinicians in the detection of carious lesions (Mertens et al., 2021).

Recent studies have continued to demonstrate promising performance of CNN-based models in image-based caries detection. Kühnisch et al. (2022) developed a CNN-based approach for the detection and categorization of caries on intraoral photographs. Bayraktar and Ayan (2022) reported an overall accuracy of 94.59% for interproximal caries detection on digital bitewing radiographs. Hur et al. (2021) developed five ML models, including logistic regression, random forest, artificial neural network, support vector machine, and extreme gradient boosting, to predict distal caries in mandibular second molars associated with impacted third molars. The models showed comparable predictive performance, with AUROC values ranging from 0.88 to 0.89. Mao et al. (2021) evaluated transfer learning-based CNN models for caries and

restoration detection on bitewing radiographs, with the best-performing model achieving an accuracy of 90.30% for caries detection.

Esmaeilyfard et al. (2024) developed a CNN-based model for caries detection and classification using CBCT images. The model achieved an accuracy of 95.3%, sensitivity of 92.1%, and specificity of 96.3% in detecting caries and was also used to classify lesions according to their depth and type.

Beyond lesion classification, segmentation approaches have also been investigated to delineate carious regions more precisely (Wang et al., 2023). Lee et al. (2021) developed a U-Net-based CNN model for early caries detection on bitewing radiographs and reported that the use of AI-generated results as reference information improved clinicians' diagnostic sensitivity. Wang et al. (2023) proposed a semi-supervised approach for caries segmentation on panoramic radiographs using uncertainty-aware learning to improve the identification of ambiguous lesions and distinguish them from imaging artifacts.

Duong et al. (2021) developed a two-stage computational system for the detection and classification of occlusal caries using smartphone images of extracted teeth. The system achieved an accuracy of 87.39% in the detection stage, while the SVM classifier used in the classification stage achieved an accuracy of 88.76%.

Thanh et al. (2022) evaluated Faster R-CNN, YOLOv3, RetinaNet, and SSD models for caries detection using intraoral photographs obtained with a smartphone. For cavitated lesions, YOLOv3 showed a sensitivity of 74.0%, whereas Faster R-CNN achieved the highest accuracy of 87.4%. In contrast, sensitivity was considerably lower for visually non-cavitated lesions, reaching 36.9% with YOLOv3 and 23.4% with Faster R-CNN. These findings indicate that smartphone-based AI approaches may be more

effective for clearly cavitated lesions than for subtle non-cavitated changes.

Clinical studies have also investigated whether AI assistance improves dentists' diagnostic performance. In a randomized controlled trial, Mertens et al. (2021) reported a higher mean AUC for dentists using AI support than for those evaluating bitewing radiographs without AI assistance (0.89 vs. 0.85). The improvement was mainly attributable to increased sensitivity, particularly for enamel lesions, while specificity was not significantly affected. However, AI assistance was also associated with an increase in invasive treatment decisions.

Similarly, Devlin et al. (2021) evaluated the effect of AI assistance on the detection of enamel-only proximal caries in bitewing radiographs. Dentists identified 44.3% of carious lesions without AI support compared with 75.8% when AI assistance was used. Nevertheless, false-positive findings also increased, indicating that improvements in sensitivity should be interpreted alongside possible reductions in specificity.

Conventional radiographic methods have limitations in detecting early carious lesions, and early enamel lesions may be underestimated or remain radiographically occult (White & Pharoah, 2014). Comparative studies have also shown that conventional and direct digital radiographic methods may have comparable diagnostic accuracy for approximal caries, while all modalities may perform poorly in detecting enamel lesions (Castro et al., 2007). These limitations have encouraged the investigation of complementary optical imaging techniques for caries detection.

Optical imaging techniques have also been investigated in combination with AI-based methods for caries detection. Schwendicke et al. (2020) evaluated ResNet-18 and ResNeXt50 models for the detection of carious lesions in near-infrared light

transillumination (NILT) images. The best-performing model achieved an AUC of 0.74, with a sensitivity of 0.59 and specificity of 0.76.

Holtkamp et al. (2021) subsequently investigated the generalizability of CNN models trained on in vivo and in vitro NILT datasets. Models trained and tested on in vivo data achieved an accuracy of 0.78, compared with 0.64 for models trained and tested on in vitro data. Cross-dataset testing resulted in lower performance, emphasizing the importance of clinically representative training data.

AI has also been combined with optical coherence tomography (OCT). Salehi et al. (2019) developed a CNN-based approach for the analysis of dental caries using OCT images and reported a sensitivity of 98% and a specificity of 100% for distinguishing carious from non-carious tissue. Procházka et al. (2022) applied multilayer CNNs to dental reflectivity data and achieved classification accuracies of 98.1% and 94.4% for signal-domain and spectral-domain data, respectively.

Use of AI in Tooth Detection and Numbering Processes

Automatic labeling and identification of teeth may help reduce the incidence of incorrect dental treatments (Yüksel et al., 2021). A questionnaire study reported that 21.1% of participating dentists had experienced wrong-tooth extraction; leading reported causes included miscommunication and exhaustion of overworked dentists (Jan et al., 2019). In this context, the integration of AI algorithms with dental radiology may help overcome challenges encountered in clinical practice and contribute to more precise dental procedures (Yüksel et al., 2021). Consequently, the advancement and performance of AI models specifically designed for tooth detection and numbering on dento-maxillofacial images are of clinical importance. CNNs are widely used in dental image analysis

for tasks such as classification, detection, and identification (Nguyen et al., 2021). Tuzoff et al. (2019) developed an AI system that achieved performance comparable to experts in both tooth detection and numbering tasks. The system was able to correctly classify teeth in challenging situations, including severely decayed or impacted teeth, teeth with dental crowns, and cases with missing teeth. Error analyses revealed that both the AI model and clinicians encountered similar challenges during the tooth identification and numbering process, with errors associated with factors such as severe decay, prosthetic obstruction, root remnants, and missing neighboring teeth (Tuzoff et al., 2019). Another AI model proposed by Prados-Privado et al. (2021) demonstrated high performance, achieving 99.24% accuracy in tooth detection and 93.83% accuracy in tooth numbering. In that study, 8,000 panoramic radiographs were used. In a study using periapical radiographs, a Faster R-CNN-based algorithm achieved a sensitivity of 98.67%, a precision of 78.12%, and an F1 score of 87.20% for tooth detection and numbering (Görürgöz et al., 2022).

In one study, Kabir et al. (2022) reported high performance for tooth numbering using intraoral radiographs and panoramic images as reference data. The proposed system was able to assign tooth numbers with minimal error on periapical and bitewing images. However, the researchers noted that the model could not automatically correct incorrectly oriented intraoral radiographs, such as upside-down or mirrored images. They suggested that the system could be improved by using anatomical landmarks, such as the maxillary sinus and mental foramen, as reference points to reorient the images and ensure accurate tooth numbering. Mahdi et al. (2020) investigated Faster R-CNN models using ResNet-50 and ResNet-101 as backbone networks. The models demonstrated high performance in tooth recognition tasks, with ResNet-101 showing slightly higher performance than ResNet-50. Zhang et al. (2018)

proposed a label-tree and cascade CNN structure for detecting and classifying teeth on periapical radiographs. The method achieved high overall precision and recall and was designed to handle complex cases such as tooth loss and decayed teeth despite a relatively small training dataset.

Estai et al. (2022) proposed a three-stage CNN-based workflow for automated detection and numbering of permanent teeth on panoramic radiographs. U-Net was first used to segment tooth regions, Faster R-CNN then detected individual teeth, and VGG-16 classified each detected tooth into one of 32 categories for numbering. The system achieved high performance in both tooth detection and numbering tasks.

CBCT images may be affected by complex noise and metal artifacts, which can reduce the accuracy of automated tooth detection. Du et al. (2022) proposed a combined CNN- and YOLOv3-based approach for tooth detection on CBCT images. Compared with Faster R-CNN, the proposed method reduced training and prediction times by 80% and 62%, respectively, and achieved an Object Inclusion Ratio of 96.27%. The method also showed robust performance in images with severe noise and different patterns of missing teeth.

The mixed dentition period involves changes in occlusal relationships as the dentition develops from the primary to the permanent stage (da Silva & Gleiser, 2008). Accurate identification and numbering of primary and permanent teeth can support clinical documentation and treatment planning in children with mixed dentition (van Nistelrooij et al., 2025). In line with this need, AI-assisted tools developed for this purpose should be capable of distinguishing between primary and permanent teeth in children during the mixed dentition period. Previous studies have demonstrated that primary and permanent teeth can be accurately detected and numbered using DL-based approaches on panoramic

radiographs (Peker & Kurtoglu, 2025) and CBCT images (Ozudogru et al., 2025).

Kılıc et al. (2021) developed a Faster R-CNN Inception v2-based system for automatic detection and numbering of deciduous teeth on pediatric panoramic radiographs. The model achieved a sensitivity of 0.9804, precision of 0.9571, and an F1 score of 0.9686. Kaya et al. (2022) used YOLOv4 for automated detection and numbering of primary and permanent teeth on pediatric panoramic radiographs, achieving an mAP of 92.22%, mAR of 94.44%, and a weighted F1 score of 0.91. Yoon et al. (2024) used a cascaded R-CNN model to integrate tooth-number recognition and caries detection in full intraoral photographs. The findings demonstrated strong performance in tooth-number recognition. The results of these studies support the potential of AI-based approaches for tooth detection and numbering tasks.

Use of AI for Detection of Dental Restorations

Detecting different restoration types in dentistry may seem routine for experienced clinicians, but for less experienced practitioners it can be difficult to distinguish restorations, particularly tooth-colored ones, during visual examination (Tabatabaian et al., 2023). ML-based systems can assist in automatically identifying and classifying restorations in intraoral photographs and OPG images. Abdalla-Aslan et al. (2020) developed a machine-learning algorithm for the automatic detection and classification of dental restorations on panoramic radiographs. Restorations were segmented using a local adaptive threshold and classified into 11 categories based on features related to their shape and gray-level distribution. A cubic support vector machine with error-correcting output codes was used for multiclass classification. The algorithm detected 94.6% of the restorations and achieved an overall classification accuracy of 93.6%. The sensitivity for

detecting composite restorations was lower, at 83.1%, than that reported for some metallic restorations. In a study conducted by Engels et al. (2022), a trained DL-based CNN successfully identified dental restorations with diagnostic accuracies exceeding 90% across all evaluated restoration categories. The model was also able to distinguish different restorative materials in posterior teeth. Diagnostic accuracy was 92.9% for direct composite restorations and 99.4% for indirect gold restorations. Accordingly, relying solely on intraoral photographs may make tooth-colored restorations more difficult to identify. To reduce misclassification, complementary views or imaging modalities, including radiographs and digital scans, may be considered alongside intraoral photographic data (Takahashi et al., 2021).

Başaran et al. (2022) developed an AI-based system for diagnostic charting of ten different dental conditions on OPG images, including fillings and crowns. The model performance was evaluated using the Faster R-CNN Inception v2 framework, with sensitivity and precision values recorded at 0.86 and 0.87 for the filling class, and 0.96 and 0.86 for the crown class, respectively. Takahashi et al. (2021) developed a DL-based system using TensorFlow and Keras to identify 11 types of dental prostheses and restorations from intraoral photographs. More than 80% of metallic restorations were correctly recognized, whereas approximately 60% of tooth-colored restorations were detected. Karatas et al. (2021) evaluated a ResNet34-based CNN for differentiating amalgam, composite resin, and metal-ceramic restorations on bitewing and periapical radiographs. The model achieved AUC values of 0.95 for amalgam, 0.95 for composite resin, and 1.00 for metal-ceramic restorations, with an overall AUC of 0.97. In another study, CNN-based methods were used to detect restorations on bitewing images with high accuracy (Mao et al., 2021). Hamdan et al. (2023) aimed to develop, train, and evaluate a specialized model for segmenting

dental restorations on OPGs using a no-code computer vision platform. They noted that the main motivation for this approach was to eliminate the need for coding skills. This model demonstrated high detection performance, achieving pixel-level sensitivity of 86.64%, specificity of 99.78%, and accuracy of 99.63%, while at the tooth level, it reached sensitivity of 98.34%, specificity of 98.13%, and accuracy of 98.21%.

The results obtained from these studies collectively indicate the promising potential of AI for restoration detection in dentistry. However, AI models trained on larger and more diverse datasets, including intraoral photographs and radiographic images that cover a wider variety of restoration types, should be evaluated in more comprehensive studies to assess their accuracy and generalizability (Tabatabaian et al., 2023).

Challenges and Clinical Considerations

The clinical use of AI-assisted diagnostic systems requires careful attention to data privacy, algorithmic bias, data annotation quality, and generalizability. Models trained on limited or poorly annotated datasets may show reduced reliability and applicability across different clinical settings, devices, or patient populations (Gao et al., 2025; Arjumand, 2024). AI output should therefore be interpreted as decision support rather than as an autonomous replacement for professional judgment.

CONCLUSION

Machine learning-based systems show substantial potential to improve diagnostic consistency in restorative dentistry. Current evidence demonstrates promising applications in image-based caries detection, tooth localization and numbering, and automated recognition of restorations. However, differences in imaging protocols, datasets, reference standards, outcome measures, and validation strategies limit direct comparison among studies. Further

rigorous validation and clinically integrated research are required before these systems can be adopted reliably in routine practice.

Generative AI Use Statement: A generative AI-assisted tool was used for English-language editing and textual revisions. All scientific content and references were reviewed and verified by the authors, who take full responsibility for the final content.

References

Abdalla-Aslan, R., Yeshua, T., Kabla, D., Leichter, I., & Nadler, C. (2020). An artificial intelligence system using machine-learning for automatic detection and classification of dental restorations in panoramic radiography. Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology and Oral Radiology. 130(5), 593-602. https://doi.org/10.1016/j.oooo.2020.05.012

Ahmed, N., Abbasi, M. S., Zuberi, F., et al. (2021). Artificial intelligence techniques: analysis, application, and outcome in dentistry—a systematic review. BioMed Research International. 2021, 9751564. https://doi.org/10.1155/2021/9751564

Akkurt, O., Yılmaz, E., & Akgül, N. (2025). Yapay zekanın diş çürüğü tanısında kullanımı: Bir literatür derlemesi. In S. U. Yurdalan (Ed.), IV. International Scientific Compilation Research Congress: The Proceedings Book (pp. 440-449). Liberty Publishing House.

Allani, H., Santos, A. T., & Ribeiro-Vidal, H. (2024). Multidisciplinary applications of AI in dentistry: bibliometric review. Applied Sciences. 14(17), 7624. https://doi.org/10.3390/app14177624

Anil, S., Porwal, P., & Porwal, A. (2023). Transforming dental caries diagnosis through artificial intelligence-based techniques. Cureus. 15(7), e41694. https://doi.org/10.7759/cureus.41694

Arjumand, B. (2024). The application of artificial intelligence in restorative dentistry: A narrative review of current research. The Saudi Dental Journal. 36(6), 835-840. https://doi.org/10.1016/j.sdentj.2024.03.017

Asiri, A. F., & Altuwalah, A. S. (2022). The role of neural artificial intelligence for diagnosis and treatment planning in

endodontics: A qualitative review. The Saudi Dental Journal. 34(4), 270-281. https://doi.org/10.1016/j.sdentj.2022.04.004

Başaran, M., Çelik, Ö., Bayrakdar, I. S., et al. (2022). Diagnostic charting of panoramic radiography using deep-learning artificial intelligence system. Oral Radiology. 38(3), 363-369. https://doi.org/10.1007/s11282-021-00572-0

Batra, A. M., & Reche, A. (2023). A new era of dental care: harnessing artificial intelligence for better diagnosis and treatment. Cureus. 15(11), e49319. https://doi.org/10.7759/cureus.49319

Bayraktar, Y., & Ayan, E. (2022). Diagnosis of interproximal caries lesions with deep convolutional neural network in digital bitewing radiographs. Clinical Oral Investigations. 26(1), 623-632. https://doi.org/10.1007/s00784-021-04040-1

Carrillo-Perez, F., Pecho, O. E., Morales, J. C., et al. (2022). Applications of artificial intelligence in dentistry: A comprehensive review. Journal of Esthetic and Restorative Dentistry. 34(1), 259-280. https://doi.org/10.1111/jerd.12844

Castro, V. M., Katz, J. O., Hardman, P. K., Glaros, A., & Spencer, P. (2007). In vitro comparison of conventional film and direct digital imaging in the detection of approximal caries. Dentomaxillofacial Radiology. 36(3), 138-142. https://doi.org/10.1259/dmfr/15558921

da Silva, L. P. M., & Gleiser, R. (2008). Occlusal development between primary and mixed dentitions: a 5-year longitudinal study. Journal of Dentistry for Children. 75(3), 287-294.

Devlin, H., Williams, T., Graham, J., & Ashley, M. (2021). The ADEPT study: a comparative study of dentists' ability to detect enamel-only proximal caries in bitewing radiographs with and without the use of AssistDent artificial intelligence software.

British Dental Journal. 231(8), 481-485. https://doi.org/10.1038/s41415-021-3526-6

Du, M., Wu, X., Ye, Y., et al. (2022). A combined approach for accurate and accelerated teeth detection on cone beam CT images. Diagnostics. 12(7), 1679. https://doi.org/10.3390/diagnostics12071679

Duong, D. L., Nguyen, Q. D. N., Tong, M. S., et al. (2021). Proof-of-concept study on an automatic computational system in detecting and classifying occlusal caries lesions from smartphone color images of unrestored extracted teeth. Diagnostics. 11(7), 1136. https://doi.org/10.3390/diagnostics11071136

Engels, P., Meyer, O., Schönewolf, J., et al. (2022). Automated detection of posterior restorations in permanent teeth using artificial intelligence on intraoral photographs. Journal of Dentistry. 121, 104124. https://doi.org/10.1016/j.jdent.2022.104124

Esmaeilyfard, R., Bonyadifard, H., & Paknahad, M. (2024). Dental caries detection and classification in CBCT images using deep learning. International Dental Journal. 74(2), 328-334. https://doi.org/10.1016/j.identj.2023.10.003

Estai, M., Tennant, M., Gebauer, D., et al. (2022). Deep learning for automated detection and numbering of permanent teeth on panoramic images. Dentomaxillofacial Radiology. 51(2), 20210296. https://doi.org/10.1259/dmfr.20210296

Gao, S., Wang, X., Xia, Z., et al. (2025). Artificial intelligence in dentistry: A narrative review of diagnostic and therapeutic applications. Medical Science Monitor. 31, e946676. https://doi.org/10.12659/MSM.946676

Görürgöz, C., Orhan, K., Bayrakdar, I. S., et al. (2022). Performance of a convolutional neural network algorithm for tooth detection and numbering on periapical radiographs. Dentomaxillofacial Radiology. 51(3), 20210246. https://doi.org/10.1259/dmfr.20210246

Hamdan, M., Badr, Z., Bjork, J., et al. (2023). Detection of dental restorations using no-code artificial intelligence. Journal of Dentistry. 139, 104768. https://doi.org/10.1016/j.jdent.2023.104768

Holtkamp, A., Elhennawy, K., Cejudo, G. O. J. E., et al. (2021). Generalizability of deep learning models for caries detection in near-infrared light transillumination images. Journal of Clinical Medicine. 10(5), 961. https://doi.org/10.3390/jcm10050961

Hur, S. H., Lee, E. Y., Kim, M. K., et al. (2021). Machine learning to predict distal caries in mandibular second molars associated with impacted third molars. Scientific Reports. 11(1), 15447. https://doi.org/10.1038/s41598-021-95024-4

Jan, A., Albenayan, R., Alsharkawi, D., & Jadu, F. (2019). The prevalence and causes of wrong tooth extraction. Nigerian Journal of Clinical Practice. 22(12), 1706-1714. https://doi.org/10.4103/njcp.njcp_206_19

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. https://doi.org/10.1186/s12903-022-02514-6

Karatas, O., Cakir, N. N., Ozsariyildiz, S. S., et al. (2021). A deep learning approach to dental restoration classification from bitewing and periapical radiographs. Quintessence International. 52(7), 568-574. https://doi.org/10.3290/j.qi.b1244461

Kaya, E., Gunec, H. G., Gokyay, S. S., et al. (2022). Proposing a CNN method for primary and permanent tooth detection and enumeration on pediatric dental radiographs. Journal of Clinical Pediatric Dentistry. 46(4), 293-298. https://doi.org/10.22514/1053-4625-46.4.6

Khan, A. I., & Al-Habsi, S. (2020). Machine learning in computer vision. Procedia Computer Science. 167, 1444-1451. https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.03.355

Khanagar, S. B., Alfouzan, K., Awawdeh, M., et al. (2022). Application and performance of artificial intelligence technology in detection, diagnosis and prediction of dental caries (DC)—a systematic review. Diagnostics. 12(5), 1083. https://doi.org/10.3390/diagnostics12051083

Kılıc, M. C., Bayrakdar, I. S., Çelik, Ö., et al. (2021). Artificial intelligence system for automatic deciduous tooth detection and numbering in panoramic radiographs. Dentomaxillofacial Radiology. 50(6), 20200172. https://doi.org/10.1259/dmfr.20200172

Kühnisch, J., Meyer, O., Hesenius, M., Hickel, R., & Gruhn, V. (2022). Caries detection on intraoral images using artificial intelligence. Journal of Dental Research. 101(2), 158-165. https://doi.org/10.1177/00220345211032524

Lee, J. H., Kim, D. H., Jeong, S. N., & Choi, S. H. (2018). Detection and diagnosis of dental caries using a deep learning-based convolutional neural network algorithm. Journal of Dentistry. 77, 106-111. https://doi.org/10.1016/j.jdent.2018.07.015

Lee, S., Oh, S., Jo, J., et al. (2021). Deep learning for early dental caries detection in bitewing radiographs. Scientific Reports. 11(1), 16807. https://doi.org/10.1038/s41598-021-96368-7

Mahdi, F. P., Motoki, K., & Kobashi, S. (2020). Optimization technique combined with deep learning method for teeth recognition in dental panoramic radiographs. Scientific Reports. 10(1), 19261. https://doi.org/10.1038/s41598-020-75887-9

Mao, Y. C., Chen, T. Y., Chou, H. S., et al. (2021). Caries and restoration detection using bitewing film based on transfer learning with CNNs. Sensors. 21(13), 4613. https://doi.org/10.3390/s21134613

Mertens, S., Krois, J., Cantu, A. G., Arsiwala, L. T., & Schwendicke, F. (2021). Artificial intelligence for caries detection: randomized trial. Journal of Dentistry. 115, 103849. https://doi.org/10.1016/j.jdent.2021.103849

Moharrami, M., Farmer, J., Singhal, S., et al. (2024). Detecting dental caries on oral photographs using artificial intelligence: A systematic review. Oral Diseases. 30(4), 1765-1783. https://doi.org/10.1111/odi.14659

Naeimi, S. M., Darvish, S., Salman, B. N., & Luchian, I. (2024). Artificial Intelligence in Adult and Pediatric Dentistry: A Narrative Review. Bioengineering. 11(5), 431. https://doi.org/10.3390/bioengineering11050431

Najeeb, M., & Islam, S. (2025). Artificial intelligence (AI) in restorative dentistry: Current trends and future prospects. BMC Oral Health. 25(1), 592. https://doi.org/10.1186/s12903-025-05989-1

Nguyen, T. T., Larrivée, N., Lee, A., Bilaniuk, O., & Durand, R. (2021). Use of artificial intelligence in dentistry: current clinical trends and research advances. Journal of the Canadian Dental Association. 87, l7.

Ozudogru, S., Gulsen, E., Mahyaddinova, T., et al. (2025). Artificial intelligence system for automatic tooth detection and numbering

in the mixed dentition in CBCT. European Journal of Paediatric Dentistry. 26(2), 140-146. https://doi.org/10.23804/ejpd.2025.2292

Patil, S., Albogami, S., Hosmani, J., et al. (2022). Artificial intelligence in the diagnosis of oral diseases: applications and pitfalls. Diagnostics. 12(5), 1029. https://doi.org/10.3390/diagnostics12051029

Peker, R. B., & Kurtoglu, C. O. (2025). Evaluation of the Performance of a YOLOv10-Based Deep Learning Model for Tooth Detection and Numbering on Panoramic Radiographs of Patients in the Mixed Dentition Period. Diagnostics. 15(4), 405. https://doi.org/10.3390/diagnostics15040405

Prados-Privado, M., García, V. J., Blázquez, T. A., Martínez-Martínez, C. H., & Ivorra, C. (2021). A convolutional neural network for automatic tooth numbering in panoramic images. BioMed Research International. 2021, 3625386. https://doi.org/10.1155/2021/3625386

Procházka, A., Charvát, J., Vyšata, O., & Mandic, D. (2022). Incremental deep learning for reflectivity data recognition in stomatology. Neural Computing and Applications. 34(9), 7081-7089. https://doi.org/10.1007/s00521-021-06842-6

Revilla-León, M., Gómez-Polo, M., Barmak, A. B., Kois, J. C., & Pérez-Barquero, J. A. (2025). Accuracy of an artificial intelligence-based program for locating the maxillomandibular relationship of scans acquired by using intraoral scanners. The Journal of Prosthetic Dentistry. 134(3), 809-817. https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2024.01.023

Salehi, H. S., Mahdian, M., Murshid, M. M., Judex, S., & Tadinada, A. (2019). Deep learning-based quantitative analysis of dental caries using optical coherence tomography: An ex vivo study.

In D. Fried & P. Rechmann (Eds.), Lasers in Dentistry XXV (Vol. 10857, Article 108570H). SPIE. https://doi.org/10.1117/12.2510076

Schwendicke, F., Golla, T., Dreher, M., & Krois, J. (2019). Convolutional neural networks for dental image diagnostics: A scoping review. Journal of Dentistry. 91, 103226. https://doi.org/10.1016/j.jdent.2019.103226

Schwendicke, F., Elhennawy, K., Paris, S., Friebertshäuser, P., & Krois, J. (2020). Deep learning for caries lesion detection in near-infrared light transillumination images: A pilot study. Journal of Dentistry. 92, 103260. https://doi.org/10.1016/j.jdent.2019.103260

Tabatabaian, F., Vora, S. R., & Mirabbasi, S. (2023). Applications, functions, and accuracy of artificial intelligence in restorative dentistry: A literature review. Journal of Esthetic and Restorative Dentistry. 35(6), 842-859. https://doi.org/10.1111/jerd.13079

Takahashi, T., Nozaki, K., Gonda, T., Mameno, T., & Ikebe, K. (2021). Deep learning-based detection of dental prostheses and restorations. Scientific Reports. 11(1), 1960. https://doi.org/10.1038/s41598-021-81202-x

Thanh, M. T. G., Van, T. N., Ngoc, V. T. N., et al. (2022). Deep learning application in dental caries detection using intraoral photos taken by smartphones. Applied Sciences. 12(11), 5504. https://doi.org/10.3390/app12115504

Tuzoff, D. V., Tuzova, L. N., Bornstein, M. M., et al. (2019). Tooth detection and numbering in panoramic radiographs using convolutional neural networks. Dentomaxillofacial Radiology. 48(4), 20180051. https://doi.org/10.1259/dmfr.20180051

van Nistelrooij, N., de Medeiros Maia, H. C., Cao, L., et al. (2025). Automated detection and numbering of primary and permanent teeth in digital impressions of children using artificial intelligence. Journal of Dentistry. 161, 105976. https://doi.org/10.1016/j.jdent.2025.105976

Wang, X., Gao, S., Jiang, K., et al. (2023). Multi-level uncertainty aware learning for semi-supervised dental panoramic caries segmentation. Neurocomputing. 540, 126208. https://doi.org/10.1016/j.neucom.2023.03.069

White, S. C., & Pharoah, M. J. (2014). Oral radiology: Principles and interpretation (7th ed.). Elsevier Mosby.

Yoon, K., Jeong, H. M., Kim, J. W., Park, J. H., & Choi, J. (2024). AI-based dental caries and tooth number detection in intraoral photos: Model development and performance evaluation. Journal of Dentistry. 141, 104821. https://doi.org/10.1016/j.jdent.2023.104821

Yüksel, A. E., Gültekin, S., Simsar, E., et al. (2021). Dental enumeration and multiple treatment detection on panoramic X-rays using deep learning. Scientific Reports. 11(1), 12342. https://doi.org/10.1038/s41598-021-90386-1

Zhang, K., Wu, J., Chen, H., & Lyu, P. (2018). An effective teeth recognition method using label tree with cascade network structure. Computerized Medical Imaging and Graphics. 68, 61-70. https://doi.org/10.1016/j.compmedimag.2018.07.001

Zhang, X., Liang, Y., Li, W., et al. (2022). Development and evaluation of deep learning for screening dental caries from oral photographs. Oral Diseases. 28(1), 173-181. https://doi.org/10.1111/odi.13735

BÖLÜM 3

BEYAZ NOKTA LEZYONLARININ MİNİMAL İNVAZİV YÖNETİMİ

MERVE GÜLDİBİ[1]

Giriş

Beyaz nokta lezyonları (BNL), mine yüzeyinde tebeşir beyazı, mat ve opak alanlar olarak izlenen, histolojik olarak yüzey altı demineralizasyonunu yansıtan ve diş çürüğü sürecinin kavitasyon öncesi evresini temsil eden lezyonlardır (Kidd & Fejerskov, 2004; Pitts et al., 2017). Lezyonun yüzeyindeki mine tabakası çoğunlukla bütünlüğünü korurken mineral kaybı yüzeyin hemen altındaki gövde bölgesinde yoğunlaşır (Robinson et al., 2000).

BNL, sabit ortodontik tedavi gören hastaların yaklaşık yarısı ile üçte ikisinde gelişebilir (Gorelick et al., 1982; Julien et al., 2013). Ortodontik tedavi dışında yetersiz ağız hijyeni, sık fermente karbonhidrat tüketimi, azalmış tükürük akışı ve yetersiz florür maruziyeti de riski artırır (Featherstone, 2004).

Çürüğün biyofilm aracılı, dinamik ve kontrol edilebilir doğasının anlaşılması, operatif-restoratif yaklaşımdan hastalık

[1] Araştırma Görevlisi, Necmettin Erbakan Üniversitesi Diş Hekimliği, Restoratif Diş Tedavisi Anabilim Dalı, Orcid: 0009-0000-9360-5479

kontrolü ve diş dokusunun korunmasına yönelik stratejilere geçişi sağlamıştır. Bu çerçevede BNL yönetimi, hastalık aktivitesinin kontrolünü, remineralizasyonun desteklenmesini ve gerektiğinde en az doku kaybıyla estetik iyileşmeyi hedefler (Featherstone, 2004; Frencken et al., 2012; Murdoch-Kinch & McLean, 2003; Borges et al., 2017).

Bu bölümde BNL'lerin patogenezi, tanı ve evreleme ilkeleri, ayırıcı tanı, non-invaziv ve mikro-invaziv seçenekler, minimal invaziv restoratif yaklaşımlar ile klinik takip esasları güncel literatür ışığında ele alınmıştır.

Beyaz Nokta Lezyonlarının Patogenezi ve Klinik Görünümü

Çürük, koruyucu (tükürük, florür, kalsiyum ve fosfat iyonları) ve patolojik faktörler (asidojenik bakteriler, fermente karbonhidratlar, azalmış tükürük akışı) arasındaki dengeye bağlı dinamik bir süreçtir. BNL, bu dengenin patolojik faktörler lehine bozulduğu, henüz kavitasyon gelişmemiş evreyi temsil eder (Featherstone 2004).

Mineral kaybı yüzey altında yoğunlaşırken görece sağlam yüzey tabakası korunur (Robinson et al., 2000). Lezyon gözeneklerinde artan ışık saçılması opak beyaz görünümü oluşturur; kurutmayla suyun yerini hava alması bu görünümü belirginleştirir (Fejerskov et al., 2015).

Klinik Tanı, Aktivite Değerlendirmesi ve Evreleme

BNL tanısı, temizlenmiş yüzeylerin iyi aydınlatma ve izolasyon altında, önce ıslak ardından yaklaşık beş saniye kurutularak görsel-dokunsal değerlendirilmesine dayanır (Ismail et al., 2007; Pitts & Ekstrand, 2013). Düz yüzey lezyonlarında radyografik duyarlılık sınırlıdır; standart fotoğraflar ve floresans temelli yöntemler izlemeyi destekler (Gomez, 2015).

Uluslararası Çürük Tespit ve Değerlendirme Sistemi (ICDAS), lezyonları görsel bulgulara göre evreler (Ismail et al., 2007). Sistemin klinik karar sürecine entegre edilmiş hâli olan Uluslararası Çürük Sınıflandırma ve Yönetim Sistemi (ICCMS) ise risk değerlendirmesi, lezyon tespiti, bakım planlaması ve koruyucu bakım basamaklarını birleştirir. Kavitasyonsuz BNL'ler genellikle ICDAS 1–2 ile uyumludur; kod 3 lokalize mine yıkımını belirtir (Pitts & Ekstrand, 2013), (Tablo 1).

Tablo 1. ICDAS kodlarına göre lezyonların klinik tanımı ve yönetim yönelimi

ICDAS kodu	**Klinik tanım**	**Yönetim yönelimi**
1	Uzun süreli (yaklaşık 5 sn) kurutmadan sonra görülen, ıslak yüzeyde seçilemeyen ilk mine değişikliği	Non-invaziv: biyofilm kontrolü, florür, izleme
2	Islak yüzeyde de seçilebilen belirgin mine değişikliği (beyaz veya kahverengi)	Non-invaziv; estetik talep varsa mikro-invaziv seçenekler
3	Dentin tutulumuna ait klinik bulgu olmaksızın lokalize mine yıkımı	Aktivite ve derinliğe göre mikro-invaziv veya koruyucu restoratif yaklaşım
4–6	Dentinden yansıyan gölge (4); görünür dentinli kavite (5); yaygın kavite (6)	Derinliğe ve semptoma göre minimal invaziv restoratif tedavi

Kaynak: (Ismail et al., 2007; Pitts & Ekstrand, 2013)

Ayırıcı Tanı

Beyaz opasiteler her zaman çürük kaynaklı değildir. Florozis, molar-kesici hipomineralizasyonu (MIH), mine hipoplazisi ve amelogenezis imperfekta gibi gelişimsel mine bozuklukları da benzer bir görünüm sergileyebilir (Fejerskov et al., 2015; Lygidakis et al., 2010), (Tablo 2).

Tablo 2. Beyaz nokta lezyonu, florozis ve MIH opasitesinin ayırıcı özellikleri

Özellik	Beyaz nokta lezyonu	Florozis	MIH opasitesi
Dağılım	Plak birikim bölgelerinde; braket çevresi ve dişeti kenarı	Çok sayıda dişte, genellikle simetrik	Birinci molarlar ve kesiciler; çoğunlukla asimetrik
Sınır	Düzensiz; plak birikim alanını izler	Belirsiz, bulutsu veya ince çizgisel	Net sınırlı
Renk	Mat, tebeşir beyazı; kuruyunca belirginleşir	Beyaz çizgiler veya bulutsu opasite	Beyaz, krem, sarı veya kahverengi
Yüzey	Aktifse pürüzlü; inaktifse sert ve parlak	Hafif formlarda genellikle sürekli ve sert	Mine kırılgan olabilir; erüpsiyon sonrası kayıp görülebilir
Etiyoloji	Biyofilm birikimi, diyet, ortodontik apareyler	Diş gelişimi sırasında aşırı florür maruziyeti	Diş gelişimi döneminde sistemik etkenler; çok faktörlü

Kaynak: (Fejerskov et al., 2015; Lygidakis et al., 2010)

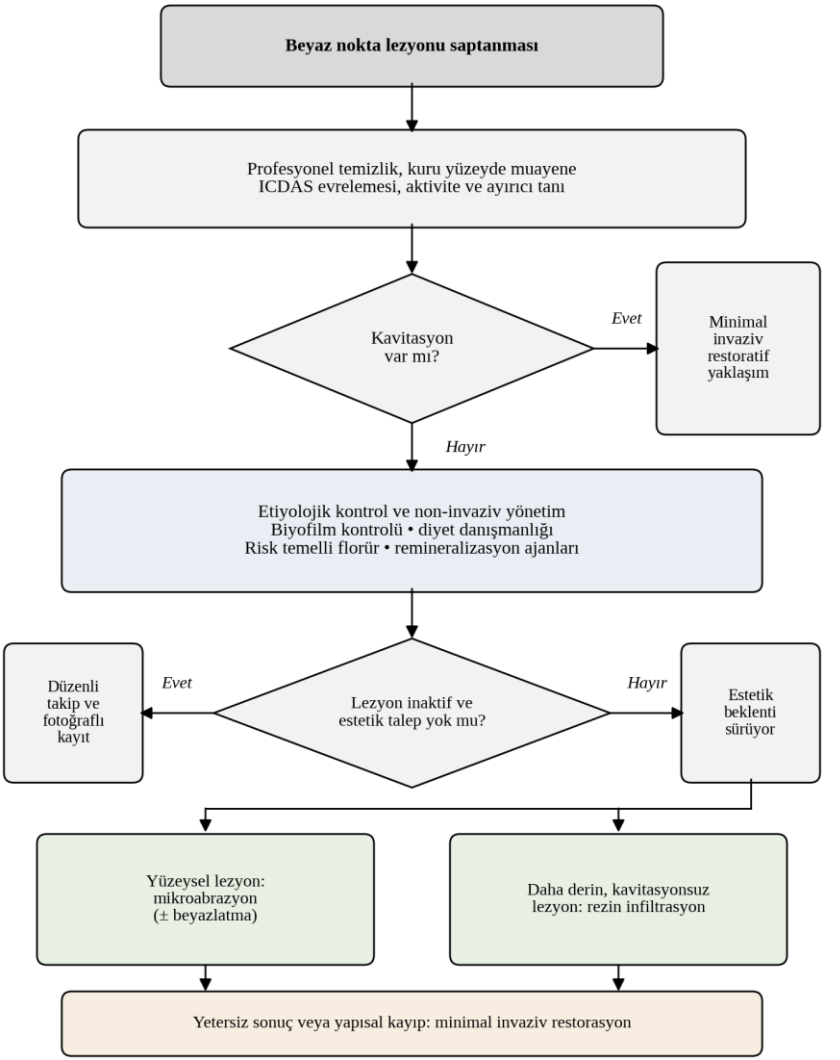
Minimal İnvaziv Yönetim Felsefesi ve Karar Verme

Minimal invaziv diş hekimliği; erken tanı, risk değerlendirmesi, remineralizasyon, doku koruyucu restorasyon ve mevcut restorasyonların onarımını esas alır (Murdoch-Kinch & McLean, 2003). Restoratif aşamaya gelindiğinde ise seçici çürük uzaklaştırılması ve konservatif preparasyon önerilir (Banerjee et al., 2017).

BNL yönetimi dört basamakta ele alınabilir: biyofilm ve diyet kontrolü; florür ve diğer ajanlarla lezyonun durdurulması ve remineralizasyonun desteklenmesi; estetik yakınma sürüyorsa mikroabrazyon veya rezin infiltrasyon; kavitasyon ya da yetersiz sonuç durumunda minimal invaziv restorasyon (Murdoch-Kinch &

McLean, 2003; Pitts & Ekstrand, 2013). Bu akış, Şekil 1'de özetlenen karar algoritmasıyla gösterilmiştir.

Şekil 1. Beyaz nokta lezyonlarında minimal invaziv karar algoritması



Kaynak: (Murdoch-Kinch & McLean, 2003; Pitts & Ekstrand, 2013)

Biyofilm Kontrolü ve Risk Temelli Önlemler

BNL yönetimi, hastaya özgü risklerin kontrolüne dayanır. Ağız hijyeni, plak birikimi, şeker tüketiminin miktarı ve sıklığı, florür maruziyeti, tükürük akışı, ilaç kullanımı ve plak tutucu apareyler değerlendirilmelidir (Pitts & Ekstrand, 2013):

Florür, non-invaziv yönetimin merkezinde yer alır. Florürlü diş macunlarına ilişkin Cochrane derlemesi, florür konsantrasyonu arttıkça çürük önleyici etkinin de arttığını göstermiştir (Walsh et al., 2019). Florürlü vernik uygulamalarının çocuklarda ve ergenlerde süt ve sürekli dişlerde çürük gelişimini azalttığı bildirilmektedir (Marinho et al., 2013).

Remineralizasyon Stratejileri

Florür, mineral kaybını azaltır, mineral çökelmesini destekler ve asit çözünürlüğünü düşürür (ten Cate & Featherstone, 1991). Ancak yüksek konsantrasyonların yüzey remineralizasyonunu hızlandırarak lezyon gövdesine iyon geçişini sınırlayabileceği ileri sürülmüştür (Fejerskov et al., 2015).

Florür dışında kazein fosfopeptid–amorf kalsiyum fosfat (CPP-ACP), kendiliğinden birleşen peptid P11-4, biyoaktif cam ve nano-hidroksiapatit içeren ürünler gibi çeşitli remineralizasyon sistemleri geliştirilmiştir (Philip, 2019). Kazein fosfopeptidleriyle stabilize edilmiş kalsiyum fosfat çözeltilerinin yüzey altı mine lezyonlarında remineralizasyonu artırdığı laboratuvar çalışmalarında gösterilmiştir (Reynolds, 1997). Kendiliğinden birleşen peptid P11-4 ise lezyon gövdesinde biyomimetik bir iskelet oluşturarak mineral çökelmesini yönlendirmeyi amaçlar (Kind et al., 2017).

Mikroabrazyon ve Beyazlatma

Mikroabrazyon, asit ve aşındırıcı partiküllerle yüzeyel minenin kontrollü uzaklaştırılmasıdır. Sığ lezyonlarda görünümü

iyileştirebilir; ancak mine kaybı geri döndürülemez ve derin lezyonlarda etkinliği sınırlıdır(Pini et al., 2015). Beyazlatma, çevre mineyi açarak lezyon ile komşu mine arasındaki kontrastı azaltabilir. Dış beyazlatma, çevre mineyi açarak lezyonla kontrastı azaltabilir; ancak remineralizasyon sağlamaz. BNL'lerde etkinliğine ilişkin kanıt sınırlı olduğundan tamamlayıcı bir seçenek olarak değerlendirilebilir (Gizani et al., 2020).

Rezin İnfiltrasyon

Rezin infiltrasyon, yüzey tabakasının hidroklorik asitle aşındırılmasının ardından düşük viskoziteli reçinenin lezyon gözeneklerine kapiller kuvvetlerle nüfuz ederek ışıkla polimerize edildiği mikro-invaziv bir tekniktir. Reçine difüzyon yollarını tıkayarak lezyonu stabilize eder; kırılma indisinin sağlam mineye yakınlığı sayesinde ışık saçılmasını azaltarak beyaz görünümü maskeler. Yöntem, yüzey bütünlüğü korunmuş kavitasyonsuz lezyonlarda uygundur. Derin lezyonlarda penetrasyon ve estetik başarı sınırlanabilir; etkili nem kontrolü gerektirir ve asitle yüzey uzaklaştırılması geri döndürülemezdir (Paris et al., 2007; Borges et al., 2017; Kim et al., 2011).

Restoratif Yaklaşımlar ve Yöntemlerin Karşılaştırılması

BNL yönetiminde biyofilm kontrolü ve florür temel yaklaşımı oluştururken diğer remineralizasyon ajanları ek destek sağlar; ancak estetik sonuçlar ve klinik kanıtlar sınırlıdır. Mikroabrazyon sığ, inaktif lezyonlarda; rezin infiltrasyon kavitasyonsuz lezyonların maskelenmesi ve stabilizasyonunda kullanılır. Her iki yöntemde de derinlik başarıyı sınırlar ve işlem geri döndürülemezdir; infiltrasyon ayrıca teknik duyarlılık gösterir. Kavitasyon, yapısal kayıp veya yetersiz sonuç durumunda minimal invaziv restorasyon değerlendirilir; doku kaybı ve ileride yenileme gereksinimi dikkate alınmalıdır (Banerjee et al., 2017).

Klinik Takip, Hasta İletişimi ve Prognoz

BNL takibi çürük riskine göre planlanmalı, yüksek riskli hastalar daha sık değerlendirilmelidir. Prognoz; lezyon derinliği, aktivitesi ve hasta uyumuna bağlıdır. Etiyolojik kontrol ve düzenli takip, lezyonların durdurulmasını ve restoratif müdahale gereksiniminin azaltılmasını destekler (Pitts & Ekstrand, 2013; Fejerskov et al., 2015; Pitts et al., 2017).

Sonuç

Beyaz nokta lezyonları, çürük sürecinin geri döndürülebilir erken evresini temsil eder ve yönetimi, hastalığın biyolojik temelinin dikkate alındığı, doku koruyucu bir yaklaşımı gerektirir. Tanı aşamasında lezyonun evresi ve aktivitesi doğru belirlenmeli, gelişimsel opasitelerden ayırt edilmelidir. Tedavinin temelini biyofilm kontrolü, diyet danışmanlığı ve risk temelli florür uygulaması oluşturur; diğer remineralizasyon ajanlarına ilişkin kanıt ise henüz sınırlıdır.

Estetik yakınmanın sürdüğü olgularda mikroabrazyon ve özellikle rezin infiltrasyon, minimal doku kaybıyla görünümü iyileştirebilen seçeneklerdir; ancak her ikisi de etiyolojik kontrolün yerine geçmez. Restoratif tedavi, kavitasyon veya yetersiz sonuç durumunda başvurulacak son basamak olarak kalmalıdır. Yöntem seçiminde lezyon derinliği ve aktivitesi, hastanın çürük riski ve beklentileri birlikte değerlendirilmeli; tedavi sonrası düzenli bir takip planı oluşturulmalıdır. Rezin infiltrasyon ve yeni remineralizasyon sistemleri için uzun dönemli ve yüksek nitelikli klinik çalışmalara duyulan gereksinim sürmektedir.

Kaynakça

Banerjee, A., Frencken, J. E., Schwendicke, F., & Innes, N. P. (2017). Contemporary operative caries management: Consensus recommendations on minimally invasive caries removal. *British Dental Journal, 223*(3), 215–222. doi:10.1038/sj.bdj.2017.672

Borges, A. B., Caneppele, T. M., Masterson, D., & Maia, L. C. (2017). Is resin infiltration an effective esthetic treatment for enamel development defects and white spot lesions? A systematic review. *Journal of Dentistry, 56*, 11–18. doi:10.1016/j.jdent.2016.10.010

Featherstone, J. D. (2004). The continuum of dental caries—Evidence for a dynamic disease process. *Journal of Dental Research, 83*(Spec Iss C), C39–C42. doi:10.1177/154405910408301s08

Fejerskov, O., Nyvad, B., & Kidd, E. (Eds.). (2015). *Dental caries: The disease and its clinical management* (3rd ed.). Wiley Blackwell.

Frencken, J. E., Peters, M. C., Manton, D. J., Leal, S. C., Gordan, V. V., & Eden, E. (2012). Minimal intervention dentistry for managing dental caries – A review: Report of a FDI task group. *International Dental Journal, 62*(5), 223–243. doi:10.1111/idj.12007

Gizani, S., Kloukos, D., Papadimitriou, A., Roumani, T., & Twetman, S. (2020). Is bleaching effective in managing post-orthodontic white-spot lesions? A systematic review. *Oral Health & Preventive Dentistry, 18*(1), 2–10. https://doi.org/10.3290/j.ohpd.a44113

Gomez, J. (2015). Detection and diagnosis of the early caries lesion. *BMC Oral Health, 15*(Suppl 1), Article S3. doi:10.1186/1472-6831-15-S1-S3

Gorelick, L., Geiger, A. M., & Gwinnett, A. J. (1982). Incidence of white spot formation after bonding and banding. *American Journal of Orthodontics, 81*(2), 93–98. doi:10.1016/0002-9416(82)90032-X

Ismail, A. I., Sohn, W., Tellez, M., Amaya, A., Sen, A., Hasson, H., & Pitts, N. B. (2007). The International Caries Detection and Assessment System (ICDAS): An integrated system for measuring dental caries. *Community Dentistry and Oral Epidemiology, 35*(3), 170–178. doi:10.1111/j.1600-0528.2007.00347.x

Julien, K. C., Buschang, P. H., & Campbell, P. M. (2013). Prevalence of white spot lesion formation during orthodontic treatment. *The Angle Orthodontist, 83*(4), 641–647. doi:10.2319/071712-584.1

Kidd, E. A., & Fejerskov, O. (2004). What constitutes dental caries? Histopathology of carious enamel and dentin related to the action of cariogenic biofilms. *Journal of Dental Research, 83*(Spec Iss C), C35–C38. doi:10.1177/154405910408301s07

Kim, S., Kim, E.-Y., Jeong, T.-S., & Kim, J.-W. (2011). The evaluation of resin infiltration for masking labial enamel white spot lesions. *International Journal of Paediatric Dentistry, 21*(4), 241–248. doi:10.1111/j.1365-263X.2011.01126.x

Kind, L., Stevanovic, S., Wuttig, S., Wimberger, S., Hofer, J., Müller, B., & Pieles, U. (2017). Biomimetic remineralization of carious lesions by self-assembling peptide. *Journal of Dental Research, 96*(7), 790–797. doi:10.1177/0022034517698419

Lygidakis, N. A., Wong, F., Jälevik, B., Vierrou, A.-M., Alaluusua, S., & Espelid, I. (2010). Best clinical practice guidance for

clinicians dealing with children presenting with molar-incisor-hypomineralisation (MIH): An EAPD policy document. *European Archives of Paediatric Dentistry, 11*(2), 75–81. https://doi.org/10.1007/BF03262716

Marinho, V. C., Worthington, H. V., Walsh, T., & Clarkson, J. E. (2013). Fluoride varnishes for preventing dental caries in children and adolescents. *Cochrane Database of Systematic Reviews, 2013*(7), Article CD002279. doi:10.1002/14651858.CD002279.pub2

Murdoch-Kinch, C. A., & McLean, M. E. (2003). Minimally invasive dentistry. *Journal of the American Dental Association, 134*(1), 87–95. doi:10.14219/jada.archive.2003.0021

Paris, S., Meyer-Lueckel, H., & Kielbassa, A. M. (2007). Resin infiltration of natural caries lesions. *Journal of Dental Research, 86*(7), 662–666. doi:10.1177/154405910708600715

Philip, N. (2019). State of the art enamel remineralization systems: The next frontier in caries management. *Caries Research, 53*(3), 284–295. doi:10.1159/000493031

Pini, N. I. P., Sundfeld-Neto, D., Aguiar, F. H. B., Sundfeld, R. H., Martins, L. R. M., Lovadino, J. R., & Lima, D. A. N. L. (2015). Enamel microabrasion: An overview of clinical and scientific considerations. *World Journal of Clinical Cases, 3*(1), 34–41. https://doi.org/10.12998/wjcc.v3.i1.34

Pitts, N. B., & Ekstrand, K. R. (2013). International Caries Detection and Assessment System (ICDAS) and its International Caries Classification and Management System (ICCMS) – Methods for staging of the caries process and enabling dentists to manage caries. *Community Dentistry*

and Oral Epidemiology, 41(1), e41–e52. doi:10.1111/cdoe.12025

Pitts, N. B., Zero, D. T., Marsh, P. D., Ekstrand, K., Weintraub, J. A., Ramos-Gomez, F., . . . Ismail, A. (2017). Dental caries. *Nature Reviews Disease Primers, 3*, Article 17030. doi:10.1038/nrdp.2017.30

Reynolds, E. C. (1997). Remineralization of enamel subsurface lesions by casein phosphopeptide-stabilized calcium phosphate solutions. *Journal of Dental Research, 76*(9), 1587–1595. doi:10.1177/00220345970760091101

Robinson, C., Shore, R. C., Brookes, S. J., Strafford, S., Wood, S. R., & Kirkham, J. (2000). The chemistry of enamel caries. *Critical Reviews in Oral Biology & Medicine, 11*(4), 481–495. doi:10.1177/10454411000110040601

ten Cate, J. M., & Featherstone, J. D. (1991). Mechanistic aspects of the interactions between fluoride and dental enamel. *Critical Reviews in Oral Biology & Medicine, 2*(3), 283–296. doi:10.1177/10454411910020030101

Walsh, T., Worthington, H. V., Glenny, A.-M., Marinho, V. C., & Jeroncic, A. (2019). Fluoride toothpastes of different concentrations for preventing dental caries. *Cochrane Database of Systematic Reviews, 2019*(3), Article CD007868. doi:10.1002/14651858.CD007868.pub3

BÖLÜM 4

PULPA KUAFAJINDA GÜNCEL YAKLAŞIMLAR VE MATERYALLER

Fatma Beyza KOÇYİĞİT[1]
Vahti KILIÇ[2]

Giriş

Diş pulpası, dentin duvarlarıyla çevrili alan içerisinde yer almakta olup diş çürüğü, travma veya çeşitli dış etkenlere bağlı olarak enfekte olma riski taşımaktadır. Diş pulpasının enfekte olması sonucu oluşan enfeksiyonlar, pulpa dokusunun sınırlı genişleme kapasitesi nedeniyle intrapulpal basıncın artmasına ve dolayısıyla şiddetli ağrı oluşumuna yol açabilmektedir (Peres & ark., 2019; Verfaillie, 2002). Geçmişte diş enfeksiyonlarının tedavisinde, enfekte pulpa dokusunun tamamen uzaklaştırılmasına dayanan klasik kök kanal tedavisi (KKT) tercih edilmekteydi. Ancak son yıllarda minimal invaziv yaklaşımların ve biyolojik temelli tedavi

[1] Araştırma Görevlisi, Erciyes Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi, Restoratif Diş Tedavisi Anabilim Dalı, ORCID:0009-0005-9854-590X
[2] Doç. Dr., Erciyes Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi, Restoratif Diş Tedavisi Anabilim Dalı, ORCID: 0000-0003-4653-3729

konseptlerinin önem kazanmasıyla birlikte, vital pulpa tedavisi ve rejeneratif endodontik tedavi klinik uygulamalarda ön plana çıkmıştır (Wei & ark., 2022). Vital pulpa tedavisi, yalnızca enfekte veya hasar görmüş pulpa dokusunun uzaklaştırılmasını takiben, iyileşme ve doku rejenerasyonunu destekleyen biyouyumlu materyallerin uygulanmasını içermekte olup, pulpa dokusunun canlılığını, fonksiyonel bütünlüğünü ve estetiğini korumayı amaçlamaktadır (Kodonas & ark., 2021).

Vital Pulpa Tedavilerinin Amacı ve Biyolojik Temelleri

Çürük tedavisinin temel amacı, enfekte dokuların uzaklaştırılması, sağlıklı diş dokusunun korunması ve pulpa canlılığının sürdürülmesidir. Bakteriyel yükün azaltılması pulpal iyileşme ve reparatif dentin oluşumunu desteklerken, özellikle kök gelişimi tamamlanmamış genç daimi dişlerde kök gelişiminin devamına olanak sağlar (Galler & ark., 2021; S. Hu, Meyer, & Duggal, 2018). Pulpa dokusu, dişin metabolik gereksinimlerini karşılamanın yanı sıra patolojik uyaranlara karşı savunma yanıtı oluşturur ve sekonder ile tersiyer dentin oluşumunda rol oynar. Bu nedenle çürük veya travmaya bağlı doku kayıplarında pulpa canlılığının korunması, dişin yapısal bütünlüğü ve uzun dönem fonksiyonunun sürdürülmesi açısından önemlidir (Sabeti & ark., 2021). Vital pulpa tedavileri (VPT), diş pulpasının kısmen ya da tamamen canlılığının sürdürülmesini amaçlayan, minimal invaziv yaklaşımlara dayalı biyolojik tedavi yöntemleridir. Bu tedavi protokolleri; indirekt pulpa kuafajı, direkt pulpa kuafajı, parsiyel pulpotomi ve total pulpotomi uygulamalarını kapsamaktadır (Colloc & Tomson, 2025).

Parsiyel Pulpotomi (Cvek Amputasyonu) Tedavisi

Kısmi (Cvek) pulpotomi, inflamasyondan etkilenmiş koronal pulpa dokusunun sağlıklı pulpa dokusuna ulaşılana kadar uzaklaştırılması ve kalan pulpanın canlılığının korunmasını

amaçlayan bir vital pulpa tedavisidir. Bu yaklaşım, koronal ve radiküler pulpanın vitalitesinin sürdürülmesine olanak sağlar (Barrieshi-Nusair & Qudeimat, 2006; Sonmez & Sonmez, 2007). Kısmi pulpotomi, inflamasyondan etkilenmiş yüzeyel pulpa dokusunun uzaklaştırılmasına ve kuafaj materyali için uygun bir uygulama alanı oluşturulmasına olanak sağlar. Literatürde bu tedavinin başarı oranının %93–96 arasında değiştiği bildirilmiştir (Kiatwateeratana & ark., 2009; Nosrat & Nosrat, 1998).

Total Pulpotomi (Total Amputasyon) Tedavisi

Total pulpotomi, koronal pulpa dokusunun tamamen uzaklaştırılarak kök pulpasının vitalitesinin korunmasını amaçlayan bir vital pulpa tedavisidir. Özellikle inflamasyonun koronal pulpanın derin tabakalarına ilerlediği durumlarda uygulanır. İşlem sonrasında hemostaz sağlanır ve kalan vital pulpa dokusu üzerine uygun bir biyomalzeme yerleştirilir (Ruch & Lesota, 1995).

Direkt Pulpa Kuafaj Tedavisi

Direkt pulpa kuafajı, ekspoze olmuş vital pulpanın uygun bir biyomalzeme ile örtülerek pulpa canlılığının korunmasını ve onarıcı dentin oluşumunun desteklenmesini amaçlayan bir tedavi yöntemidir. Pulpa açılımı sonrası hasarlanan odontoblastların yerine, vital pulpadaki progenitör hücrelerin farklılaşmasıyla onarıcı dentin oluşumu gerçekleşir (Tziafas, 2004). Dentin matriksinden salınan büyüme faktörleri, özellikle TGF ailesi, progenitör hücrelerin odontoblast benzeri hücrelere farklılaşmasını destekler. Kalsiyum hidroksit ve MTA gibi pulpa kaplama materyalleri de bu faktörlerin salınımını uyararak onarıcı dentinogenezise katkıda bulunur (Begue-Kirn & ark., 1994). Direkt pulpa kaplaması, mekanik veya travmatik pulpa ekspozlarında pulpa vitalitesini korumayı amaçlayan bir vital pulpa tedavisidir. Güncel çalışmalarda, daimi dişlerde farklı pulpa ekspozu durumlarında başarı oranlarının yaklaşık %87,5–95,4 arasında değiştiği bildirilmiştir (Aguilar & Linsuwanont, 2011;

Dammaschke, Leidinger, & Schäfer, 2010). Bazı çalışmalarda, yaş, cinsiyet, diş tipi, spontan ağrı varlığı, pulpa açığa çıkış boyutu ve hemostaz gibi değişkenlerin tedavi başarısı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bulgular, bu faktörlerin genel başarı oranı üzerinde anlamlı bir etkisi olmadığını göstermekte; ancak düşük kanama miktarının pulpa dokusunun iyileşme sürecini olumlu yönde desteklediği bildirilmektedir (Matsuo & ark., 1996).

İndirekt Pulpa Kuafaj Tedavisi

İndirekt pulpa kuafajı, pulpa ekspozu oluşturmadan pulpaya yakın çürük dentinin kontrollü olarak bırakılması ve biyouyumlu bir materyalle örtülmesine dayanan bir vital pulpa tedavisidir. Kalıcı dişlerde yapılan çalışmalarda, bu yaklaşımın %90'ın üzerinde sağkalım oranları gösterdiği bildirilmiştir (subcommittee, 2008; Tziafas, 2004). Bu tedavi yaklaşımı, primer odontoblastları korumayı ve pulpa-dentin birleşiminde reaksiyonel dentin oluşumunu teşvik etmeyi hedeflemektedir (Tziafas, 2004). İndirekt pulpa kuafajı klinikte iki şekilde uygulanır. Bunlar: İki aşamalı indirekt pulpa kuafajı ve tek aşamalı indirekt pulpa kuafaj tedavisidir (Hilton, 2009; Ruch & Lesota, 1995). Mevcut literatür yöntemlerden birinin diğerine kesin üstünlüğünü göstermemektedir. Tek aşamalı yaklaşım yeniden giriş gereksinimini ortadan kaldırırken, iki aşamalı yöntemin etkinliğini desteklemek için daha fazla klinik kanıta ihtiyaç vardır (Kunert & Lukomska-Szymanska, 2020; Qureshi & Soujanya, 2014).

Tek Aşamalı İndirekt Pulpa Kuafajı

Tek aşamalı selektif çürük uzaklaştırmada, mine-dentin sınırındaki çürük doku tamamen kaldırılırken pulpaya yakın yumuşak dentin korunur. Bu alan uygun bir biyomateryal ile örtülerek kavite sızdırmaz şekilde restore edilir. Böylece pulpa ekspozu riski azaltılır ve kalan dentinin remineralizasyonu desteklenir. Literatürde yöntemin başarı oranlarının yaklaşık %80–

90 arasında değiştiği bildirilmiştir (Bjørndal & ark., 2019; Hanna & Prichard, 2020; Kafetzi & Durutürk, 2014).

İki Aşamalı İndirekt Pulpa Kuafajı

İki aşamalı selektif çürük uzaklaştırmada, ilk seansta pulpaya yakın çürük dentin korunarak kavite geçici olarak restore edilir. Yaklaşık 6–8 hafta sonra kalan çürük doku uzaklaştırılır ve kalıcı restorasyon uygulanır. Her iki aşamada da uygun koronal sızdırmazlığın sağlanması önemlidir (Akhlaghi & Khademi, 2015).

Pulpa Kuafajında Kullanılan Materyaller ve Destekleyici Yaklaşımlar

Pulpa kuafaj materyalleri, pulpanın ekspoze olduğu veya olmadığı durumlarda pulpa canlılığının korunmasını ve onarıcı dentin oluşumunun desteklenmesini amaçlayan biyomateryallerdir (Mutar & Mahdee, 2024). Günümüzde vital pulpa tedavilerinde farklı özelliklere ve etki mekanizmalarına sahip çok sayıda kuafaj materyali kullanılmaktadır (Pedano & ark., 2020).

Kalsiyum Hidroksit (CH)

Kalsiyum hidroksit, 1920 yılında Hermann tarafından tanıtılmış ve 1930'lu yıllardan itibaren pulpa tedavilerinde kullanılmaya başlanmıştır (Dammaschke, 2008). Antibakteriyel etkisi ve mineralizasyonu destekleyerek reparatif dentin oluşumunu uyarması nedeniyle uzun yıllar pulpa kuafajında temel materyallerden biri olmuştur (Cavalcanti, Rode, & Marques, 2005). Tarihsel süreçte kalsiyum hidroksit, pulpa kuafajında uzun yıllar boyunca 'altın standart' materyal olarak kabul edilmiştir. Yaklaşık pH 12 değerine sahip güçlü bir baz olan kalsiyum hidroksit, suda sınırlı çözünürlük göstermekte ve çözünme sırasında kalsiyum ile hidroksil iyonlarını serbest bırakmaktadır (Chen & Suh, 2017; Mohammadi & Dummer, 2011). Kalsiyum hidroksitin bakterisidal etkisinin, serbestleşen hidroksil iyonlarının oluşturduğu yüksek

alkali ortamla ilişkili olduğu bildirilmektedir. Bu alkali pH, proinflamatuar mediatörlerin denatürasyonunu sağlayarak inflamatuar yanıtın çözülmesine katkıda bulunur .Ayrıca yüksek pH, bakteriyel lipopolisakkaritlerin yapısal bütünlüğünü bozarak inflamasyonun şiddetinin azalmasına da aracılık etmektedir (Khan, Sun, & Hargreaves, 2008). Kalsiyum hidroksit, yeni mineralize sert dokunun oluşumunda görev alan hücrelerin biyolojik aktivitelerinde kritik bir rol üstlenmektedir. Serbest kalsiyum iyonlarının, kalsiyum kanalları aracılığıyla kemik ile ilişkili proteinlerin ekspresyonunu uyardığı gösterilmiştir (Rashid & ark., 2003; Tada & ark., 2010) Ayrıca kalsiyum hidroksitin dental pulpa kök hücrelerinin aktivasyonu, göçü, proliferasyonu ve mineralizasyon kapasitesini artırarak onarıcı dentinogenez sürecini kolaylaştırdığı bildirilmektedir (Ji & ark., 2010; Jung, Park, & Han, 2010). Ancak kalsiyum hidroksit; dentin duvarlarına yetersiz adezyon, dentin köprüsü oluşumunda çoklu tünel defektleri, zayıf örtüleme kabiliyeti ve zamanla çözünme gibi dezavantajlara sahiptir (Cox & ark., 1996).

Kalsiyum Hidroksit İçerikli Kuafaj Materyalleri

Kalsiyum hidroksit patları, kullanılan çözücüye göre sulu, viskoz ve yağlı olarak sınıflandırılabilir. Sulu çözücüler hızlı çözünme ve iyon salınımı sağlarken, viskoz çözücüler daha kontrollü ve uzun süreli salınıma olanak tanır. Yağlı çözücüler ise düşük çözünürlükleri nedeniyle materyalin dokuda daha uzun süre kalmasını sağlar (Fava & Saunders, 1999). Kalsiyum hidroksit esaslı materyaller ayrıca sertleşme özelliklerine göre tek tüplü sertleşmeyen, iki tüplü kendiliğinden sertleşen ve rezin modifiye sistemler şeklinde sınıflandırılabilir (Chen & Suh, 2017).

Saf (sulu) kalsiyum hidroksit Simanlar

Kalsiyum hidroksit tozu, su veya serum fizyolojik gibi sulu taşıyıcılarla karıştırıldığında yüksek pH'lı alkali bir pat oluşturur ve hızlı iyon salınımı sağlar. Klinik kullanım için toz-likit sistemlerin

yanı sıra Calcicur (VOCO, Almanya) ve UltraCal XS (Ultradent Products, ABD) gibi önceden karıştırılmış, sertleşmeyen kalsiyum hidroksit patları da bulunmaktadır (Athanassiadis, Abbott, & Walsh, 2007; Fava & Saunders, 1999).

Kalsiyum hidroksit bazlı simanlar

Tek tüplü sistemlerin yüksek çözünürlük ve sertleşmeme gibi sınırlılıkları nedeniyle iki tüplü, kendiliğinden sertleşen kalsiyum hidroksit materyalleri geliştirilmiştir. Dycal ve Life bu gruba örnek olup, baz ve katalizör patlarının karıştırılmasıyla kalsiyum disalisilat oluşarak materyal sertleşir. Bununla birlikte, bu sistemlerin mekanik dayanımları genellikle sınırlıdır (Chen & Suh, 2017).

Rezin modifiye kalsiyum hidroksit simanlar

Rezin modifiye kalsiyum hidroksit materyalleri; ışıkla polimerize olabilmeleri, daha iyi mekanik özellikler, düşük çözünürlük ve asit uygulamalarına karşı daha yüksek direnç göstermeleri nedeniyle geleneksel sistemlere alternatif olarak geliştirilmiştir. Prisma VLC Dycal, Calcimol LC ve Ultra-Blend Plus bu gruba örnek materyallerdir (Chen & Suh, 2017).

MTA (Mineral Trioxide Aggregate)

MTA, 1990'lı yıllarda Torabinejad ve arkadaşları tarafından deneysel bir kalsiyum silikat bazlı biyoaktif malzeme olarak literatüre kazandırılmıştır (Parirokh, Torabinejad, & Dummer, 2018). Bu malzemenin, uygun fiziksel özelliklere sahip bir endodontik dolgu ve kök ucu dolgu materyali olduğu bildirilmiştir (Josette Camilleri, 2008; Jefferies, 2014). MTA, pulpa dokusuyla temas ettiğinde mineralizasyonu destekleyen ve pulpa canlılığının korunmasına katkı sağlayan biyoaktif bir materyaldir. Bu özellikleri sayesinde direkt pulpa kaplaması, perforasyon onarımı ve apeksifikasyon gibi çeşitli endodontik uygulamalarda kalsiyum hidroksite alternatif olarak kullanılmaktadır (Kunert & Lukomska-

Szymanska, 2020). MTA, tri-kalsiyum silikat, di-kalsiyum silikat ve tri-kalsiyum alüminat içeren Portland çimentosu ile, radyopasite sağlamak amacıyla eklenmiş bizmut oksitten oluşan bir materyaldir (Josette Camilleri, 2008). Gri MTA'nın dişlerde renk değişikliğine yol açabilmesi nedeniyle beyaz MTA geliştirilmiştir. Beyaz formülasyonda demir içeriği azaltılmış olmakla birlikte renklenme riski tamamen ortadan kalkmamıştır. Gri ve beyaz MTA'nın dentin köprüsü oluşumu ve pulpal inflamatuar yanıt açısından genel olarak benzer biyolojik özellikler gösterdiği bildirilmiştir (Eskandarizadeh & ark., 2011; Jefferies, 2014; Kunert & Lukomska-Szymanska, 2020). MTA'nın başlangıç pH'ı yaklaşık 10,2 olup hidratasyonla birlikte 12,5'e kadar yükselir ve bu yüksek alkalinite antibakteriyel özelliklerine katkı sağlar. Materyal yaklaşık 3–4 saat içinde sertleşir ve hidratasyon için neme ihtiyaç duyar. Nemli ortamda sertleşebilmesi, vital pulpa tedavilerindeki klinik kullanımını destekleyen önemli özelliklerinden biridir (Eskandarizadeh & ark., 2011; Oğlakçı, Arhun, & Tuncer, 2016). Orijinal MTA'nın bazı dezavantajlarını gidermek amacıyla modifiye edilmiş MTA formları geliştirilmiştir; bu materyallerin çoğunda, toz içeriği veya partikül boyutu değiştirilerek sertleşme süresinin kısaltılması hedeflenmiştir. ProRoot MTA, biyouyumluluğu ve klinik etkinliği kapsamlı biçimde araştırılmış bir materyaldir. Ancak uzun sertleşme süresi ve yüksek maliyeti, benzer biyolojik özellikleri korurken daha hızlı sertleşen ve daha ekonomik yeni kalsiyum silikat esaslı materyallerin geliştirilmesine yol açmıştır (Komabayashi & ark., 2016; Kunert & Lukomska-Szymanska, 2020).

Beyaz MTA

Gri MTA'nın renklenmeye yol açabilmesi nedeniyle demir içeriği azaltılmış beyaz MTA geliştirilmiştir; ancak renk değişikliği riski tamamen ortadan kalkmamıştır. Beyaz MTA'nın farklı toz-sıvı oranlarının pulpal inflamasyon ve dentin köprüsünün oluşumu,

morfolojisi ve kalınlığı üzerinde anlamlı bir etkisi olmadığı bildirilmiştir (Bortoluzzi & ark., 2007; Felman & Parashos, 2013).

MTA Angelus

MTA Angelus (Angelus, Brezilya), ProRoot MTA'ya göre daha kısa sertleşme süresi sağlamak amacıyla geliştirilmiştir. Kalsiyum sülfatın formülasyondan çıkarılmasıyla sertleşme süresi belirgin şekilde azaltılmıştır (Choi & ark., 2013; Kaup, Schäfer, & Dammaschke, 2015)**.**

MM-MTA

MM-MTA, geleneksel MTA'nın bazı kullanım sınırlılıklarını azaltmak amacıyla geliştirilmiş, kapsül formunda mekanik olarak karıştırılan kalsiyum silikat esaslı bir materyaldir. Formülasyonunda bulunan kalsiyum karbonatın daha kısa sertleşme süresine katkı sağladığı bildirilmiştir (Khalil, Naaman, & Camilleri, 2015).

Retro MTA

RetroMTA, kısa sertleşme süresine sahip kalsiyum silikat esaslı bir materyaldir. İnsan pulpasında yapılan histolojik bir çalışmada, direkt pulpa kaplaması sonrasında oluşan mineralize dokunun çoğunlukla atübüler olduğu ve düzenli dentin özellikleri göstermediği bildirilmiştir. Bu nedenle oluşan sert dokunun gerçek rejenerasyondan çok reparatif bir yanıtı temsil ettiği düşünülmektedir (Dammaschke & ark., 2019; Kaup, Schäfer, & Dammaschke, 2015).

Güncel MTA Benzeri Biyomateryaller

Kalsiyum silikat esaslı simanlar, başlangıçta kök ucu ve perforasyon onarımında kullanılmak üzere geliştirilmiş, biyouyumlulukları nedeniyle daha sonra pulpa kuafajında da kullanılmaya başlanmıştır (Dawood & ark., 2017). Uzun sertleşme süresi, uygulama güçlüğü, sınırlı mekanik özellikler ve renklenme

potansiyeli gibi dezavantajları, sertleşme düzenleyicileri ve farklı radyoopak ajanlar içeren yeni formülasyonların geliştirilmesine öncülük etmiştir. Bu yeni materyallerde kullanım kolaylığı ve mekanik özelliklerin iyileştirilmesi amaçlanmaktadır (Giraud & ark., 2019; Vallés & ark., 2015).

BioAggregate

BioAggregate, MTA benzeri kalsiyum silikat esaslı bir biyoseramik materyaldir. Trikalsiyum silikat, dikalsiyum silikat, kalsiyum fosfat ve tantal oksit içeren formülasyonu sayesinde biyouyumluluk, mineralizasyon ve sızdırmazlık açısından olumlu özellikler göstermektedir. Bizmut oksit içermemesi, renklenme potansiyelini azaltan bir avantajdır. Direkt pulpa kuafajı, apeksifikasyon, perforasyon onarımı ve kök ucu dolgusu gibi çeşitli endodontik uygulamalarda kullanılmıştır (J Camilleri, Sorrentino, & Damidot, 2015; Chung, Kim, & Shin, 2010).

Endocem-ZR

ENDOCEM-Zr®, MTA'nın uzun sertleşme süresi, düşük yıkama direnci ve renklenme potansiyeli gibi sınırlılıklarını azaltmak amacıyla geliştirilmiş puzolan esaslı bir kalsiyum silikat simandır. MTA'dan farklı olarak radyoopaklaştırıcı ajan olarak bizmut oksit yerine zirkonyum oksit içerir (Hegde & ark., 2017; M. Lee & ark., 2017).

Neo MTA Plus

NeoMTA Plus, renklenme riskini azaltmak amacıyla bizmut oksit yerine tantal oksit içeren kalsiyum silikat esaslı bir materyaldir. Apatit oluşumunu destekleyen yapısı sayesinde yüksek biyoaktivite göstermektedir (Abu Zeid & ark., 2017; Siboni & ark., 2017). NeoMTA Plus, vital pulpa ve çeşitli endodontik tedavilerde kullanılan kalsiyum silikat esaslı bir biyomateryaldir. Biyouyumluluğu, mineralizasyonu destekleyen yapısı ve düşük

renklenme potansiyeli önemli avantajları arasında yer alırken, nispeten uzun sertleşme süresi başlıca sınırlılıklarındandır (Josette Camilleri, 2015).

NeoMTA 2

NeoMTA 2, rezin içermeyen, trikalsiyum ve dikalsiyum silikat esaslı biyoaktif bir MTA materyalidir. Radyopasite amacıyla tantal oksit içermesi, renklenme riskinin azaltılmasını hedeflemektedir. Güncel çalışmalar, NeoMTA 2'nin biyouyumluluk ve mineralizasyon potansiyeli gösterdiğini ve süt dişi pulpotomilerinde yüksek başarı oranları sağladığını bildirmektedir (Alqahtani & ark., 2023; Cruz Hondares & ark., 2024).

NeoPUTTY

NeoPUTTY, kullanıma hazır ve önceden karıştırılmış putty formunda kalsiyum silikat esaslı biyoseramik bir materyaldir. Karıştırma gerektirmeyen yapısı klinik uygulamayı kolaylaştırmaktadır. Güncel klinik çalışmalar, NeoPUTTY'nin süt dişi pulpotomilerinde NeoMTA Plus ve Biodentine ile benzer yüksek başarı gösterdiğini bildirmiştir. Ayrıca olgun daimi dişlerde yapılan 24 aylık randomize klinik bir çalışmada, parsiyel pulpotomi sonrası NeoPUTTY ile MTA arasında klinik ve radyografik başarı açısından anlamlı farklılık saptanmamıştır (Serrano & ark.).

iRoot BP Plus

iRoot ürünleri, farklı klinik uygulamalara uygun kıvamlarda sunulan kalsiyum silikat esaslı biyoseramik materyallerdir. iRoot BP şırınga formunda, iRoot BP Plus ise daha yoğun kıvamda olup pulpa kaplaması, perforasyon onarımı, apeksifikasyon ve kök ucu dolgusu gibi endodontik tedavilerde kullanılmaktadır (Kunert & Lukomska-Szymanska, 2020). Sistematik bir derlemede, iRoot BP Plus materyallerinin pulpa kök hücrelerinin proliferasyonunu, migrasyonunu ve mineralizasyonunu destekleyerek dentin köprüsü

oluşumunu teşvik eden biyouyumlu malzemeler olduğu gösterilmiştir. Bu sonuçlar, iRoot BP Plus'ın geleneksel kalsiyum hidroksit materyallerine kıyasla üstün özellikler sergilediğini bildiren önceki çalışmalarla uyumludur (Mahgoub & ark., 2019; Rao & ark., 2020).

Endosequence BC RRM

EndoSequence BC RRM, önceden karıştırılmış kalsiyum silikat esaslı bir biyoseramik materyaldir ve şırınga veya yoğun kıvamlı putty formunda sunulmaktadır. Daha kısa sertleşme süresi sağlamak amacıyla geliştirilen BC RRM-Fast Set Putty ise dentindeki mevcut nem ile hidratasyona uğrayarak sertleşir (Komabayashi & ark., 2016). Üreticiye göre sertleşme süresi EndoSequence BC RRM için yaklaşık 2 saat, BC RRM-Fast Set Putty için ise 20 dakikadır. Bununla birlikte, materyalin su içeriğinin sertleşme davranışını etkileyebildiği ve bildirilen sürelerde değişkenliğe yol açabildiği gösterilmiştir (Loushine & ark., 2011). BC RRM, in vitro çalışmalarda MTA ile benzer biyouyumluluk göstermiş; pulpa hücrelerinin proliferasyonunu ve reparatif dentin oluşumunu desteklediği bildirilmiştir (Ma & ark., 2011; Shi & ark., 2016).

Biyoaktif Dentin İkame Materyali: Biodentine

Biodentine, trikalsiyum silikat esaslı biyoaktif bir dentin ikame materyalidir. MTA'ya alternatif olarak geliştirilen materyal, daha kısa sertleşme süresi ve kolay manipülasyon özellikleriyle öne çıkmaktadır (Kaur & ark., 2017; Rajasekharan & ark., 2014). Biodentine, trikalsiyum silikat esaslı biyoaktif bir simandır. Formülasyonundaki kalsiyum klorür sertleşme reaksiyonunu hızlandırırken, materyalin kalsiyum iyonu salınımı mineralizasyon ve sert doku oluşumunu desteklemektedir. Ayrıca pulpa hücreleri üzerinde iyi biyouyumluluk gösterdiği bildirilmiştir (Josette Camilleri, Sorrentino, & Damidot, 2013; Laurent & ark., 2008).

Biodentine ile tedavi edilen dişlerde renk stabilitesi korunurken, MTA'ya kıyasla daha yoğun ve az gözenekli bir yapı sergiler. Daha hızlı sertleşme, yüksek basınç ve itme bağ dayanımı, kompakt yapı, hızlı kalsiyum hidroksit oluşumu ve yüksek kalsiyum iyonu salınımı gibi avantajları sayesinde, endodonti, restoratif ve pediatrik diş hekimliği ile dental travmatoloji uygulamalarında MTA'ya etkili bir alternatif olarak kullanılmaktadır (Vallés & ark., 2015; Yoldaş & ark., 2016).

Biodentine XP

Biodentine XP, klasik Biodentine ile aynı formülasyona sahip olmakla birlikte, toz ve sıvının tek kartuş içerisinde bulunduğu otomatik karıştırma ve uygulama sistemiyle geliştirilmiş bir versiyondur. Bu sistem, materyalin hazırlanmasını kolaylaştırarak daha standart bir kıvam elde edilmesini amaçlamaktadır. Güncel in vitro çalışmalar, Biodentine XP'nin uygun sitouyumluluk ve mineralizasyon potansiyeli gösterdiğini bildirmektedir (Mora & ark., 2025).

Rezin Modifiye Kalsiyum Silikat Esaslı Materyaller: TheraCal LC ve TheraCal PT

TheraCal LC, ışıkla sertleşen ve rezinle modifiye edilmiş kalsiyum silikat esaslı bir materyaldir. İçeriğinde kalsiyum oksit, tip III Portland çimentosu sınıfı kalsiyum silikat partikülleri, stronsiyum camı, füme silika, baryum sülfat, baryum zirkonat, Bis-GMA ve polietilen glikol dimetakrilat bulunmaktadır (Gandolfi, Siboni, & Prati, 2012). Materyal, polimerizasyon ve hidrasyon reaksiyonlarıyla sertleşen rezin modifiye kalsiyum silikat esaslı bir yapıya sahiptir. Biodentine'e kıyasla kompozit rezinlere daha yüksek bağlanma dayanımı gösterebilmekle birlikte, rezin içeriği nedeniyle hidrasyon ve kalsiyum hidroksit oluşumu daha sınırlıdır (Deepa & ark., 2016).

TheraCal PT

TheraCal PT, polimerize olmamış rezin monomerlerinin olumsuz etkilerini azaltmak amacıyla geliştirilmiş, dual-cure rezin modifiye kalsiyum silikat esaslı bir materyaldir. Direkt ve indirekt pulpa kuafajı ile pulpotomide kullanılmaktadır. TheraCal LC'ye kıyasla daha iyi biyouyumluluk bildirilmiş olmakla birlikte, bazı çalışmalarda sitotoksisite ve inflamatuar yanıt gözlenmiştir (Cabrera-Fernández & ark., 2026). Pulpotomi başta olmak üzere direkt ve indirekt pulpa kuafajında kullanılabilen TheraCal PT, uygun biyouyumluluk ve mineralizasyon potansiyelinin yanı sıra kısa sertleşme süresi ve aynı seansta restorasyona olanak sağlamasıyla klinik avantaj sunmaktadır (Kayaci & ark., 2024).

TheraBase

TheraBase, dual-cure özellik gösteren, kalsiyum ve florür iyonu salabilen, self-adeziv kalsiyum silikat esaslı bir liner materyalidir. Diş dokusuyla kimyasal bağ oluşturabilmesi ve kalsiyum salınımına bağlı olarak alkali bir ortam meydana getirmesi, pulpa canlılığının korunması açısından potansiyel avantajlar sunmaktadır (Güdül, Tonga, & Hatirli, 2026) . Materyalin kolay ve hızlı uygulanabildiğini ve indirekt pulpa tedavilerinde liner olarak kullanılabileceğini belirtmektedir (Kayaci & ark., 2024).

Çinko Oksit Ojenol (ZOE)

Çinko oksit öjenol (ZOE), sedatif, analjezik ve antimikrobiyal özellikleri nedeniyle kaide, siman ve geçici restoratif materyal olarak uzun süredir kullanılmaktadır. Bununla birlikte, ekspoze pulpa ile doğrudan temasında kalsifik bariyer oluşumunu desteklememesi ve kronik inflamatuar yanıta yol açabilmesi nedeniyle direkt pulpa kuafajı için uygun kabul edilmemektedir (Banoee & ark., 2010; Erdem & ark., 2011; Watts & Paterson, 1987).

Cam İyonomer/ Rezin Modifiye Cam İyonomer Simanlar

Cam iyonomer simanlar, polimerik asit ile bazik cam tozu arasındaki asit-baz reaksiyonuyla sertleşen materyallerdir. Rezin modifiye cam iyonomer simanlar ise ilave rezin monomerleri sayesinde asit-baz reaksiyonuna ek olarak ışıkla polimerizasyonla da sertleşir (Nagui Hanna, Pérez Alfayate, & Prichard, 2020; Sidhu & Nicholson, 2016). Cam iyonomer simanlar, ince bir dentin tabakasının korunduğu indirekt pulpa kuafajında kullanılabilmektedir. Ancak doğrudan pulpa temasında inflamasyon ve nekroza yol açabilmeleri ve dentin köprüsü oluşumunu yeterince desteklememeleri nedeniyle direkt pulpa kuafajı için önerilmemektedir (Cui & ark., 2009; C. A. de Souza Costa & ark., 2003; Do Nascimento & ark., 2000).

Adeziv Sistemler

Adeziv sistemler, dentine bağlanarak bakteriyel sızıntıyı azaltma potansiyelleri nedeniyle direkt pulpa kuafajında değerlendirilmiştir. Ancak içeriklerindeki bazı monomerlerin pulpa hücreleri üzerinde sitotoksik etkiler gösterebildiği bildirilmiştir (C. de Souza Costa & ark., 1999; Didilescu & ark., 2018). Adeziv sistemlerin direkt pulpa kuafajındaki sınırlı başarısı, rezin monomerlerinin pulpa hücreleri üzerindeki sitotoksik etkileri ve pulpanın bakteriyel kontaminasyona karşı savunma yanıtını olumsuz etkileyebilmeleriyle ilişkilendirilmiştir (C. de Souza Costa & ark., 1999; Jontell & ark., 1995).

Kollajen

Kollajen süngerlerin pulpa üzerinde düşük düzeyde inflamasyon ve sınırlı nekroz oluşturabildiği bildirilmiştir. Kollajen, kalsiyum hidroksite kıyasla daha az irritan olmakla birlikte mineralizasyonu desteklese de kalın ve düzenli bir dentin köprüsü oluşumunda yeterli bulunmamıştır (Dick & Carmichael, 1980).

Kalsiyum Fosfat

Kalsiyum fosfat simanları, biyouyumlu ve osteojenik özellikleri nedeniyle pulpa kuafajında kullanılabilmektedir. Sertleşme ürünü olan hidroksiapatit, dentinin inorganik yapısına benzerliği sayesinde mineralizasyonu ve dentin köprüsü oluşumunu destekleyebilir (Ruhé & ark., 2006; Schuurs, Gruythuysen, & Wesselink, 2000). Kalsiyum fosfat simanlarının iyi biyouyumluluğa sahip olmalarına rağmen, zor manipülasyon, uzun sertleşme süresi, sınırlı başlangıç mekanik özellikleri ve inflamatuar yanıt oluşturabilmeleri vital pulpa tedavilerindeki kullanımlarını sınırlandırmaktadır (Jean & ark., 1988).

Hidroksiapatit

Sentetik kalsiyum fosfat seramikleri, en kararlı termodinamik yapıya sahip olup, nötr pH ortamında biyouyumlu özellik gösterir ve yeni mineralize dokunun oluşumunu destekleyen bir iskele işlevi görür (Hayashi & ark., 1999).

MTYA1-Ca

MTYA1-Ca, kalsiyum hidroksit içeren rezin esaslı bir direkt pulpa kuafaj materyalidir. Dentin köprüsü oluşumunu desteklediği, nekrotik tabaka oluşturmadan pulpal iyileşmeye katkı sağladığı ve histopatolojik olarak Dycal ile benzer sonuçlar gösterdiği bildirilmiştir (Niinuma, 1999).

Büyüme Faktörleri

Vital pulpa tedavilerinde, embriyonik dentinogenezde görev alan biyolojik mekanizmaların yeniden uyarılmasıyla tersiyer dentin oluşumunun desteklenmesi amaçlanır. Rekombinant insan proteinlerinin de pulpal iyileşme ve doku rejenerasyonunu destekleyebileceği bildirilmiştir (Limjeerajarus & ark., 2014; RUTHERFORD, 1995). Büyüme faktörleri kapsamında kemik morfogenetik proteinler (BMP), rekombinant insülin benzeri

büyüme faktörü-I ve diğer büyüme faktörleri ele alınmaktadır. In vitro olarak IGF-2, TGF-beta 1 ve BMP-7 kullanılarak yapılan pulpa kuafajında reperatif dentin oluşumunun indüklendiği görülmüştür (Decup & ark., 2000).

Kemik Morfojenik Proteini (BMP)

Kemik morfogenetik proteinler (BMP), TGF-β ailesine ait büyüme faktörleridir. Özellikle BMP-2, BMP-4 ve BMP-7'nin, pulpadaki mezenkimal hücrelerin odontoblast benzeri hücrelere farklılaşmasını destekleyerek reparatif dentin oluşumunu uyardığı bildirilmiştir (Lianjia, YUHAO, & WHITE, 1993).

Rekombinant İnsülin Benzeri Büyüme Faktörü-I

IGF-I'nin pulpa kuafajında dentin köprüsü ve tübüler reparatif dentin oluşumunu destekleyebildiği bildirilmiştir (Furey, Hjelmhaug, & Lobner, 2010).

Diğer Büyüme Faktörleri

Farklı büyüme faktörlerinin karşılaştırıldığı çalışmalarda, TGF-β1'in reparatif dentin oluşumunu belirgin biçimde artırdığı bildirilmiştir (C.-C. Hu & ark., 1998).

Kemik Sialoprotein(BSP)

Goldberg ve arkadaşları, kemik sialoproteininin (BSP) pulpa kuafajında homojen ve iyi mineralize reparatif dentin oluşumunu desteklediğini bildirmiştir. BSP uygulaması sonrasında osteodentin ile birlikte mineralize, atübüler reparatif dentin oluşumu gözlenmiştir (Lovschall, Fejerskov, & Flyvbjerg, 2001).

Enzimler

Enzimler ve enzim inhibitörleri kapsamında heme oksijenaz-1 (HO-1) ve simvastatin ele alınmaktadır.

Heme Oksijenaz

Heme oksijenaz-1 (HO-1), hem yıkımında görev alan ve özellikle oksidatif strese maruz kalan odontoblastlar ile pulpa hücrelerinde ekspresyonu artan koruyucu bir enzimdir. HO-1'in proinflamatuar sitokinler ve nitrik oksidin zararlı etkilerini azaltarak pulpa dokusunun savunmasına katkı sağladığı bildirilmektedir. Ayrıca Portland simanındaki bizmut oksitin HO-1 ekspresyonunu artırarak materyalin sitotoksik etkilerini sınırlayabileceği öne sürülmüştür (Min & ark., 2008). Bunun yanı sıra, HO-1 indüksiyonunun dental pulpa hücrelerinde proliferasyon ve mineralizasyonu artırdığı ve odontoblastik farklılaşmayı desteklediği bildirilmiştir (Kim & ark., 2010).

Simvastatin

Statinler, HMG-CoA redüktaz inhibitörleri olarak hiperlipidemi tedavisinde yaygın kullanılan ilaçlardır. Anjiyogenezi uyarma, nöronal hücre gelişimini destekleme ve antiinflamatuar etki gösterme özellikleri nedeniyle dentin rejenerasyonu ve pulpa iyileşmesi açısından da araştırılmaktadır. Bu özellikleri sayesinde, pulpa kuafaj materyallerinde aktif bileşen olarak kullanılmalarının reparatif dentin oluşumunu hızlandırabileceği düşünülmektedir (Okamoto & ark., 2009). Bununla birlikte, etkilerinin konsantrasyona bağlı olduğu ve yüksek dozların pulpa hücrelerinin canlılığını olumsuz etkileyebileceği gösterilmiştir (Del Giudice & ark., 2025).

Yeni Endodontik Siman(NEC)

NEC, kalsiyum oksit, kalsiyum fosfat, kalsiyum karbonat, kalsiyum silikat, kalsiyum sülfat ve kalsiyum klorür içeren bir materyaldir. Zarrabi ve arkadaşlarının yaptığı histolojik incelemede, NEC'in MTA'ya kıyasla pulpada daha az inflamasyona yol açtığı ve daha kalın dentin köprüsü oluşturduğu bildirilmiştir (Zarrabi & ark., 2010).

Mine Matris Türevi (EMD) -Emdogain

Mine matriks türevi (EMD), başlıca amelogenin içeren ve odontogenez sırasında salgılanan biyoaktif bir materyaldir. BMP ve TGF-β benzeri biyolojik etkileri sayesinde odontoblast farklılaşmasını ve reparatif dentin oluşumunu destekleyebilir. Nakamura ve arkadaşları, EMD uygulanan dişlerde oluşan sert doku miktarının kalsiyum hidroksit grubuna göre daha fazla olduğunu bildirmiştir (Ghoddusi, Forghani, & Parisay, 2013; Y. Nakamura & ark., 2001).

Odontojenik Ameloblast İlişkili Protein (ODAM)

ODAM, ameloblast, odontoblast ve pulpa hücrelerinde eksprese edilen; mine mineralizasyonu ve ameloblast maturasyonunda rol oynayan bir proteindir. Yang ve arkadaşları, rekombinant ODAM'ın ekspoze pulpa bölgelerinde reaksiyoner dentin oluşumunu hızlandırarak sağlıklı odontoblastların korunmasına katkı sağlayabileceğini bildirmiştir (Yang & ark., 2010).

Kök Hücreler

Diş pulpa kök hücreleri (DPSC) ve süt dişlerinden elde edilen kök hücreler (SHED), kendini yenileme ve çok yönlü farklılaşma özellikleri nedeniyle dentin-pulpa kompleksinin rejenerasyonunda araştırılmaktadır. SHED'in yüksek proliferasyon kapasitesine sahip olduğu ve odontojenik farklılaşma, anjiyogenez ve pulpa-dentin dokusunun yeniden oluşumunu destekleyebildiği bildirilmektedir. Bununla birlikte, kök hücre temelli rejeneratif yaklaşımların klinik etkinliği ve uzun dönem güvenliği için daha güçlü klinik kanıtlara ihtiyaç vardır (AGA & ark., 2025; S. Nakamura & ark., 2009).

Kortikosteroidler ve Antibiyotikler

Pulpa inflamasyonunu azaltmak amacıyla kalsiyum hidroksit ile birlikte kortikosteroid ve antibiyotiklerin kullanıldığı

bildirilmiştir. Bu kombinasyonların inflamasyonu baskılayarak pulpa iyileşmesini desteklemesi amaçlanmaktadır. Gardner ve arkadaşları, kalsiyum hidroksit-vankomisin kombinasyonunun daha homojen reparatif dentin köprüsü oluşumunu desteklediğini bildirmiştir (Gardner, Mitchell, & Mcdonald, 1971; Watts & Paterson, 1981). Güncel çalışmalar , uygun dozlarda uygulanan kortikosteroidlerin dental pulpa kök hücrelerinde mineralizasyonu ve odontojenik farklılaşmayı destekleyebileceğini göstermektedir (Vallecillo-Rivas & ark., 2024).

Hint Yağı Fasulyesi (COB) Simanı

COB (Risinoleik asit trigliseriti), yaklaşık %81–96 oranında risinoleik asit içeren ve yapısındaki hidroksil grupları nedeniyle doğal poliol olarak sınıflandırılan bir biyomateryaldir. COB, başlangıçta kemik defektlerinin onarımı ve rejenerasyonu amacıyla geliştirilmiş; biyouyumluluğu ve doku ile uyumlu yapısı nedeniyle daha sonra pulpa kuafajı uygulamalarında da araştırılmaya başlanmıştır (Qureshi & Soujanya, 2014). İn vitro çalışmalarda COB'nin insan pulpa hücrelerinde belirgin sitotoksik veya genotoksik etki oluşturmadığı ve hücre canlılığını koruduğu bildirilmiştir (Camargo & ark., 2009).

Biyoaktif Materyaller

ACTIVA BioACTIVE, 2014 yılında geliştirilen, rezin esaslı ve iyon salımı özelliğine sahip restoratif bir materyaldir. Kalsiyum, fosfat ve florür iyonlarını serbest bırakabilmesi nedeniyle biyoaktif özelliklere sahip olduğu belirtilmektedir. Bununla birlikte, pulpa kuafajındaki kullanımı sınırlıdır (Kunert & Lukomska-Szymanska, 2020; Omer & ark., 2025). Üretici önerilerine göre ACTIVA BioACTIVE, pulpal inflamasyon bulunmayan olgularda indirekt pulpa kuafajında kullanılabilmekte; direkt pulpa kuafajı için ise önerilmemektedir (Lardani & ark., 2022; Porenczuk & ark., 2019). Yapılan karşılaştırmalı bir çalışmada, ACTIVA BioACTIVE'ın

Dycal ve TheraCal LC ile benzer düzeyde kalsiyum (Ca^{2+}) ve hidroksil (OH^{-}) iyonu salımı gösterdiği bildirilmiştir. Bu iyon salımının biyomineralizasyon süreçlerine katkıda bulunabileceği ve pulpal iyileşmeyi destekleme potansiyeli taşıyabileceği belirtilmiştir (Jun, Lee, & Lee, 2017). ACTIVA BioACTIVE'ın iyon salımı ve biyomineralizasyon potansiyeli, materyalin vital pulpa tedavilerindeki kullanımına yönelik ilgiyi artırmıştır. Bununla birlikte, biyouyumluluğuna ilişkin çalışmalar farklı sonuçlar bildirmekte ve özellikle pulpa dokusuyla doğrudan temas halinde kullanımını destekleyen kanıtların halen sınırlı olduğu belirtilmektedir (Kunert & ark., 2022). Bu nedenle, materyalin direkt pulpa kuafajındaki biyolojik güvenliği ve klinik etkinliğinin ortaya konulabilmesi için ileri in vitro ve in vivo çalışmalara ihtiyaç bulunmaktadır (Kunert & Lukomska-Szymanska, 2020).

Propolis (Rus Penisilini)

Propolis, demir ve çinko gibi minerallerin yanı sıra flavonoidler ve fenolik bileşikler gibi çeşitli aromatik bileşenler içerir. Bu kapsamlı kimyasal yapısı sayesinde antioksidan, antibakteriyel, antifungal, antiviral ve antienflamatuar özellikler sergiler (Ayad & ark., 2025). İnsan pulpasında yapılan karşılaştırmalı bir çalışmada, propolis uygulanan örneklerde MTA'ya benzer şekilde dentin köprüsü oluşumu gözlenmiş ve Dycal grubuna kıyasla daha düşük düzeyde pulpal inflamasyon bildirilmiştir. Bu bulgular, propolisin direkt pulpa kuafajında pulpal iyileşme ve sert doku oluşumunu destekleme potansiyeline sahip olabileceğini düşündürmektedir (Parolia & ark., 2010).

Pulpa Kuafajında Lazer Destekli Yaklaşımlar

Lazerlerin diş hekimliğinde kullanımı, özellikle pulpa ve sert doku işlemlerinde önemli kolaylıklar sağlamıştır. Er,Cr:YSGG lazer, 2780 nm dalga boyunda ışık yayar ve enerjisinin su ile hidroksiapatit tarafından yüksek oranda absorbe edilmesi sayesinde dental

dokularda ablasyon oluşturabilir (Arslanparcasi & Arslanparcasi, 2026). Vital pulpa tedavilerinde ise doku ablasyonu ve kanama kontrolü gibi özelliklerinden yararlanılabilmekte ve pulpa kuafajına yardımcı bir yöntem olarak kullanılabilmektedir. Bununla birlikte, lazer uygulaması kuafaj materyalinin yerine geçen bir tedavi olarak değil, vital pulpa tedavisine yardımcı bir yaklaşım olarak değerlendirilmelidir (Afkhami & ark., 2023; Giovanni Olivi & Genovese, 2006). Yapılan bir klinik çalışmada, geleneksel kalsiyum hidroksit uygulaması ile Er,Cr:YSGG ve Er:YAG lazer destekli pulpa kuafajı karşılaştırılmış; başarı oranları sırasıyla %63, %80 ve %75 olarak bildirilmiştir. Lazer gruplarında kavite tabanına dekontaminasyon amacıyla 60 saniye ışınlama uygulanmış ve lazer destekli yaklaşımın derin çürüklü dişlerde pulpa kuafajının prognozuna katkı sağlayabileceği belirtilmiştir (G Olivi & ark., 2007).

TVH-19 Sentetik Peptit

Odontogenezle ilişkili proteinlerden türetilen fonksiyonel peptitlerin, dental sert doku rejenerasyonunu destekleme potansiyeline sahip olduğu bildirilmektedir. Bu peptitlerden TVH-19'un, insan dental pulpa hücrelerinde hücre göçünü ve odontojenik farklılaşmayı desteklediği; in vivo çalışmalarda ise inflamatuvar yanıtı azaltarak tersiyer dentin oluşumunu artırdığı gösterilmiştir (Han & ark., 2021). Ayrıca, in vitro bulgular peptidin hDPC'lerin mineralizasyonunu ve odontojenik farklılaşmasını desteklediğini göstermiştir. Bu sonuçlar, TVH 19'un indirekt pulpa kuafajında canlı pulpayı koruyarak rejeneratif tedaviler için umut vadeden ilk sentetik peptitlerden biri olduğunu ortaya koymaktadır (Han & ark., 2021). Güncel bir çalışmada ise TVH-19 içeren pH-duyarlı peptit mikroküre/kitosan kompleksinin antibakteriyel ve mineralizasyonu destekleyici özellikler gösterdiği ve pulpa kuafajında kullanılabilecek potansiyel bir biyomateryal olduğu bildirilmiştir (Wang & ark., 2025).

CPNE-7 (Copine) Proteini

CPNE7 (Copine-7), kalsiyuma bağımlı membran bağlanma özelliği gösteren ve odontoblast farklılaşması ile dentin oluşumunda rol oynayan bir proteindir. Deneysel çalışmalarda CPNE7 uygulamasının odontoblast farklılaşmasını ve mineralizasyonu destekleyerek reaksiyoner dentin oluşumunu uyardığı bildirilmiştir (Y. S. Lee & ark., 2024). Yapılan bir in vivo çalışmada, indirekt pulpa kuafajında CPNE7 uygulamasının fizyolojik tübüler yapıya sahip reaksiyoner dentin oluşumunu desteklediği gösterilmiştir. CPNE7'nin MTA ile birlikte uygulanmasının da düzenli tübüler dentin oluşumunu desteklediği ve bu bulguların CPNE7'nin indirekt pulpa kuafajında potansiyel bir biyoaktif ajan olabileceğini düşündürdüğü bildirilmiştir (Choung & ark., 2016).

İnert Materyaller

Yapılan çalışmalarda, izobütil siyanoakrilat ve trikalsiyum fosfat seramiği direkt pulpa kuafaj materyali olarak değerlendirilmiştir. Bu materyallerin pulpal inflamasyonu azaltabildiği ve değişken düzeylerde dentin köprüsü oluşumunu destekleyebildiği bildirilmiş; ancak klinik kullanımları yaygınlık kazanmamıştır (Qureshi & Soujanya, 2014).

Ozon ve Ozonoid Yağ Uygulamaları

Ozon, güçlü oksitleyici özelliği nedeniyle antibakteriyel, antiviral ve antifungal aktivite gösteren ve diş hekimliğinde antimikrobiyal amaçlarla araştırılan bir ajandır. Ozonlanmış su, ozonlanmış yağ veya gaz formunda uygulanabilmektedir. Çürük dentinde mikrobiyal yükün azaltılmasına katkı sağlayabilmesi ve remineralizasyonu destekleme potansiyeli nedeniyle, ozon uygulamasının vital pulpa tedavilerinde yardımcı bir yaklaşım olarak kullanılabileceği bildirilmektedir (Castillo & ark., 2008; Saini, 2011). Yapılan bir in vivo çalışmada, olgunlaşmamış daimî birinci molar dişlerdeki derin dentin çürüklerinin tedavisinde ozon

ve kalsiyum hidroksit uygulamaları karşılaştırılmış ve klinik başarı açısından gruplar arasında anlamlı bir fark bulunmamıştır. Ayrıca ozon uygulamasının *S. mutans*, *Lactobacillus* spp. ve *Candida albicans* düzeylerinde uygulama sonrasında belirgin azalma sağladığı bildirilmiştir (Safwat & ark., 2017). Benzer şekilde, süt molar dişlerinde gerçekleştirilen başka bir çalışmada ozonlanmış zeytinyağının mikrobiyal yükü azaltmada karşılaştırılan ajanlarla benzer veya daha yüksek etkinlik gösterdiği bildirilmiştir. Bu bulgular, ozonlanmış zeytinyağının indirekt pulpa tedavisinde potansiyel bir yardımcı ajan olabileceğini düşündürmekle birlikte, klinik etkinliğinin doğrulanması için daha geniş örneklemli ve uzun dönem takip çalışmalarına ihtiyaç vardır (Yeşilöz Gökçen & ark., 2019).

Gümüş Diamin Florür

Gümüş diamin florür (SDF), yüksek konsantrasyonda florür ve gümüş iyonları içeren, çürük lezyonlarının ilerlemesini durdurmak amacıyla kullanılan minimal invaziv bir ajandır. Antimikrobiyal etkisinin yanı sıra demineralizasyonu sınırlandırması ve remineralizasyonu desteklemesi, çürük kontrolündeki etkinliğinin temelini oluşturmaktadır. Güncel çalışmalar, özellikle aktif dentin çürüklerinin kontrolünde SDF'nin etkili bir seçenek olduğunu göstermektedir (Russo & ark., 1987; Yamaga, 1972). Deneysel çalışmalar, SDF'nin indirekt uygulamasının belirgin pulpal inflamasyona yol açmadan tersiyer dentin oluşumunu destekleyebileceğini, doğrudan pulpa temasının ise olumsuz doku yanıtına neden olabileceğini göstermektedir. Bu nedenle SDF'nin indirekt pulpa tedavisindeki klinik etkinliğinin ileri çalışmalarla desteklenmesi gerekmektedir (Zaeneldin, Ollie, & Chu, 2022). SDF'nin indirekt uygulanmasının pulpa dokusunda hücresel yanıtı etkileyebildiği ve odontoblastlarda morfolojik ve fonksiyonel değişikliklerle ilişkili olduğu bildirilmiştir. Bu bulgular, SDF'nin doğrudan pulpa teması olmaksızın odontoblastik aktiviteyi ve

tersiyer dentin oluşumunu destekleme potansiyeline sahip olabileceğini düşündürmektedir (Mei & ark., 2017; Seifo & ark., 2020).

Sonuçlar

Pulpa kuafajında kullanılan materyaller, pulpa canlılığının korunması ve dentin-pulpa kompleksinin iyileşmesinin desteklenmesi açısından önemli bir role sahiptir. Günümüzde kalsiyum hidroksit ve hidrolik kalsiyum silikat esaslı materyallerin yanı sıra, biyolojik yanıtı ve doku rejenerasyonunu desteklemeyi amaçlayan yeni biyoaktif ve biyomimetik yaklaşımlar da araştırılmaktadır. Bununla birlikte, mevcut materyallerin her biri biyouyumluluk, fiziksel özellikler ve klinik performans açısından çeşitli avantaj ve sınırlamalara sahiptir. Bu nedenle materyal seçimi; pulpanın klinik durumu, uygulama şekli ve mevcut bilimsel kanıtlar dikkate alınarak yapılmalıdır. Gelecekte yapılacak uzun dönemli ve iyi tasarlanmış klinik çalışmalar, yeni geliştirilen materyallerin güvenilirliğinin ve klinik etkinliğinin belirlenmesi açısından önem taşımaktadır.

Kaynakça

Abu Zeid, S. T., Alamoudi, N. M., Khafagi, M. G., & Abou Neel, E. A. (2017). Chemistry and bioactivity of NeoMTA Plus™ versus MTA Angelus® root repair materials. *Journal of Spectroscopy, 2017*(1), 8736428.

Afkhami, F., Rostami, G., Xu, C., Walsh, L. J., & Peters, O. A. (2023). The application of lasers in vital pulp therapy: a review of histological effects. *Lasers in Medical Science, 38*(1), 215.

AGA, M. N., JONES, P. S., ELLIS, I., TATULLO, P. M., HASSAN, P. M. E. M., & ISLAM, P. M. (2025). Efficacy of stem cells in endodontic regeneration: a systematic review. *Journal of Evidence-Based Dental Practice, 25*(2), 102125.

Aguilar, P., & Linsuwanont, P. (2011). Vital pulp therapy in vital permanent teeth with cariously exposed pulp: a systematic review. *Journal of endodontics, 37*(5), 581-587.

Akhlaghi, N., & Khademi, A. (2015). Outcomes of vital pulp therapy in permanent teeth with different medicaments based on review of the literature. *Dental research journal, 12*(5), 406.

Alqahtani, A. S., Alsuhaibani, N. N., Sulimany, A. M., & Bawazir, O. A. (2023). NeoPUTTY® versus NeoMTA 2® as a pulpotomy medicament for primary molars: a randomized clinical trial. *Pediatric Dentistry, 45*(3), 240-244.

Arslanparcasi, H. F., & Arslanparcasi, M. A. (2026). Erbium, Chromium-Doped Yttrium-Scandium-Gallium-Garnet Laser in Endodontics: A Narrative Review. *Cureus, 18*(5).

Athanassiadis, B., Abbott, P., & Walsh, L. J. (2007). The use of calcium hydroxide, antibiotics and biocides as antimicrobial medicaments in endodontics. *Australian dental journal, 52*, S64-S82.

Ayad, A. S., Benchaabane, S., Daas, T., Smagghe, G., & Loucif-Ayad, W. (2025). Propolis stands out as a multifaceted

natural product: meta-analysis on its sources, bioactivities, applications, and future perspectives. *Life, 15*(5), 764.

Banoee, M., Seif, S., Nazari, Z. E., Jafari-Fesharaki, P., Shahverdi, H. R., Moballegh, A., . . . Shahverdi, A. R. (2010). ZnO nanoparticles enhanced antibacterial activity of ciprofloxacin against Staphylococcus aureus and Escherichia coli. *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials, 93*(2), 557-561.

Barrieshi-Nusair, K. M., & Qudeimat, M. A. (2006). A prospective clinical study of mineral trioxide aggregate for partial pulpotomy in cariously exposed permanent teeth. *Journal of Endodontics, 32*(8), 731-735.

Begue-Kirn, C., Smith, A. J., Loriot, M., Kupferle, C., Ruch, J., & Lesot, H. (1994). Comparative analysis of TGFsss, BMPs, IGF1, msxs, fibronectin, osteonectin and bone sialoprotein gene expression during normal and in vitro-induced odontoblast differentiation. *International Journal of Developmental Biology, 38*, 405-405.

Bjørndal, L., Simon, S., Tomson, P., & Duncan, H. (2019). Management of deep caries and the exposed pulp. *International endodontic journal, 52*(7), 949-973.

Bortoluzzi, E. A., Araújo, G. S., Tanomaru, J. M. G., & Tanomaru-Filho, M. (2007). Marginal gingiva discoloration by gray MTA: a case report. *Journal of endodontics, 33*(3), 325-327.

Cabrera-Fernández, A., Dominguez-Dominguez, L., Pérez-Pérez, A., Santos, J. M. M., Díaz-Cuenca, A., Torres-Lagares, D., . . . Martín-González, J. (2026). Clinical and Radiographic Outcomes of Vital Pulp Therapy Using Resin-Modified Versus Conventional Calcium Silicate-Based Materials: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Journal of Functional Biomaterials, 17*(1), 32.

Camargo, S., Camargo, C., Hiller, K. A., Rode, S., Schweikl, H., & Schmalz, G. (2009). Cytotoxicity and genotoxicity of pulp

capping materials in two cell lines. *International endodontic journal, 42*(3), 227-237.

Camilleri, J. (2008). The chemical composition of mineral trioxide aggregate. *Journal of Conservative Dentistry and Endodontics, 11*(4), 141-143.

Camilleri, J. (2015). Staining potential of Neo MTA Plus, MTA Plus, and Biodentine used for pulpotomy procedures. *Journal of endodontics, 41*(7), 1139-1145.

Camilleri, J., Sorrentino, F., & Damidot, D. (2013). Investigation of the hydration and bioactivity of radiopacified tricalcium silicate cement, Biodentine and MTA Angelus. *Dental materials, 29*(5), 580-593.

Camilleri, J., Sorrentino, F., & Damidot, D. (2015). Characterization of un-hydrated and hydrated BioAggregate™ and MTA Angelus™. *Clinical oral investigations, 19*(3), 689-698.

Castillo, A., Galindo-Moreno, P., Avila, G., Valderrama, M., Liébana, J., & Baca, P. (2008). In vitro reduction of mutans streptococci by means of ozone gas application. *Quintessence International, 39*(10).

Cavalcanti, B., Rode, S. d. M., & Marques, M. M. (2005). Cytotoxicity of substances leached or dissolved from pulp capping materials. *International endodontic journal, 38*(8), 505-509.

Chen, L., & Suh, B. I. (2017). Cytotoxicity and biocompatibility of resin-free and resin-modified direct pulp capping materials: A state-of-the-art review. *Dental materials journal, 36*(1), 1-7.

Choi, Y., Park, S.-J., Lee, S.-H., Hwang, Y.-C., Yu, M.-K., & Min, K.-S. (2013). Biological effects and washout resistance of a newly developed fast-setting pozzolan cement. *Journal of endodontics, 39*(4), 467-472.

Choung, H., Lee, D., Lee, J.-H., Shon, W., Lee, J.-H., Ku, Y., & Park, J. (2016). Tertiary dentin formation after indirect pulp capping using protein CPNE7. *Journal of Dental Research, 95*(8), 906-912.

Chung, C.-R., Kim, E., & Shin, S.-J. (2010). Biocompatibility of bioaggregate cement on human pulp and periodontal ligament (PDL) derived cells. *Journal of Korean academy of conservative dentistry, 35*(6), 473-478.

Colloc, T. N., & Tomson, P. L. (2025). Vital pulp therapies in permanent teeth: what, when, where, who, why and how? Vital pulp therapies in permanent teeth: what, when, where, who, why and how? *British Dental Journal, 238*(7), 458-468.

Cox, C., Sübay, R., Ostro, E., Suzuki, S., & Suzuki, S. (1996). Tunnel defects in dentin bridges: their formation following direct pulp capping. *Operative dentistry, 21*(1), 4-11.

Cruz Hondares, T., Hao, X., Zhao, Y., Lin, Y., Napierala, D., Jackson, J. G., & Zhang, P. (2024). Antibacterial, biocompatible, and mineralization-inducing properties of calcium silicate-based cements. *International Journal of Paediatric Dentistry, 34*(6), 843-852.

Cui, C., Zhou, X., Chen, X., Fan, M., Bian, Z., & Chen, Z. (2009). The adverse effect of self-etching adhesive systems on dental pulp after direct pulp capping. *Quintessence International, 40*(6).

Dammaschke, T. (2008). The history of direct pulp capping. *Journal of the History of Dentistry, 56*(1), 9-23.

Dammaschke, T., Leidinger, J., & Schäfer, E. (2010). Long-term evaluation of direct pulp capping—treatment outcomes over an average period of 6.1 years. *Clinical oral investigations, 14*(5), 559-567.

Dammaschke, T., Nowicka, A., Lipski, M., & Ricucci, D. (2019). Histological evaluation of hard tissue formation after direct pulp capping with a fast-setting mineral trioxide aggregate

(RetroMTA) in humans. *Clinical oral investigations, 23*(12), 4289-4299.

Dawood, A. E., Parashos, P., Wong, R. H., Reynolds, E. C., & Manton, D. J. (2017). Calcium silicate-based cements: composition, properties, and clinical applications. *Journal of investigative and clinical dentistry, 8*(2), e12195.

de Souza Costa, C., Vaerten, M., Edwards, C., & Hanks, C. (1999). Cytotoxic effects of current dental adhesive systems on immortalized odontoblast cell line MDPC-23. *Dental Materials, 15*(6), 434-441.

de Souza Costa, C. A., Giro, E. M. A., do Nascimento, A. B. L., Teixeira, H. M., & Hebling, J. (2003). Short-term evaluation of the pulpo-dentin complex response to a resin-modified glass-ionomer cement and a bonding agent applied in deep cavities. *Dental Materials, 19*(8), 739-746.

Decup, F., Six, N., Palmier, B., Buch, D., Lasfargues, J., Salih, E., & Goldberg, M. (2000). Bone sialoprotein-induced reparative dentinogenesis in the pulp of rat's molar. *Clinical oral investigations, 4*(2), 110-119.

Deepa, V. L., Dhamaraju, B., Bollu, I. P., & Balaji, T. S. (2016). Shear bond strength evaluation of resin composite bonded to three different liners: TheraCal LC, Biodentine, and resin-modified glass ionomer cement using universal adhesive: an: in vitro: study. *Journal of Conservative Dentistry and Endodontics, 19*(2), 166-170.

Del Giudice, C., Iaculli, F., Rengo, C., Salucci, A., Spagnuolo, G., Riccitiello, F., . . . Di Giorgio, G. (2025). The effect of simvastatin on odontoblastic differentiation of human dental pulp stem cells: an in vitro study. *Dentistry Journal, 13*(9), 428.

Dick, H., & Carmichael, D. (1980). Reconstituted antigen-poor collagen preparations as potential pulp-capping agents. *Journal of endodontics, 6*(7), 641-644.

Didilescu, A. C., Cristache, C. M., Andrei, M., Voicu, G., & Perlea, P. (2018). The effect of dental pulp-capping materials on hard-tissue barrier formation: A systematic review and meta-analysis. *The Journal of the American Dental Association, 149*(10), 903-917. e904.

Do Nascimento, A., Fontana, U., Teixeira, H., & Costa, C. (2000). Biocompatibility of a resin-modified glass-ionomer cement applied as pulp capping in human teeth. *American Journal of Dentistry, 13*(1), 28-34.

Erdem, A. P., Guven, Y., Balli, B., Ilhan, B., Sepet, E., Ulukapi, I., & Aktoren, O. (2011). Success rates of mineral trioxide aggregate, ferric sulfate, and formocresol pulpotomies: a 24-month study. *Pediatric dentistry, 33*(2), 165-170.

Eskandarizadeh, A., Shahpasandzadeh, M. H., Shahpasandzadeh, M., Torabi, M., & Parirokh, M. (2011). A comparative study on dental pulp response to calcium hydroxide, white and grey mineral trioxide aggregate as pulp capping agents. *Journal of Conservative Dentistry and Endodontics, 14*(4), 351-355.

Fava, L., & Saunders, W. (1999). Calcium hydroxide pastes: classification and clinical indications. *International endodontic journal, 32*(4), 257-282.

Felman, D., & Parashos, P. (2013). Coronal tooth discoloration and white mineral trioxide aggregate. *Journal of endodontics, 39*(4), 484-487.

Furey, A., Hjelmhaug, J., & Lobner, D. (2010). Toxicity of Flow Line, Durafill VS, and Dycal to dental pulp cells: effects of growth factors. *Journal of endodontics, 36*(7), 1149-1153.

Galler, K. M., Weber, M., Korkmaz, Y., Widbiller, M., & Feuerer, M. (2021). Inflammatory response mechanisms of the dentine–pulp complex and the periapical tissues. *International journal of molecular sciences, 22*(3), 1480.

Gandolfi, M. G., Siboni, F., & Prati, C. (2012). Chemical–physical properties of TheraCal, a novel light-curable MTA-like

material for pulp capping. *International endodontic journal, 45*(6), 571-579.

Gardner, D. E., Mitchell, D. F., & Mcdonald, R. E. (1971). Treatment of pulps of monkeys with vancomycin and calcium hydroxide. *Journal of dental research, 50*(5), 1273-1277.

Ghoddusi, J., Forghani, M., & Parisay, I. (2013). New approaches in vital pulp therapy in permanent teeth. *Iranian endodontic journal, 9*(1), 15.

Giraud, T., Jeanneau, C., Rombouts, C., Bakhtiar, H., Laurent, P., & About, I. (2019). Pulp capping materials modulate the balance between inflammation and regeneration. *Dental Materials, 35*(1), 24-35.

Güdül, K. F., Tonga, G., & Hatirli, H. (2026). Physicochemical characterization of a recently developed resin-based calcium silicate cement compared to established pulp capping materials. *Scientific Reports, 16*(1), 12388.

Han, S., Peng, X., Ding, L., Lu, J., Liu, Z., Wang, K., & Zhang, L. (2021). TVH-19, a synthetic peptide, induces mineralization of dental pulp cells in vitro and formation of tertiary dentin in vivo. *Biochemical and biophysical research communications, 534*, 837-842.

Hanna, S. N., & Prichard, J. (2020). Vital Pulp Therapy an Insight Over the Available Literature and Future Expectations. *European endodontic journal, 5*(1), 46-53.

Hayashi, Y., Imai, M., Yanagiguchi, K., Viloria, I. L., & Ikeda, T. (1999). Hydroxyapatite applied as direct pulp capping medicine substitutes for osteodentin. *Journal of endodontics, 25*(4), 225-229.

Hegde, S., Sowmya, B., Mathew, S., Bhandi, S. H., Nagaraja, S., & Dinesh, K. (2017). Clinical evaluation of mineral trioxide aggregate and biodentine as direct pulp capping agents in carious teeth. *Journal of Conservative Dentistry and Endodontics, 20*(2), 91-95.

Hilton, T. J. (2009). Keys to clinical success with pulp capping: a review of the literature. *Operative dentistry, 34*(5), 615-625.

Hu, C.-C., Zhang, C., Qian, Q., & Tatum, N. B. (1998). Reparative dentin formation in rat molars after direct pulp capping with growth factors. *Journal of Endodontics, 24*(11), 744-751.

Hu, S., Meyer, B., & Duggal, M. (2018). A silver renaissance in dentistry. *European Archives of Paediatric Dentistry, 19*(4), 221-227.

Jean, A., Kerebel, B., Kerebel, L.-M., Legeros, R. Z., & Hamel, H. (1988). Effects of various calcium phosphate biomaterials on reparative dentin bridge formation. *Journal of Endodontics, 14*(2), 83-87.

Jefferies, S. R. (2014). Bioactive and biomimetic restorative materials: a comprehensive review. Part I. *Journal of esthetic and restorative dentistry, 26*(1), 14-26.

Ji, Y.-M., Jeon, S. H., Park, J.-Y., Chung, J.-H., Choung, Y.-H., & Choung, P.-H. (2010). Dental stem cell therapy with calcium hydroxide in dental pulp capping. *Tissue Engineering Part A, 16*(6), 1823-1833.

Jontell, M., Hanks, C. T., Bratel, J., & Bergenholtz, G. (1995). Effects of unpolymerized resin components on the function of accessory cells derived from the rat incisor pulp. *Journal of dental research, 74*(5), 1162-1167.

Jun, S.-K., Lee, J.-H., & Lee, H.-H. (2017). The biomineralization of a bioactive glass-incorporated light-curable pulp capping material using human dental pulp stem cells. *BioMed Research International, 2017*(1), 2495282.

Jung, G.-Y., Park, Y.-J., & Han, J.-S. (2010). Effects of HA released calcium ion on osteoblast differentiation. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine, 21*(5), 1649-1654.

Kafetzi, C. A., & Durutürk, L. (2014). Derin dentin çürüklü süt ve genç daimi dişlerde direkt ve indirek pulpa tedavisi. *European Annals of Dental Sciences, 41*(3), 183-190.

Kaup, M., Schäfer, E., & Dammaschke, T. (2015). An in vitro study of different material properties of Biodentine compared to ProRoot MTA. *Head & face medicine, 11*(1), 16.

Kaur, M., Singh, H., Dhillon, J. S., Batra, M., & Saini, M. (2017). MTA versus Biodentine: review of literature with a comparative analysis. *Journal of clinical and diagnostic research: JCDR, 11*(8), ZG01.

Kayaci, Ş. T., Yazici, Z. S., Kınıkoğlu, İ., Özüdoğru, S., & Arslan, H. (2024). A randomized controlled clinical trial of the performance of three bioactive endodontic cements in primary molar teeth diagnosed with reversible pulpitis: 1-year follow-up study. *Journal of Dentistry, 150*, 105378.

Khalil, I., Naaman, A., & Camilleri, J. (2015). Investigation of a novel mechanically mixed mineral trioxide aggregate (MM-MTA™). *International Endodontic Journal, 48*(8), 757-767.

Khan, A. A., Sun, X., & Hargreaves, K. M. (2008). Effect of calcium hydroxide on proinflammatory cytokines and neuropeptides. *Journal of endodontics, 34*(11), 1360-1363.

Kiatwateeratana, T., Kintarak, S., Piwat, S., Chankanka, O., Kamaolmatyakul, S., & Thearmontree, A. (2009). Partial pulpotomy on caries-free teeth using enamel matrix derivative or calcium hydroxide: a randomized controlled trial. *International Endodontic Journal, 42*(7), 584-592.

Kim, S.-J., Min, K.-S., Ryu, H.-W., Lee, H.-J., & Kim, E.-C. (2010). The role of heme oxygenase-1 in the proliferation and odontoblastic differentiation of human dental pulp cells. *Journal of Endodontics, 36*(8), 1326-1331.

Kodonas, K., Fardi, A., Gogos, C., & Economides, N. (2021). Scientometric analysis of vital pulp therapy studies. *International Endodontic Journal, 54*(2), 220-230.

Komabayashi, T., Zhu, Q., Eberhart, R., & Imai, Y. (2016). Current status of direct pulp-capping materials for permanent teeth. *Dental materials journal, 35*(1), 1-12.

Kunert, M., & Lukomska-Szymanska, M. (2020). Bio-inductive materials in direct and indirect pulp capping—a review article. *Materials, 13*(5), 1204.

Kunert, M., Rozpedek-Kaminska, W., Galita, G., Sauro, S., Bourgi, R., Hardan, L., . . . Lukomska-Szymanska, M. (2022). The cytotoxicity and genotoxicity of bioactive dental materials. *Cells, 11*(20), 3238.

Lardani, L., Derchi, G., Marchio, V., & Carli, E. (2022). One-year clinical performance of Activa™ bioactive-restorative composite in primary molars. *Children, 9*(3), 433.

Laurent, P., Camps, J., De Méo, M., Déjou, J., & About, I. (2008). Induction of specific cell responses to a Ca3SiO5-based posterior restorative material. *Dental materials, 24*(11), 1486-1494.

Lee, M., Kang, C.-M., Song, J. S., Shin, Y., Kim, S., Kim, S.-O., & Choi, H.-J. (2017). Biological efficacy of two mineral trioxide aggregate (MTA)-based materials in a canine model of pulpotomy. *Dental Materials Journal, 36*(1), 41-47.

Lee, Y. S., Park, Y. H., Hwang, G., Seo, H., Ki, S. H., Bai, S., . . . Lee, D. S. (2024). Cpne7 deficiency induces cellular senescence and premature aging of dental pulp. *Aging Cell, 23*(3), e14061.

Lianjia, Y., YUHAO, G., & WHITE, F. H. (1993). Bovine bone morphogenetic protein-induced dentinogenesis. *Clinical Orthopaedics and Related Research (1976-2007), 295*, 305-312.

Limjeerajarus, C. N., Chanarattanubol, T., Trongkij, P., Rujiwanichkul, M., & Pavasant, P. (2014). Iloprost induces tertiary dentin formation. *Journal of endodontics, 40*(11), 1784-1790.

Loushine, B. A., Bryan, T. E., Looney, S. W., Gillen, B. M., Loushine, R. J., Weller, R. N., . . . Tay, F. R. (2011). Setting properties and cytotoxicity evaluation of a premixed bioceramic root canal sealer. *Journal of endodontics, 37*(5), 673-677.

Lovschall, H., Fejerskov, O., & Flyvbjerg, A. (2001). Pulp-capping with recombinant human insulin-like growth factor I (rhIGF-I) in rat molars. *Advances in Dental Research, 15*(1), 108-112.

Ma, J., Shen, Y., Stojicic, S., & Haapasalo, M. (2011). Biocompatibility of two novel root repair materials. *Journal of endodontics, 37*(6), 793-798.

Mahgoub, N., Alqadasi, B., Aldhorae, K., Assiry, A., Altawili, Z. M., & Hong, T. (2019). Comparison between iRoot BP Plus (EndoSequence Root Repair Material) and mineral trioxide aggregate as pulp-capping agents: a systematic review. *Journal of International Society of Preventive and Community Dentistry, 9*(6), 542-552.

Matsuo, T., Nakanishi, T., Shimizu, H., & Ebisu, S. (1996). A clinical study of direct pulp capping applied to carious-exposed pulps. *Journal of endodontics, 22*(10), 551-556.

Mei, M. L., Nudelman, F., Marzec, B., Walker, J., Lo, E., Walls, A., & Chu, C.-H. (2017). Formation of fluorohydroxyapatite with silver diamine fluoride. *Journal of dental research, 96*(10), 1122-1128.

Min, K.-S., Lee, H.-J., Kim, S.-H., Lee, S.-K., Kim, H.-R., Pae, H.-O., . . . Kim, E.-C. (2008). Hydrogen peroxide induces heme oxygenase–1 and dentin sialophosphoprotein mRNA in human pulp cells. *Journal of endodontics, 34*(8), 983-989.

Mohammadi, Z., & Dummer, P. M. H. (2011). Properties and applications of calcium hydroxide in endodontics and dental traumatology. *International endodontic journal, 44*(8), 697-730.

Mora, A., García-Bernal, D., Rodríguez-Lozano, F. J., Ghilotti, J., Lozano, A., & López-García, S. (2025). Biocompatibility and osteogenic potential of novel tricalcium silicate-based materials in human dental pulp stem cells: Advancing vital pulp therapies. *Dental Materials, 41*(6), 644-657.

Mutar, M. T., & Mahdee, A. F. (2024). Different pulp capping agents and their effect on pulp inflammatory response: A narrative review. *The Saudi Dental Journal, 36*(10), 1295-1306.

Nagui Hanna, S., Pérez Alfayate, R., & Prichard, J. (2020). Vital Pulp Therapy an Insight Over the Available Literature and Future Expectations.

Nakamura, S., Yamada, Y., Katagiri, W., Sugito, T., Ito, K., & Ueda, M. (2009). Stem cell proliferation pathways comparison between human exfoliated deciduous teeth and dental pulp stem cells by gene expression profile from promising dental pulp. *Journal of endodontics, 35*(11), 1536-1542.

Nakamura, Y., Hammarström, L., Lundberg, E., Ekdahl, H., Matsumoto, K., Gestrelius, S., & Lyngstadaas, S. (2001). Enamel matrix derivative promotes reparative processes in the dental pulp. *Advances in Dental Research, 15*(1), 105-107.

Niinuma, A. (1999). Newly developed resinous direct pulp capping agent containing calcium hydroxide (MTYA1-Ca). *International Endodontic Journal, 32*(6), 475-483.

Nosrat, & Nosrat. (1998). Reparative hard tissue formation following calcium hydroxide application after partial pulpotomy in cariously exposed pulps of permanent teeth. *International Endodontic Journal, 31*(3), 221-226.

Oğlakçı, B., Arhun, N., & Tuncer, D. (2016). RESTORATİF DİŞ TEDAVİSİNDE PULPA KAPLAMALARI. *Atatürk Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi Dergisi, 26*(4).

Okamoto, Y., Sonoyama, W., Ono, M., Akiyama, K., Fujisawa, T., Oshima, M., . . . Shi, S. (2009). Simvastatin induces the

odontogenic differentiation of human dental pulp stem cells in vitro and in vivo. *Journal of endodontics, 35*(3), 367-372.

Olivi, G., Genovese, M., Maturo, P., & Docimo, R. (2007). Pulp capping: advantages of using laser technology. *Eur J Paediatr Dent, 8*(2), 89-95.

Olivi, G., & Genovese, M. D. (2006). Erbium chromium laser in pulp capping treatment. *Journal of Oral Laser Applications, 6*(4).

Omer, S. M. M., Elsaied, H. A. F., Alghonemy, W. Y., & El-Desouky, S. S. (2025). Histopathological and immunohistochemical characterization of pulp tissue reaction to ACTIVA BioACTIVE base/liner in primary teeth pulpotomy: a randomized clinical trial. *BMC Oral Health, 25*(1), 885.

Parirokh, M., Torabinejad, M., & Dummer, P. (2018). Mineral trioxide aggregate and other bioactive endodontic cements: an updated overview–part I: vital pulp therapy. *International endodontic journal, 51*(2), 177-205.

Parolia, A., Kundabala, M., Rao, N., Acharya, S., Agrawal, P., Mohan, M., & Thomas, M. (2010). A comparative histological analysis of human pulp following direct pulp capping with Propolis, mineral trioxide aggregate and Dycal. *Australian dental journal, 55*(1), 59-64.

Pedano, M. S., Li, X., Yoshihara, K., Landuyt, K. V., & Van Meerbeek, B. (2020). Cytotoxicity and bioactivity of dental pulp-capping agents towards human tooth-pulp cells: a systematic review of in-vitro studies and meta-analysis of randomized and controlled clinical trials. *Materials, 13*(12), 2670.

Peres, M. A., Macpherson, L. M., Weyant, R. J., Daly, B., Venturelli, R., Mathur, M. R., . . . Kearns, C. (2019). Oral diseases: a global public health challenge. *The Lancet, 394*(10194), 249-260.

Porenczuk, A., Jankiewicz, B., Naurecka, M., Bartosewicz, B., Sierakowski, B., Gozdowski, D., . . . Mielczarek, A. (2019).

A comparison of the remineralizing potential of dental restorative materials by analyzing their fluoride release profiles. *Advances in Clinical and Experimental Medicine, 28*(6), 815-823.

Qureshi, A., & Soujanya, E. (2014). Recent advances in pulp capping materials: an overview. *Journal of clinical and diagnostic research: JCDR, 8*(1), 316.

Rajasekharan, S., Martens, L., Cauwels, R., & Verbeeck, R. (2014). Biodentine™ material characteristics and clinical applications: a review of the literature. *European Archives of Paediatric Dentistry, 15*(3), 147-158.

Rao, Q., Kuang, J., Mao, C., Dai, J., Hu, L., Lei, Z., . . . Yuan, G. (2020). Comparison of iRoot BP plus and calcium hydroxide as pulpotomy materials in permanent incisors with complicated crown fractures: a retrospective study. *Journal of Endodontics, 46*(3), 352-357.

Rashid, F., Shiba, H., Mizuno, N., Mouri, Y., Fujita, T., Shinohara, H., . . . Kurihara, H. (2003). The effect of extracellular calcium ion on gene expression of bone-related proteins in human pulp cells. *Journal of Endodontics, 29*(2), 104-107.

Ruch, J.-V., & Lesota, H. (1995). Reactionary dentinogenesis. *Int. J. Dev. Biol, 39*, 273-280.

Ruhé, P. Q., Hedberg-Dirk, E. L., Padron, N. T., Spauwen, P. H., Jansen, J. A., & Mikos, A. G. (2006). Porous poly (DL-lactic-co-glycolic acid)/calcium phosphate cement composite for reconstruction of bone defects. *Tissue engineering, 12*(4), 789-800.

Russo, M., Komatsu, J., Takayama, S., Holland Júnior, C., Sundfeld, R., Mestrener, S., . . . Quintella, L. (1987). Silver diamine fluoride. Pulp response to application of a 10% solution to dentin. *RGO, 35*(4), 264-266.

RUTHERFORD, B. (1995). Role of osteogenic protein in reparative and reactionary dentin. *Dentin/Pulp Complex*.

Sabeti, M., Huang, Y., Chung, Y. J., & Azarpazhooh, A. (2021). Prognosis of vital pulp therapy on permanent dentition: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *Journal of Endodontics, 47*(11), 1683-1695.

Safwat, O., Elkateb, M., Dowidar, K., & El Meligy, O. (2017). Clinical evaluation of ozone on dentinal lesions in young permanent molars using the stepwise excavation. *Journal of Clinical Pediatric Dentistry, 41*(6), 429-441.

Saini, R. (2011). Ozone therapy in dentistry: A strategic review. *Journal of natural science, biology, and medicine, 2*(2), 151.

Schuurs, A., Gruythuysen, R., & Wesselink, P. (2000). Pulp capping with adhesive resin-based composite vs. calcium hydroxide: a review. *Dental Traumatology: Review article, 16*(6), 240-250.

Seifo, N., Robertson, M., MacLean, J., Blain, K., Grosse, S., Milne, R., . . . Innes, N. (2020). The use of silver diamine fluoride (SDF) in dental practice. *British Dental Journal, 228*(2), 75-81.

Serrano, A., Silva, E. J. N. L., Duncan, H. F., Villar, A. J. C., Loroño, G., Estévez, R., . . . Alfayate, R. P. Two-Year Outcome of Partial Pulpotomy Using Mineral Trioxide Aggregate or a Premixed Calcium Silicate Cement: A Randomized Clinical Trial. *International endodontic journal*.

Shi, S., Bao, Z., Liu, Y., Zhang, D., Chen, X., Jiang, L., & Zhong, M. (2016). Comparison of in vivo dental pulp responses to capping with iR oot BP Plus and mineral trioxide aggregate. *International endodontic journal, 49*(2), 154-160.

Siboni, F., Taddei, P., Prati, C., & Gandolfi, M. G. (2017). Properties of Neo MTA Plus and MTA Plus cements for endodontics. *International endodontic journal, 50*, e83-e94.

Sidhu, S. K., & Nicholson, J. W. (2016). A review of glass-ionomer cements for clinical dentistry. *Journal of functional biomaterials, 7*(3), 16.

Sonmez, I., & Sonmez, H. (2007). Long-term follow-up of a complicated crown fracture treated by partial pulpotomy. *International endodontic journal, 40*(5), 398-403.

subcommittee, A. A. o. P. D. C. A. C.-P. T. (2008). American Academy on Pediatric Dentistry Council on Clinical Affairs: Guideline on pulp therapy for primary and young permanent teeth. *Pediatr Dent, 30*, 170-174.

Tada, H., Nemoto, E., Kanaya, S., Hamaji, N., Sato, H., & Shimauchi, H. (2010). Elevated extracellular calcium increases expression of bone morphogenetic protein-2 gene via a calcium channel and ERK pathway in human dental pulp cells. *Biochemical and biophysical research communications, 394*(4), 1093-1097.

Tziafas, D. (2004). The future role of a molecular approach to pulp-dentinal regeneration. *Caries research, 38*(3), 314-320.

Vallecillo-Rivas, M., Fernández-Romero, E., Pérez-Segura, M., Toledano, R., Amar-Zetouni, A., Toledano, M., & Vallecillo, C. (2024). Efficacy of topical application of corticosteroids in the remineralization of dental pulp tissue. A systematic review of the literature. *Journal of Dentistry, 150*, 105333.

Vallés, M., Roig, M., Duran-Sindreu, F., Martínez, S., & Mercadé, M. (2015). Color stability of teeth restored with Biodentine: a 6-month in vitro study. *Journal of endodontics, 41*(7), 1157-1160.

Verfaillie, C. M. (2002). Adult stem cells: assessing the case for pluripotency. *Trends in cell biology, 12*(11), 502-508.

Wang, L., Ou, Y., Wang, J., Ding, L., Han, S., & Zhang, L. (2025). Two-stepped pH-responsive peptide microsphere/carboxymethyl chitosan complex: enhanced protection of an inflamed dentin–pulp complex. *Journal of Materials Chemistry B, 13*(16), 4879-4892.

Watts, A., & Paterson, R. (1981). Cellular responses in the dental pulp: a review. *International endodontic journal, 14*(1).

Watts, A., & Paterson, R. (1987). Pulpal response to a zinc oxide–eugenol cement. *International Endodontic Journal, 20*(2), 82-86.

Wei, X., Yang, M., Yue, L., Huang, D., Zhou, X., Wang, X., . . . Wang, H. (2022). Expert consensus on regenerative endodontic procedures. *International Journal of Oral Science, 14*(1), 55.

Yamaga, R. (1972). Diamine silver fluoride and its clinical application. *J Osaka Univ Dent Sch, 12*, 1-20.

Yang, I.-S., Lee, D.-S., Park, J.-T., Kim, H.-J., Son, H.-H., & Park, J.-C. (2010). Tertiary dentin formation after direct pulp capping with odontogenic ameloblast-associated protein in rat teeth. *Journal of Endodontics, 36*(12), 1956-1962.

Yeşilöz Gökçen, E., Aksoy, M., Orhan, A., Özçelik, B., & Tulga Öz, F. (2019). Assessment of the effectiveness of ozone theraphy and an antibacterial bonding agent on the cavity disinfection of deciduous teeth: An in vivo study. *Cumhuriyet Dental Journal, 22*(4).

Yoldaş, S. E., Bani, M., Atabek, D., & Bodur, H. (2016). Comparison of the potential discoloration effect of bioaggregate, biodentine, and white mineral trioxide aggregate on bovine teeth: in vitro research. *Journal of endodontics, 42*(12), 1815-1818.

Zaeneldin, A., Ollie, Y. Y., & Chu, C.-H. (2022). Effect of silver diamine fluoride on vital dental pulp: A systematic review. *Journal of dentistry, 119*, 104066.

Zarrabi, M. H., Javidi, M., Jafarian, A. H., & Joushan, B. (2010). Histologic assessment of human pulp response to capping with mineral trioxide aggregate and a novel endodontic cement. *Journal of endodontics, 36*(11), 1778-1781.

BÖLÜM 5

KAVİTE DEZENFEKTANLARI: ANTİMİKROBİYAL ETKİNLİK VE ADEZİV BAĞLANMA AÇISINDAN GÜNCEL YAKLAŞIMLAR

DR. ÖĞR. ÜYESİ SONGÜL ÖZDÖGEN

Harran Üniversitesi, Diş Hekimliği Fakültesi, Restoratif Diş Tedavisi Anabilim Dalı. ORCID: 0009-0008-6952-1345

Giriş

Restoratif diş tedavisinde kavite preparasyonu, enfekte ve yapısal olarak yetersiz dokuların uzaklaştırılması ile restorasyonun biyomekanik gereksinimlerinin karşılanmasını amaçlar. Bununla birlikte preparasyon tamamlandığında dentin yüzeyinde ve dentin tübüllerinde mikroorganizmaların kalabilmesi, ek antimikrobiyal işlemlere yönelik ilgiyi sürdürmektedir. Kavite dezenfektanları, restorasyon öncesinde mikrobiyal yükü azaltmak amacıyla kullanılan kimyasal veya fiziksel uygulamalardır. Ancak dezenfeksiyonun potansiyel yararı, kullanılan adeziv sistemin dentinle etkileşimini olumsuz etkilememelidir (Coelho et al., 2021; Elkassas et al., 2014).

Kavite dezenfeksiyonunu değerlendirirken üç farklı sonlanımın birbirinden ayrılması gerekir: laboratuvar ortamında

antimikrobiyal etki, kısa ve uzun dönem bağlanma performansı ve restorasyonun klinik başarısı. Bir ajanın mikroorganizmaları baskılaması, aynı ajanın restorasyonun ömrünü uzattığını tek başına göstermez. Üstelik mevcut çalışmaların önemli bir kısmı çekilmiş dişler üzerinde gerçekleştirilmiş olup uygulama süresi, konsantrasyon, dentin koşulları ve adeziv protokol bakımından heterojendir (Coelho et al., 2021).

Kavite Dezenfeksiyonunun Adeziv Restorasyonlarla İlişkisi

Dentin; organik kollajen matriksi, mineral fazı, dentin tübülleri ve değişken nem içeriği nedeniyle mineye göre daha karmaşık bir adeziv substrattır. Asitleme, yıkama, kurutma ve primer uygulaması gibi basamakların yanı sıra dezenfektanın dentin yüzeyinde bıraktığı artıklar da infiltrasyonu ve polimerizasyonu etkileyebilir. Bu nedenle aynı dezenfektanın etch-and-rinse ve self-etch sistemlerde farklı sonuçlar vermesi beklenebilir. Elkassas ve arkadaşlarının (2014) karşılaştırmalı çalışması, farklı dezenfektanların mikromakaslama bağlanma dayanımına etkisinin kullanılan adeziv yaklaşımla ilişkili olduğunu göstermiştir.

Bağlanma dayanımı sonuçları değerlendirilirken testin türü, örnek hazırlama yöntemi, yaşlandırma protokolü ve deney birimi de dikkate alınmalıdır. İlk bağlanma dayanımının korunması, hidrolitik veya enzimatik yaşlanma sonrasında hibrit tabakanın stabil kalacağı anlamına gelmez. Bu nedenle uzun dönem dayanıklılık verileri ve klinik sonuçlar, yalnızca başlangıç değerlerine dayanan yorumlardan daha güçlü bir kanıt düzeyi sağlar (Carrilho et al., 2007; Coelho et al., 2021).

Klorheksidin

Klorheksidin, katyonik bisbiguanid yapısında ve geniş antimikrobiyal etki spektrumuna sahip bir ajandır. Dentin yüzeyinin restorasyon öncesi dezenfeksiyonunda çoğunlukla %2'lik formülasyonları araştırılmıştır. Antimikrobiyal özelliğinin yanında,

kollajen matriksinin yıkımında rol oynayan matriks metalloproteinazların (MMP) aktivitesini baskılayabilmesi, klorheksidini adeziv diş hekimliği açısından ayrıca önemli kılmaktadır. Gendron ve arkadaşları (1999), klorheksidinin MMP-2, MMP-8 ve MMP-9 aktivitelerini deneysel koşullarda inhibe edebildiğini bildirmiştir.

Carrilho ve arkadaşlarının (2007) in vitro çalışmasında, asitleme sonrasında uygulanan %2 klorheksidin ile altı aylık depolama sonunda rezin–dentin bağlanmasının daha iyi korunduğu gösterilmiştir. Bu bulgu, klorheksidinin yalnızca bir dezenfektan olarak değil, hibrit tabakanın enzimatik bozunmasını sınırlamaya yönelik bir yüzey işlemi olarak da incelenmesine yol açmıştır. Bununla birlikte etkinin büyüklüğü ve sürekliliği adeziv materyale, uygulama sırasına ve çalışma koşullarına göre değişebilmektedir.

Klorheksidinin her adeziv protokolde bağlanmayı artırdığı sonucuna varılmamalıdır. Bazı deneysel çalışmalarda belirli self-etch sistemlerle bağlanma dayanımında azalma gözlenirken diğer protokollerde farklı sonuçlar bildirilmiştir (Elkassas et al., 2014; Sharma et al., 2011). Sistematik değerlendirmeler, klorheksidinin dentin adezyonunun korunması bakımından görece güçlü bir araştırma geçmişine sahip olduğunu, ancak rutin kullanımın tüm klinik durumlarda zorunlu olduğunun gösterilmediğini vurgulamaktadır (Coelho et al., 2021).

Kitosan

Kitosan, kitinden elde edilen, amino grupları içeren biyopolimerik bir materyaldir. Pozitif yüklü gruplarının mikrobiyal hücre yüzeyleriyle etkileşimi antimikrobiyal potansiyelinin temel mekanizmalarından biridir. Dentin yüzeyinde kullanımı; dezenfeksiyon, kollajen matriksinin modifikasyonu ve adeziv ara yüzün dayanıklılığını artırma olasılıkları nedeniyle araştırılmaktadır.

Bununla birlikte kitosanın molekül ağırlığı, deasetilasyon derecesi, konsantrasyonu ve uygulama ortamı sonuçları etkileyebilir.

Baena ve arkadaşları (2020), kitosanın çapraz bağlayıcı olarak kullanılmasının MMP aktivitesi ve farklı adeziv sistemlerde bağ stabilitesi üzerindeki etkilerini incelemiştir. Çalışmada %0,1 kitosan uygulaması MMP aktivitesini bazı koşullarda azaltmış, ancak termal yaşlandırma sonrasında rezin–dentin bağlanmasının ömrünü artırmamıştır. Bu nedenle enzim inhibisyonu bulgusu, uzun dönem bağlanma başarısına doğrudan eşdeğer kabul edilmemelidir. Kitosan içeren deneysel sistemlere ilişkin laboratuvar bulgularını, kavite dezenfeksiyonu amacıyla standart bir klinik uygulama önerisine dönüştürmek için yeterli uzun dönem klinik kanıt bulunmamaktadır.

Benzalkonyum Klorür

Benzalkonyum klorür, kuaterner amonyum bileşikleri grubunda yer alan ve hücre membranı bütünlüğünü etkileyerek antimikrobiyal aktivite gösteren bir maddedir. Kavite dezenfeksiyonunda benzalkonyum klorür içeren ürünlerin rezin–dentin bağlanmasına etkisi farklı adeziv sistemlerle araştırılmıştır. Sharma ve arkadaşları (2011), benzalkonyum klorür temelli dezenfektanla yapılan ön işlemin bazı self-etch gruplarında makaslama bağlanma dayanımını olumsuz etkilediğini bildirmiştir.

Elkassas ve arkadaşlarının (2014) araştırmasında da %0,1 benzalkonyum klorür içeren ürün, diğer dezenfektanlarla birlikte karşılaştırılmıştır. Bu araştırmada dezenfektan ön işlemlerinin etch-and-rinse ve self-etch adezivlerde farklı yönlerde etkiler gösterebilmesi, kimyasal sınıfa bakarak tek başına klinik uyumluluk kararı verilemeyeceğini; kullanılan adeziv sistemin ve yüzey işlem sırasının birlikte değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Bu nedenle ürünler arasında sonuç aktarımı yapılırken formülasyon farklılıkları dikkate alınmalıdır.

İyot ve İyot–Potasyum İyodür İçeren Sistemler

İyot bileşikleri, proteinler ve hücresel yapılarla etkileşerek antimikrobiyal etki gösterebilen ajanlardır. Diş hekimliği çalışmalarında iyot–potasyum iyodür ve farklı yardımcı bileşenler içeren ticari solüsyonlar kavite dezenfektanı olarak incelenmiştir. Bu formülasyonların antimikrobiyal potansiyeli, dentin yüzeyinde oluşturabilecekleri kimyasal artıkların adeziv performans üzerindeki etkisinden ayrı değerlendirilmelidir.

Suma ve arkadaşları (2017), %0,3 iyot ve %0,15 potasyum iyodür içeren bir dezenfektanın belirli bir self-etch adezivle birlikte kullanıldığında bağlanma dayanımını kontrol grubuna göre azalttığını bildirmiştir. Sharma ve arkadaşlarının (2011) çalışmasında da iyot bileşiği içeren ön işlemlerin bazı self-etch protokollerinde olumsuz sonuçlar verdiği görülmüştür. Bu sonuçlar bütün iyot formülasyonlarına genellenemez; ancak materyal uyumluluğunun kontrol edilmesi gerektiğine işaret eder.

Sodyum Hipoklorit

Sodyum hipoklorit güçlü oksidatif ve proteolitik özellikleri nedeniyle endodontik dezenfeksiyonda yaygın olarak bilinse de koronal dentin yüzeyine uygulanması ayrı bir değerlendirme gerektirir. Organik matriks üzerindeki etkileri, dentinin kimyasal bileşimini ve rezin monomerlerinin infiltrasyonunu değiştirebilir. Ayrıca yüzeyde kalabilecek oksitleyici artıkların adeziv polimerizasyonu üzerindeki olası etkileri göz önünde bulundurulmalıdır.

Elkassas ve arkadaşları (2014), %5,25 sodyum hipoklorit temelli dezenfektanı farklı adeziv yaklaşımlarla karşılaştırmıştır. Coelho ve arkadaşlarının (2021) sistematik derlemesi, sodyum hipokloritin rutin kavite dezenfektanı olarak kullanımını destekleyecek yeterli ve tutarlı bağlanma kanıtının bulunmadığını belirtmiştir. Dolayısıyla endodontide etkin bir irrigant olması, adeziv

restorasyon öncesinde dentine rutin uygulanmasını tek başına gerekçelendirmez.

Lazer Destekli Dezenfeksiyon

Lazer uygulamaları, ışık enerjisinin dokuyla etkileşimi aracılığıyla yüzey modifikasyonu ve mikrobiyal yükün azaltılması amacıyla araştırılmıştır. Ancak lazer tipi, dalga boyu, enerji yoğunluğu, uygulama süresi ve soğutma koşulları değiştikçe dentin yüzeyinde oluşan etkiler de farklılaşır. Antimikrobiyal etki ile adeziv bağlanma arasındaki ilişki doğrusal değildir; yüzey pürüzlülüğünün veya smear tabakasının değişmesi tek başına daha güçlü bir bağlantı oluştuğunu kanıtlamaz.

Coelho ve arkadaşlarının (2021) sistematik derlemesinde lazerlerin kavite dezenfeksiyonunda rutin kullanımını destekleyecek klinik ve bağlanma kanıtlarının yetersiz olduğu belirtilmiştir. Bu nedenle lazer destekli dezenfeksiyon, standart adeziv protokollerin yerine geçen kanıtlanmış bir yaklaşım olarak değil, parametreleri ve klinik etkinliği daha fazla araştırılması gereken bir seçenek olarak ele alınmalıdır.

Ozon Uygulamaları

Ozon, yüksek oksidasyon kapasitesine sahip bir gazdır ve ağız ortamındaki mikroorganizmalar üzerindeki etkisi nedeniyle çürük yönetiminde incelenmiştir. Ozonun gaz veya farklı taşıyıcı ortamlar üzerinden uygulanması, temas süresi ve hedef dokunun özellikleri sonuçları değiştirebilir. Baysan ve arkadaşları (2000), kök çürüğü lezyonlarıyla ilişkili mikroorganizmalara karşı ozon üreten bir cihazın in vitro antimikrobiyal etkisini göstermiştir.

Bununla birlikte laboratuvarda mikrobiyal azalmanın gösterilmesi, ozonun kavite dezenfeksiyonunda restorasyon başarısını artırdığını kanıtlamaz. Coelho ve arkadaşlarının (2021) sistematik değerlendirmesinde, çeşitli alternatif dezenfeksiyon

yöntemleri için klinik kanıtların sınırlı olduğu vurgulanmaktadır. Ozon uygulamasında özellikle oksidatif etkinin dentin ve adeziv ara yüz üzerindeki olası etkileri ile klinik sonuçlar birlikte araştırılmalıdır.

Klinik Karar Verme ve Kanıtların Sınırları

Kavite dezenfektanı seçimi yalnızca antimikrobiyal aktiviteye dayandırılmamalıdır. Çürüğün derinliği, pulpa yakınlığı, dentin substratının durumu, kullanılacak adeziv sistem, dezenfektanın konsantrasyonu ve uygulanma sırası kararın parçasıdır. İlgili ürünün üretici talimatı ve seçilen adeziv protokolüyle uyumluluğu gözetilmelidir. Deneysel çalışmaların çoğunda kullanılan düz dentin yüzeyleri, klinikteki çürükten etkilenmiş dentin ve kompleks kavite geometrisini bütünüyle temsil etmez (Coelho et al., 2021; Coelho et al., 2022).

Özellikle derin kavitelerde, dezenfeksiyon işlemi pulpal biyoloji ve selektif çürük uzaklaştırma ilkelerinden bağımsız düşünülmemelidir. Dezenfektanların bir kısmının başlangıç bağlanma dayanımını değiştirmesi, uzun dönem klinik başarısızlık oranını aynı yönde değiştireceği anlamına gelmez. Bu nedenle güçlü klinik sonuçlar ortaya konana kadar ek dezenfeksiyon uygulamaları, uygun çürük uzaklaştırma, izolasyon ve doğru adeziv teknik gibi temel basamakların yerine geçirilmemelidir.

Sonuç

Kavite dezenfeksiyonu, rezidüel mikrobiyal yükün kontrolü açısından araştırılmaya değer bir yardımcı işlemdir; ancak kullanılacak ajanın adeziv bağlanma üzerindeki etkisi ürün ve protokole bağlıdır. Klorheksidin, antimikrobiyal ve MMP inhibitörü özellikleriyle en fazla incelenen seçeneklerden biridir. Kitosan ve benzalkonyum klorür gibi ajanlar potansiyel yararlar sunmakla birlikte kanıtlar çoğunlukla deneysel düzeydedir. İyot bileşikleri ve sodyum hipoklorit bazı koşullarda bağlanmayı olumsuz

etkileyebilir; lazer ve ozon için ise rutin uygulamayı destekleyen klinik kanıtlar sınırlıdır. Güncel yaklaşım, dezenfektan kullanımını otomatik bir basamak olarak kabul etmek yerine her materyal–adeziv kombinasyonu için kanıt temelli değerlendirme yapılmasıdır.

Kaynakça

Baena, E., Cunha, S. R., Maravić, T., Comba, A., Paganelli, F., Alessandri-Bonetti, G., Ceballos, L., Tay, F. R., Breschi, L., & Mazzoni, A. (2020). Effect of chitosan as a cross-linker on matrix metalloproteinase activity and bond stability with different adhesive systems. Marine Drugs, 18(5), 263. https://doi.org/10.3390/md18050263

Baysan, A., Whiley, R. A., & Lynch, E. (2000). Antimicrobial effect of a novel ozone-generating device on micro-organisms associated with primary root carious lesions in vitro. Caries Research, 34(6), 498–501. https://doi.org/10.1159/000016630

Carrilho, M. R. O., Carvalho, R. M., de Goes, M. F., di Hipólito, V., Geraldeli, S., Tay, F. R., Pashley, D. H., & Tjäderhane, L. (2007). Chlorhexidine preserves dentin bond in vitro. Journal of Dental Research, 86(1), 90–94. https://doi.org/10.1177/154405910708600115

Coelho, A., Amaro, I., Rascão, B., Marcelino, I., Paula, A., Saraiva, J., Spagnuolo, G., Ferreira, M. M., Marto, C. M., & Carrilho, E. (2021). Effect of cavity disinfectants on dentin bond strength and clinical success of composite restorations—A systematic review of in vitro, in situ and clinical studies. International Journal of Molecular Sciences, 22(1), 353. https://doi.org/10.3390/ijms22010353

Coelho, A., Vilhena, L., Antunes, M., Amaro, I., Paula, A., Marto, C. M., Saraiva, J., Ferreira, M. M., Carrilho, E., & Ramalho, A. (2022). Effect of different cavity disinfectants on adhesion to dentin of permanent teeth. Journal of Functional Biomaterials, 13(4), 209. https://doi.org/10.3390/jfb13040209

Elkassas, D. W., Fawzi, E. M., & El Zohairy, A. (2014). The effect of cavity disinfectants on the micro-shear bond strength of

dentin adhesives. European Journal of Dentistry, 8(2), 184–190. https://doi.org/10.4103/1305-7456.130596

Gendron, R., Grenier, D., Sorsa, T., & Mayrand, D. (1999). Inhibition of the activities of matrix metalloproteinases 2, 8, and 9 by chlorhexidine. Clinical and Diagnostic Laboratory Immunology, 6(3), 437–439. https://doi.org/10.1128/CDLI.6.3.437-439.1999

Sharma, V., Rampal, P., & Kumar, S. (2011). Shear bond strength of composite resin to dentin after application of cavity disinfectants—SEM study. Contemporary Clinical Dentistry, 2(3), 155–159. https://doi.org/10.4103/0976-237X.86438

Suma, N. K., Shashibhushan, K. K., & Reddy, V. V. S. (2017). Effect of dentin disinfection with 2% chlorhexidine gluconate and 0.3% iodine on dentin bond strength: An in vitro study. International Journal of Clinical Pediatric Dentistry, 10(3), 223–228. https://doi.org/10.5005/jp-journals-10005-1440

BÖLÜM 6

ADEZİV SİSTEMLERDE GÜNCEL MONOMERLER

NİLGÜN AKGÜL[1]
SERPİL ŞENOCAK[2]

Giriş

Restoratif diş hekimliğinde adeziv sistemler, diş dokuları ile restoratif materyaller arasında mikromekanik ve kimyasal bağlanmayı sağlayarak restorasyonların klinik başarısında önemli rol oynamaktadır. Adeziv sistemlerin başarısı; yüzey hazırlama protokolü, solvent içeriği, doldurucu miktarı ve özellikle monomer kompozisyonu gibi faktörlere bağlıdır (Van Meerbeek ve ark., 2011). Geleneksel adeziv sistemlerde yaygın olarak kullanılan monomerler arasında Bis-GMA(Bisfenol A glisidil metakrilat), UDMA(Üretan Dimetakrilat), TEGDMA(Trietilen Glikol Dimetakrilat) ve HEMA(Hidroksietil Metakrilat) yer almaktadır. Ancak bu monomerlerin hidrofilik karakterleri, polimerizasyon büzülmesi, su

[1] Prof.Dr. Nilgün AKGÜLPamukkale Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi,Restoratif Diş Tedavisi Anabilim Dalı , Orcid: 0000-0002-6732-0485,nakgul@pau.edu.tr
[2] Arş.Gör.Serpil ŞENOCAK, Pamukkale Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi Restoratif Diş Tedavisi Anabilim Dalı, Orcid: 0009-0003-3107-8329,serpils@pau.edu.tr

absorbsiyonu ve hidrolitik degradasyon gibi sınırlılıkları nedeniyle adeziv-dentin arayüzünün uzun dönem stabilitesi olumsuz etkilenebilmektedir (Breschi ve ark., 2018).

Günümüzde Adeziv sistemlerde kullanılan monomerlerin kimyasal yapıları yeniden tasarlanarak; daha düşük büzülme stresi, artmış hidrolitik stabilite, daha yüksek dönüşüm derecesi, ve antibakteriyel özelliklerin geliştirilmesi amaçlanmaktadır. Özellikle fonksiyonel monomerlerin geliştirilmesi, dentin ve mine yüzeyleriyle kimyasal bağlanmayı güçlendirerek bağlanma dayanımını artırmakta ve restorasyonların klinik ömrünü uzatmaktadır (Perdigão, 2020).

Bu kitap bölümünün amacı, restoratif diş hekimliğinde adeziv sistemlerde kullanılan güncel monomerleri; kimyasal özellikleri, bağlanma mekanizmaları, biyolojik etkileri ve klinik uygulama potansiyelleri açısından literatür ışığında değerlendirmektir.

Kimyasal Bağlanmayı Sağlayan Fonksiyonel Asidik Monomerler

Fonksiyonel monomerler, dentin ve mine yüzeyleriyle kimyasal etkileşim kurabilme yeteneğine sahip olup adeziv sistemlerin bağlanma etkinliği ve uzun dönem stabilitesinde belirleyici rol oynamaktadır (Breschi ve ark., 2018; Perdigão, 2020).

MDP (10-Metakriloksidesil Dihidrojen Fosfat)

10-MDP, günümüzde universal adeziv sistemlerin en yaygın kullanılan fonksiyonel monomeridir. Metakrilat grubu sayesinde rezinle bağ kurarken fosfat grubunun, hidroksiapatit kristallerindeki kalsiyum iyonlarıyla iyonik bağ oluşturabilmesi sayesinde dentin ve mine yüzeylerinde kimyasal bağlanma sağlar. On karbonlu uzun alkil zincir kısmı ile ise hidrofobik bir yapı oluşturarak su absorbsiyonuna dirençli bir yapı oluşturur (Khabadze ve ark., 2024;

Van Meerbeek ve ark., 2011). Bu bağlanma mekanizması, daha stabil ve hidrolize dirençli bir hibrit tabaka oluşumuna katkıda bulunur.

MF8P (6-metakriloksi-2,2,3,3,4,4,5,5-oktafloroheksil dihidrojen fosfat)

Suda çözünen monomerler hidrolitik bozulmaya daha hızlı uğradığı için hidrolitik olarak stabil fonksiyonel monomer arayışıyla birlikte akrilamid ve fosfat bazlı monomerler sentezlenmiştir (Yoshihara ve ark., 2014). MF8P'nin yapısında bulunan aktif fosfat fonksiyonel grubu sayesinde hidroksiapatit ile kimyasal bağlantı sağlar. Asidik ucu ile polimerize olabilen metakrilat grubu arasındaki hidrofobik zincir yapısının optimize edilmiş olması sayesinde monomerin adeziv solventleri içindeki stabilitesi, demineralize dentin tübüllerine olan penetrasyon kabiliyeti ve ıslatabilirliği artar (Khabadze ve ark., 2024). Dentin ile uygun bağlanma gücü kaydedildiğinden, MF8P, bağlanma için iyi bir aday fonksiyonel monomer olarak kabul edilebilir (He ve ark., 2012; Yoshihara ve ark., 2014).

GPDM (Gliserol Fosfat Dimetakrilat)

GPDM, kısa alifatik zincirli fosfat esterli bir fonksiyonel monomer olup, hidroksiapatit yüzeyindeki kalsiyum iyonlarıyla iyonik etkileşim kurabilme potansiyeline sahiptir; molekül yapısında iki metakrilat grubunun bulunması nedeniyle çapraz bağlanma kapasitesini artırmakta ve polimer ağ yapısının mekanik stabilitesine katkı sağlamaktadır (Van Meerbeek ve ark., 2007).

Ancak GPDM'nin kısa zincir uzunluğu ve görece hidrofilik karakteri, 10-MDP'ye kıyasla polimer matriks içerisinde daha fazla su absorbsiyonuna neden olabilmekte ve hidrolitik degradasyon riskini artırabilmektedir. Literatürde GPDM içeren adeziv sistemlerin başlangıç bağlanma dayanımı açısından tatmin edici sonuçlar verdiği, ancak uzun dönem su depolama ve termal

yaşlandırma sonrası bağlanma dayanımında anlamlı düşüşler görülebildiği bildirilmiştir (Perdigão, 2020).

4-MET(4-methacryloyloxyethyl trimellitic acid)

Geleneksel olarak kullanılan 4-MET (4-metakriloksietil trimellitik asit), hidroksiapatitteki kalsiyum ile iyonik bağlar kurarak mikrosızıntıyı engelleyen ve diş dokusuna asidik bağlanma sağlayan fonksiyonel bir monomerdir. 4-MET'in karboksil gruplarındaki hidrojen iyonlarının kalsiyum ile yer değiştirmesi ile elde edilen, kalsiyum tuzu içeren yeni bir biyoaktif adeziv olan CMET (4-metakriloksietil trimellitik asit kalsiyum tuzu) molekülün asiditesini nötralize ederek fonksiyonelliğini artırmıştır (Altankhishig ve ark., 2025).

CMET'in metastabil çözeltilerde mineral birikimini teşvik ettiği ve in vitro olarak birkaç karyojenik bakteri türüne karşı antibakteriyel aktivite gösterdiği yapılan çalışmalarla ortaya konmuştur (Ito ve ark., 2012; Thaweboon ve ark., 2021).

Ayrıca CMET'in in vitro olarak MDPC-23 hücrelerinin çoğalmasını odontoblastik farklılaşmasını ve mineralizasyonunu kolaylaştırmaktadır. Canlı pulpa tedavisini simüle eden bir sıçan modelinde açıkta olan diş pulpasına uygulandığında dentin rejenerasyonunu indüklediği gösterilmiştir (Rao ve ark., 2023). Düşük toksisite,yüksek mineralizasyon ve indükleyici yeteneği sayesinde hücre içi kalsiyum homeostazını teşvik eder ve rejeneratif pulpa tedavileri için uygun bir malzeme olarak kabul edilir (Qiu & Saito, 2021). Bu bulgulara dayanarak CMET dentin onarımı ve rejenerasyonu potansiyeline sahip çok işlevli bir biyoaktif monomer olarak tanımlanmıştır (Altankhishig ve ark., 2025; Qiu & Saito, 2021).

PG6DMA İzomer Karışımı

PG6DMA(poliglisidil-6 dimetakrilat) izomer karışımı, aromatik halka içermeyen, yüksek molekül ağırlıklı ve çok fonksiyonlu dimetakrilat yapısı sayesinde Bis-GMA'ya alternatif olarak geliştirilen güncel monomer sistemlerinden biridir. Moleküler yapısı piperidin halkası ile metakrilat bağının stabilitesini artıracak biçimde tasarlanmıştır (Lucena ve ark., 2024). İzomer karışımı yapısı, molekül konformasyon çeşitliliği sağlayarak zincirler arası paketlenmeyi azaltmakta ve bu durum daha yüksek dönüşüm derecesi ile daha düşük polimerizasyon büzülme stresi oluşmasına katkıda bulunmaktadır.

PG6DMA'nın düşük viskozitesi, düşük molekül ağırlıklı seyreltici monomerlere olan ihtiyacı azaltarak polimerizasyon sırasında oluşan hacimsel büzülmenin sınırlandırılmasına olanak sağlamaktadır. Ayrıca molekül yapısındaki esnek alifatik zincirler ve yüksek çapraz bağlanma potansiyeli, polimer matriksin hidrolitik stabilitesini artırmakta ve su absorbsiyonunu azaltmaktadır (Lucena ve ark., 2024). Elastik modül ve yüzey sertliği gibi bazı mekanik parametrelerin Bis-GMA içeren sistemlere kıyasla hafif düzeyde düşük olduğu, bu nedenle hibrit formülasyonların klinik kullanım açısından daha uygun olabileceği vurgulanmıştır (Lucena ve ark., 2024). PG6DMA'nın BPA içermeyen yapısı ve daha düşük sitotoksik potansiyeli, biyolojik uyumluluk açısından önemli bir avantaj olarak değerlendirilmektedir. Bu özellikler, PG6DMA izomer karışımının hem universal hem de total-etch adeziv sistemlerde uzun dönem bağlanma stabilitesini destekleyebilecek umut verici bir monomer alternatifi olduğunu göstermektedir (Van Landuyt ve ark., 2007).

NANOSIZINTIYI ÖNLEYEN METAKRİLAMİD MONOMERLERİ

Metakrilamidler geleneksel akrilat ve metakrilatlarda olduğu gibi bir ester grubu (–CO–O–R–) yerine bir amid (–CO–NH veya–

CO–N–) grubuna sahiptir. Amid bağları, ester bağlarına göre kimyasal olarak çok daha kararlı ve hidrolize karşı oldukça dirençlidir. Bu da restorasyonun ömrünü uzatır. Kollajeni oluşturan aminoasitlerle benzerlik göstermesi mantığıyla amid grubu içeren monomerlerin kullanımı yaygınlaşmış olup monomerin karboksil ve amid grupları ile kollajenin karboksil grupları arasında hidrojen bağ oluşturması bakımından daha iyi bağlanma elde edildiği gösterilmiştir (Barcelos ve ark., 2020).

MAPHS / MPHS (Methacrylamide-phosphonate)

İçerdiği asidik fonksiyonel grup sayesinde dişe bağlanma sağlarken metakrilamit grubuyla yapısal kararlılık ve hidrolitik stabilite sağlayan güncel monomerlerden biridir.

FAM-201 (N,N'-diacryloyl-4,7,10-trioxa-1,13-tridecanediamine)

Su çözünürlüğü yüksek bir akrilamid çapraz bağlayıcıdır. Bu monomerin en önemli özelliği, dental adeziv sistemlerinde geleneksel olarak çözücü (co-solvent) rolü üstlenen HEMA'ya olan ihtiyacı ortadan kaldırmasıdır. HEMA içermeyen adezivlerin geliştirilmesine olanak tanıyan FAM-201, bu sayede HEMA'nın neden olduğu yüksek su emilimi ve hidrolitik degradasyon risklerini minimize etmektedir (Ahmed ve ark., 2023). Geniş Ph stabilitesi sayesinde asidik universal adezivlerin içinde bozunmadan kalabilmesi ve su ve hidrofilik solventlerde yüksek çözünürlük göstererek dentin tübüllerine derinlemesine nüfuz etmesiyle geleneksel sistemlere alternatif olabilecek güncel bir monomerdir (Ahmed ve ark., 2023).

HMATAF(Hidroksimetil Trietilamonyum Florür Akrilat)

Metakrilatların zayıflığını gidermek için sentezlenmiş metakrilamid bazlı bir monomerdir. Metakrilat yerine metakrilamid yapıda oluşu hidroliz direnci sağlarken yapısında bulunan kuaterner amonyum florür tuzu ile hem antibakteriyel özellik gösterir hem de

florür salarak dişi çürüğe karşı korur. Aynı zamanda yapısındaki hidroksil(OH) ve amid grupları ile dentin içindeki kolajen liflerine hidrojen bağlarıyla tutunma sağlar (Decha, Talungchit ve ark. 2019).

Yapılan çalışmalarda rezin-dentin arayüz bağlantısı artırmak amacıyla UPy(2-üreido-4[1H]-pirimidinon) gibi hidrojen bağı açısından zengin fonksiyonel gruplar adeziv sistemlere dahil edilmiştir (Fu ve ark., 2025). Bu hidrojen bağları, kolajen ve hidroksiapatit içeren dentinle adeziv rezin arasında köprü oluşturabilir ve rezin içinde kovalent olmayan çapraz bağlar oluşturabilir. Yüksek polariteli çözücülerin eklenmesi olmadan saf polimerizasyon elde etmek ve UPy bazlı monomerler ile diğer ko-monomerler arasında uyumluluğu sağlamak için, UPy birimlerinin dimerizasyon sabitinin azaltılması esastır. Bu da metakrilamid grupları ve UPy birimleri arasına bir glikol ara parçası yerleştirilerek daha hidrofilik bir ortam oluşturularak gerçekleştirilebilir. UPy-OPG400-MMA, UPy-OPG230-MMA ve UPy-OEG148-MMA sentezlenen UPy bazlı metakrilatlar arasında yer almaktadır. UPy-OPG230-MMA'nın yüksek bağlanma gücü, S. mutans ile 1 hafta boyunca biyofilm yaşlanmasından sonra artırılmış dayanıklılık ve daha iyi arayüzey sızdırmazlık açısından en iyi performansı gösterdiği gösterilmiştir (Fu ve ark., 2025).

ANTİBAKTERİYEL ÖZELLİK KAZANDIRAN MONOMERLER

Dental adeziv sistemler intrinsik antibakteriyel özellik göstermez ve restorasyon kenarlarında gelişen biyofilm birikimi sekonder çürüklerin en önemli nedenlerinden biridir (Breschi ve ark., 2018). Bu nedenle, adeziv sistemlere antibakteriyel özellik kazandırmak amacıyla polimerize olabilen antibakteriyel monomerlerin geliştirilmesi son yıllarda önemli bir araştırma alanı haline gelmiştir. Polimerize olan antibakteriyal monomerler dental rezin monomerleriyle kopolimerize olarak rezin matriks içinde

immobilize oldukları için uzun süreli antibakteriyel etki gösterebilmektedirler. 12-metakriloloksi dodesilpridinyum bromid(MDPB),dimetilamino dodesil metakrilat(DMADDM), dimetilamino heksadesil metakrilat(DMAHDM)polimerize olan antibakteriyel monomerlere örnek verilebilir (Balcı ve Kemaloğlu, 2023).

Adeziv sistemlerinin monomerlerine dahil edilen ana antibakteriyel madde QAM (kuaterner amonyumdur). Kuarterner amonyum tuzunun uzun lipofilik alkil zinciri hücre zarına nüfuz ederek bakteri hücresinin otolizine neden olur (Sun ve ark., 2021).Fizyolojik pH'da pozitif yüklü olan kuaterner amonyum bileşikleri klorheksidine benzer katyonik bir mekanizma ile dentinin endojen enzimatik aktivitesini engelleyebilir (Breschi ve ark., 2018). Kuarternum amonyum bileşiklerine metakrilat grubunun entegre edilmesinin bağlanma verimliliğini artırdığı gerekçesiyle 12-metakriloksidodesilpiridinyum bromid (MDPB) üretilmiştir. Kuarternum amonyum grubu antibakteriyel aktiviteden sorumluyken metakrilat grubu sayesinde diğer monomerlerle kopolimerizasyonu yoluyla antibakteriyel kısım polimer matrisine sabitlenir ve temas eden bakterilerin büyümesini engeller. (Izutani ve ark., 2011) Adeziv sistemlere yüksek konsantrasyonlarda monometakrilat QAM'lerin dahil edilmesi polimerik ağın oluşumunu olumsuz etkileyebilir. Bu nedenle monometakrilat QAM'lerin dezavatajını ortadan kaldırmak amacıyla, çapraz bağlayıcı olarak işlev görerek polimerik ağı stabilize eden ve mekanik özelliklerin korunmasına katkıda bulunan bis-QAM'ler geliştirilmiştir. Yeni geliştirilen bis QAM'lar arasında; XyDM (N,N-bis[2-((methacryloyl)oxy)ethyl]-N,N,N,N-tetramethyl-N,N-xylyl diammoniumbromide), BPDE (2,2'-bis[((methacryloyl)oxy)ethyl]-diethylammonium bromide-1,1'-benzyl), DDM-F (N,N-bis[2-((methacryloyl)oxy)ethyl]-N,N,N,N-tetramethyl-N,N'-dodecyl diammoniumfluoride), bis[4-(((2-methylacryloyl)amino)methyl)-1,

12-dodecyl dipyridinium bromide (DDPyMMA) umut vaat eden antibakteriyel ajanlardan bazılarıdır (Fanfoni ve ark., 2021).

DMAE-CB (2-(dimethylamino)ethyl methacrylate-1-bromooctane) bir kuaterner amonyum monomeridir. Sentez süreci, 2-(dimethylamino)ethyl methacrylate (DMAEMA) monomerinin, 1-bromooctane(alkil zinciri) ile reaksiyona girmesiyle gerçekleşir. (Jiao ve ark., 2015) Bakterilerin negatif yüklü hücre zarlarıyla etkileşime giren kuaterner amonyum grubu ve mevcut rezin matris ile polimerize olarak ağ yapısına dahil olmasını sağlayan metakrilat grubu olarak iki ana kısımdan oluşur. Bakteri hücre zarı kuaterner amonyum grubundaki pozitif yüklü azot atomu ile temas ettiğinde elektriksel denge bozulur stoplazmik sızıntı meydana gelir ve bakteri ölür. DMAE-CB'nin bir diğer fonksiyonel avantajı ise, matriks metalloproteinazların (MMP-2, -9 ve -13) aktif uçlarındaki çinko iyonlarının yerini alarak veya kalsiyumu şelatlayarak bu endojen enzimleri inaktif hale getirmesidir. Bu kimyasal etkileşim hibrit tabakanın degredasyonunu durdur ve rezin-dentin bağının uzun dönem klinik ömrünü korur (Zhou ve ark., 2013).

Dental adeziv formülasyonlarında antimikrobiyal ve anti-biyofilm etkinlik sağlamak amacıyla kuaterner amonyum metakrilat (QAM) türevi sentetik monomerler sıklıkla tercih edilse de potansiyel sitotoksisiteleri araştırmacıları biyouyumluluğu yüksek ve düşük sitotoksitelliğe sahip sürdürülebilir doğal biyoaktif bileşiklerin adeziv sisteme entegrasyonuna yöneltmiştir. Pinus brutia (kızılçam) kabuğu, yüksek fenolik içerik profili ve güçlü antioksidan kapasitesi nedeniyle dental adeziv sistemlerde fonksiyonel katkı maddesi olarak değerlendirilen önemli bir biyokütle kaynağıdır (Tümen ve ark., 2018). Kızılçam kabuğundan elde edilen ekstraktlar, yüksek oranda oligomerik ve polimerik proantosiyanidinler içermektedir. Bu bileşikler, güçlü serbest radikal süpürücü özellikleri sayesinde oksidatif stresin azaltılmasında etkin rol oynamaktadır. Ayrıca proantosiyanidinlerin dentin kollajeni ile oluşturduğu

hidrojen bağları ve kovalent çapraz bağlar, kollajen fibrillerinin mekanik stabilitesini artırmakta ve enzimatik degradasyona karşı direnç kazandırmaktadır. Bu durum, adeziv arayüzün uzun dönem dayanıklılığı açısından kritik öneme sahiptir (Bedran-Russo ve ark., 2014; Sousa ve ark., 2024).

EGCG (epigallocatechin-3-gallate) yeşil çay olarak bilinen camellia sinensis bitkisi tarafından ikincil bir metabolit olarak büyük miktarlarda üretilen bir flavonoiddir (Lien Ai Nguyen Pham-huy ve ark., 2008).Yapılan bir çalışmada antibakteriyel etkiye sahip bir adeziv elde etmek için EGCG dahil edilmiştir ve elde edilen bulgular, yapıştırıcıda 200 μg/ml'den fazla EGCG bulunmasının antimikrobiyal aktivite oluşturduğuna dair kanıtları desteklemektedir (Du ve ark., 2012). EGCG, kollajenazlarla hidrojen bağı oluşturduğu ve hidrofobik etkileştiği görünmektedir; bu da kollajenazların ikincil yapısında değişikliğe ve dolayısıyla MMP'lerin inhibisyonuna neden olur. EGCG'nin MMP'leri inhibe edici etkisi çeşitli çalışmalarla doğrulanmıştır (Ho ve ark., 2007).

EGCG gibi antibakteriyal özelliğe sahip olan bir başka flavonoid de kuersetindir (3,3′,4′,5,7-pentahidroksiflavon) (de Moraes Porto ve ark., 2021). Yapılan bir araştırmada adezive 500 μg/mL konsantrasyonda kuersetin ilavesinin anlık bağlanma gücünü etkilemediğini ve bağların bir aylık kollajenaz yaşlandırmasından sonra büyük ölçüde korunduğunu göstermiştir (Yang ve ark., 2017). Bir diğer çalışmada kuersetinin S. mutans biyofilm tabakasının yapışması ve büyümesinde rol oynayan gtfB ve gtfC, comD ve comE ekspresyonunu baskılayarak biyofilm oluşumunu önemli ölçüde engelleyebildiğini ve olgun biyofilmi etkili bir şekilde ortadan kaldırabildiğini göstermiştir (Yue ve ark., 2016). Kuersetin molekülleri, kolajenin hidrofobik kısımlarına bağlanıp ve hidrojen bağları ile kolajen proteinini hapsederek kolajenin çapraz bağlanmasına ve hidrofobikliğin artmasına neden olabilir (Epasinghe ve ark., 2014). Bu durum kuersetinle modifiye edilmiş

adezivin , modifiye edilmemiş yapıştırıcıya kıyasla bağlanma arayüzünde daha iyi bir sızdırmazlık yeteneğine sahip olabileceğini düşündürmektedir (Yang ve ark., 2017).

Bu doğal polifenolik ve antioksidan bileşiklerin dental adeziv rezinlere serbest formda doğrudan dahil edilmesinin klinik sınırlaması bulunmaktadır (de Moraes Porto ve ark., 2021). Bu bileşikler, içerdikleri yüksek serbest radikal yakalama kapasitesi nedeniyle, adezivin ışıkla fotopolimerizasyon esnasında foto başlatıcılardan açığa çıkan radikalleri nötralize ederler. Bu durum adezivin dönüşüm derecesini düşürerek yetersiz polimerizasyona ve mekanik zayıflığa yol açabilir (Cuevas-Suárez ve ark., 2023). Bu hidrolitik ve mekanik problemi aşmak adına modern dental kimyada, bu doğal antibakteriyel moleküller rezin matrise doğrudan eklenmemekte; öncelikle beta-siklodekstrin metakrilat gibi kafes yapılı fonksiyonel polimerik monomerlerin içine hapsedilerek akıllı enkapsülasyonla formüle edilmektedir. Böylece monomer ucu adeziv ağ yapısına kovalent olarak kilitlenirken, içteki doğal molekül polimerizasyonu bozmadan arayüzeyde kontrollü ve uzun dönemli terapötik salınım sergilemektedir (Hussain ve ark., 2005; Mohamadhoseini & Mohamadnia, 2025).

TİYOL-EN POLİMERİZASYON MEKANİZMASI İLE POLİMERİZE OLAN ADEZİV MONOMERLER

Tiyol-en sistemleri, çok fonksiyonlu tiyol monomerleri ile (–SH) ile allil veya triazin bazlı en monomerleri (karbon-karbon çift bağı, C=C) arasındaki basamaklı büyüme (step-growth) reaksiyonudur. Bu güncel monomer kombinasyonu klasik zincir büyüme polimerizasyonundan farklı olarak, bir radikal zincir transferi döngüsü üzerinden ilerler polimerizasyon büzülmesini azaltır. Bir foto başlatıcı yardımıyla tiyol grubundan bir hidrojen koparılarak thiyl radikali oluşur. Thiyl radikali, çift bağa (ene) saldırarak karbon merkezli bir radikal oluşturur. Karbon radikali,

başka bir tiyol molekülünden hidrojen koparark reaksiyonu tamamlar ve yeni bir thiyl radikali üreterek döngüyü sürdürür (Sinawehl ve ark., 2025).

Tiyollere örnek olarak PETMP (Pentaerythritoltetra(3-mercaptopropionate) ve TMPTMP (Trimethylolpropanetris(3-mercaptopropionate) verilebilir. PETMP yüksek fonksiyonelliği (4 kollu yapı) sayesinde adeziv ağının çapraz bağlanma yoğunluğunu artırıp düşük viskozite özelliğiyle demineralize dentin yapısına sızmayı kolaylaştırır (dos Santos ve ark., 2026; Lu ve ark., 2005). TMPTMP ise adeziv tabakaya esneklik kazandırmak ve büzülme stresini azaltmak amacıyla reaktif seyreltici olarak kullanılır (Cramer ve ark., 2010; Khalid ve ark., 2008).

Yüksek reaktif ene monomeri olarak sıklıkla kullanılan TATATO (1,3,5-Triallyl-1,3,5-triazine-2,4,6(1H,3H,5H)-trione) sert bir moleküler çekirdeğe sahip olup adeziv tabakanın mekanik direncini ve hidrolitik stabilitesini artırmak için tercih edilir (Cramer ve ark., 2010).

Tiyol-en reaksiyonu sonucunda oluşan tiyo-eter bağları, klasik ester bağlarına göre ağız ortamındaki asidik ve enzimatik ataklara karşı çok daha dirençli olmasıyla hirolitik stabilite sağlarken basamaklı büyüme mekanizmasıyla daha düşük polimerizasyon büzülmesi ve zamana bağlı olarak bozulmayan hibrit tabaka sağlamaktadır (He ve ark., 2026).

Kaynakça

Ahmed, M., Yoshihara, K., Nagaoka, N., Yao, C., Matsukawa, A., Yoshida, Y., & Van Meerbeek, B. (2023). Acrylamide monomers in universal adhesives. *Dental Materials*, *39*(3), 246-259.

Altankhishig, B., Matsuda, Y., Rao, Y., & Saito, T. (2025). Mineralization, anti-demineralization, and antibacterial effects of novel bioactive universal bond with calcium salt monomers on dental caries. *Frontiers in Dental Medicine*, *6*, Article 1633158.

Balcı, M., & Kemaloğlu,H. (2023). Restoratif diş hekimliğinde antibakteriyel ajanlar. *Ege Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi Dergisi*, *44*(3), 291-299.

Barcelos, L., Borges, M., Soares, C., Menezes, M., Huynh, V., Logan, M., Fugolin, A., & Pfeifer, C. (2020). Effect of the photoinitiator system on the polymerization of secondary methacrylamides of systematically varied structure for dental adhesive applications. *Dental Materials*, *36*(3), 468-477.

Bedran-Russo, A. K., Pauli, G. F., Chen, S.-N., McAlpine, J., Castellan, C. S., Phansalkar, R. S., Aguiar, T. R., Vidal, C. M., Napotilano, J. G., & Nam, J.-W. (2014). Dentin biomodification: Strategies, renewable resources and clinical applications. *Dental Materials*, *30*(1), 62-76.

Breschi, L., Maravic, T., Cunha, S. R., Comba, A., Cadenaro, M., Tjäderhane, L., Pashley, D. H., Tay, F. R., & Mazzoni, A. (2018). Dentin bonding systems: From dentin collagen structure to bond preservation and clinical applications. *Dental Materials*, *34*(1), 78-96.

Cramer, N. B., Couch, C. L., Schreck, K. M., Boulden, J. E., Wydra, R., Stansbury, J. W., & Bowman, C. N. (2010). Properties of methacrylate–thiol–ene formulations as dental restorative materials. *Dental Materials*, *26*(8), 799-806.

Cuevas-Suárez, C. E., Münchow, E. A., Schwarzbold, C. G., Rutz, J. K., da Silva, A. F., & Piva, E. (2023). Effect of naturally derived antioxidants as polymerization inhibitors on experimental adhesive resins. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, *436*, 114368.

de Moraes Porto, I. C. C., de Barros Rocha, A. B., Ferreira, I. I. S., de Barros, B. M., Ávila, E. C., da Silva, M. C., de Oliveira, M. P. S., Lôbo, T. d. L. G. F., dos Santos Oliveira, J. M., & do Nascimento, T. G. (2021). Polyphenols and Brazilian red propolis incorporated into a total-etching adhesive system help in maintaining bonding durability. *Heliyon*, *7*(2).

dos Santos, G. I., Gaglieri, C., dos Santos, F. B., Moreno, S. M., & Bannach, G. (2026). Exploring thiol–ene and thiol–methacrylate reactions in the production of renewable materials from methacrylated eugenol. *Polymer Chemistry*, *17*(15), 1461-1474.

Du, X., Huang, X., Huang, C., Wang, Y., & Zhang, Y. (2012). Epigallocatechin-3-gallate (EGCG) enhances the therapeutic activity of a dental adhesive. *Journal of Dentistry*, *40*(6), 485-492.

Epasinghe, D., Yiu, C., Burrow, M., Tsoi, J., & Tay, F. (2014). Effect of flavonoids on the mechanical properties of demineralised dentine. *Journal of Dentistry*, *42*(9), 1178-1184.

Fanfoni, L., Marsich, E., Turco, G., Breschi, L., & Cadenaro, M. (2021). Development of di-methacrylate quaternary ammonium monomers with antibacterial activity. *Acta Biomaterialia*, *129*, 138-147.

Fu, D., Hardy, J., & Szczepanski, C. R. (2025). Improvement of dentin bonding via adhesive monomers with multiple hydrogen bonding moieties. *Acta Biomaterialia*.

He, J., Söderling, E., Lassila, L. V., & Vallittu, P. K. (2012). Incorporation of an antibacterial and radiopaque monomer into dental resin system. *Dental Materials*, *28*(8), e110-e117.

He, X., Zhang, S., Yan, X., Huang, X., He, J., & Mai, S. (2026). Low-shrinkage-stress fluorinated methacrylate–thiol-ene resin composite: Bacterial anti-adhesion activity, physical properties, and biocompatibility. *Journal of Dentistry*, 106610.

Ho, Y. C., Yang, S. F., Peng, C. Y., Chou, M. Y., & Chang, Y. C. (2007). Epigallocatechin-3-gallate inhibits the invasion of human oral cancer cells and decreases the productions of matrix metalloproteinases and urokinase-plasminogen activator. *Journal of Oral Pathology & Medicine*, *36*(10), 588-593.

Hussain, L. A., Dickens, S. H., & Bowen, R. L. (2005). Properties of eight methacrylated beta-cyclodextrin composite formulations. *Dental Materials*, *21*(3), 210-216.

Ito, S., Iijima, M., Motai, F., Mizoguchi, I., & Saito, T. (2012). Effects of calcium salts of acidic monomers on mineral induction of phosphoprotein immobilized to agarose beads. *Journal of Biomedical Materials Research Part A*, *100*(10), 2760-2765.

Izutani, N., Imazato, S., Nakajo, K., Takahashi, N., Takahashi, Y., Ebisu, S., & Russell, R. R. (2011). Effects of the antibacterial monomer 12-methacryloyloxydodecylpyridinium bromide (MDPB) on bacterial viability and metabolism. *European Journal of Oral Sciences*, *119*(2), 175-181.

Jiao, Y., Ma, S., Li, J., Shan, L., Wang, Y., Tian, M., Yang, Y., Sun, J., Ban, J., & Chen, J. (2015). N-Acetyl cysteine (NAC)-directed detoxification of methacryloxylethyl cetyl ammonium chloride (DMAE-CB). *PLOS ONE*, *10*(8), e0135815.

Khabadze, Z., Dashtieva, M. Y., Meremkulov, R. A., Kubrin, A., Sheibanian, M., Fedotova, N., Pilshchikova, O., Meremkulov, A., Mordanov, O., & Malikovna, A. S. (2024). 10-MDP as the most important functional monomer of the

last generation self-etching adhesive systems. *Journal of International Dental and Medical Research*, *17*(1), 384-391.

Khalid, M., Salmiaton, A., Chuah, T., Ratnam, C., & Choong, S. T. (2008). Effect of MAPP and TMPTA as compatibilizer on the mechanical properties of cellulose and oil palm fiber empty fruit bunch–polypropylene biocomposites. *Composite Interfaces*, *15*(2-3), 251-262.

Lu, H., Carioscia, J. A., Stansbury, J. W., & Bowman, C. N. (2005). Investigations of step-growth thiol-ene polymerizations for novel dental restoratives. *Dental Materials*, *21*(12), 1129-1136.

Lucena, F. S. d., Logan, M., Lewis, S., Deatherage, N., Furuse, A. Y., & Pfeifer, C. S. (2024). A novel low shrinkage dimethacrylate monomer as an alternative to BisGMA for adhesive and resin-based composite applications. *Brazilian Oral Research*, *38*, e097.

Mohamadhoseini, M., & Mohamadnia, Z. (2025). Advances in beta-cyclodextrin-driven self-healing materials: Molecular design and multifunctional applications. *Advanced Materials*, *37*(44), e07227.

Perdigão, J. (2020). Current perspectives on dental adhesion:(1) Dentin adhesion–not there yet. *Japanese Dental Science Review*, *56*(1), 190-207.

Qiu, Y., & Saito, T. (2021). Novel bioactive adhesive monomer CMET promotes odontogenic differentiation and dentin regeneration. *International Journal of Molecular Sciences*, *22*(23), 12728.

Rao, Y., Qiu, Y., Altankhishig, B., Matsuda, Y., Hasan, M. R., & Saito, T. (2023). Novel universal bond containing bioactive monomer promotes odontoblast differentiation in vitro. *Journal of Functional Biomaterials*, *14*(10), 506.

Sinawehl, L., Steinbauer, P., Kojic, D., Slezak, P., Redl, H., & Baudis, S. (2025). Ternary thiol–ene systems as high-

performance bone adhesives for potential clinical use. *RSC Applied Polymers*, *3*(1), 137-145.

Sousa, A. C., Mascarenhas, P., Polido, M., & Vasconcelos e Cruz, J. (2024). Natural antibacterial compounds with potential for ıncorporation into dental adhesives: A systematic review. *Polymers*, *16*(22), 3217.

Sun, Q., Zhang, L., Bai, R., Zhuang, Z., Zhang, Y., Yu, T., Peng, L., Xin, T., Chen, S., & Han, B. (2021). Recent progress in antimicrobial strategies for resin-based restoratives. *Polymers*, *13*(10), 1590.

Thaweboon, S., Saito, T., & Thaweboon, B. (2021). Anti-biofilm formation of an adhesive containing calcium salts of acidic monomers against oral *Candida* related to root caries. *Key Engineering Materials*, *904*, 282-286.

Tümen, İ., Akkol, E. K., Taştan, H., Süntar, I., & Kurtca, M. (2018). Research on the antioxidant, wound healing, and anti-inflammatory activities and the phytochemical composition of maritime pine (Pinus pinaster Ait). *Journal of Ethnopharmacology*, *211*, 235-246.

Van Landuyt, K. L., Snauwaert, J., De Munck, J., Peumans, M., Yoshida, Y., Poitevin, A., Coutinho, E., Suzuki, K., Lambrechts, P., & Van Meerbeek, B. (2007). Systematic review of the chemical composition of contemporary dental adhesives. *Biomaterials*, *28*(26), 3757-3785.

Van Meerbeek, B., Yoshihara, K., Yoshida, Y., Mine, A., & Van Landuyt, K. L. (2011). State of the art of self-etch adhesives. *Dental Materials*, *27*(1), 17-28.

Yang, H., Li, K., Yan, H., Liu, S., Wang, Y., & Huang, C. (2017). High-performance therapeutic quercetin-doped adhesive for adhesive–dentin interfaces. *Scientific Reports*, *7*(1), 8189.

Yoshihara, K., Yoshida, Y., Hayakawa, S., Nagaoka, N., Kamenoue, S., Okihara, T., Ogawa, T., Nakamura, M., Osaka, A., & Van Meerbeek, B. (2014). Novel fluoro-carbon functional

monomer for dental bonding. *Journal of Dental Research*, *93*(2), 189-194.

Yue, J., Yang, H., Han, L., Zhu, M., Song, F., & Huang, C. (2016). Inhibitory effect of quercetin on the biofilm formation of *Streptococcus mutans*. *Chinese Journal of Stomatology*, *51*(6), 368-373.

Zhou, H., Li, F., Weir, M. D., & Xu, H. H. (2013). Dental plaque microcosm response to bonding agents containing quaternary ammonium methacrylates with different chain lengths and charge densities. *Journal of Dentistry*, *41*(11), 1122-1131.

BÖLÜM 7

KENDİNİ ONARAN KOMPOZİT REZİNLER: TEMEL MEKANİZMALAR VE GÜNCEL GELİŞMELER

CANSIN AŞKIN ÖZCAN[1]

Giriş

Kompozit rezin restorasyonlarda klinik başarısızlık farklı etkenlerin bir araya gelmesiyle ortaya çıkmaktadır. Posterior bölgede sekonder çürük ile restorasyon veya diş dokusunda gelişen kırıklar, restorasyonların yenilenmesini gerektiren başlıca nedenler arasında gösterilmektedir (Fernández et al., 2026). Materyal açısından değerlendirildiğinde ise ağız ortamında tekrarlayan mekanik yükler, rezin matriksin ve doldurucu ile matriks arasındaki arayüzün zaman içerisinde hasara uğramasına neden olabilir. Yorulma sürecinde gelişen mikroçatlaklar başlangıçta restorasyonun bütünlüğünü belirgin biçimde bozmayabilir; ancak tekrarlayan yükler altında ilerleyen çatlaklar daha geniş yapısal hasarlara ve sonuçta kırılmaya neden olabilir (Lohbauer et al., 2013). Bu nedenle bir restorasyonun mekanik dayanıklılığı yalnızca başlangıçtaki statik dayanım değerleriyle değil, biriken hasara karşı gösterdiği dirençle de

[1] Uzman Diş hekimi, Uşak Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi, Restoratif Diş Tedavisi Anabilim Dalı, Orcid: 0009-0004-9732-2280

ilişkilidir. Mevcut restoratif materyaller oluşan mikrohasarı kendi yapıları içerisinde giderme yeteneğine sahip değildir. Klinik tamir veya restorasyonun yenilenmesi, belirlenebilir bir defekt geliştikten sonra uygulanabilen tedavilerdir ve materyal içerisinde ilerleyen mikroskobik çatlaklara oluşum aşamasında müdahale etmez. Kendini onaran materyal yaklaşımı bu noktada farklı bir tasarım anlayışı ortaya koymaktadır. Burada amaç, hasarın materyal içerisinde başlattığı süreci bir onarım yanıtına dönüştürerek çatlak ilerlemesini sınırlandırmak ve hasar sonucunda kaybedilen yapısal veya mekanik bütünlüğü yeniden kazandırmaktır. Bu özellik, yorulmaya bağlı hasarın tamamen önlenmesinin mümkün olmadığı rezin esaslı restoratif materyaller açısından araştırılmaya değer bir yaklaşım oluşturmuştur (Althaqafi et al., 2020; Wang & Ding, 2024).

Dental kompozitlerde kendini onarma üzerine yürütülen çalışmalar henüz büyük ölçüde deneysel düzeydedir. Ancak son yıllarda farklı onarım mekanizmalarının geliştirilmesi, materyalin kendi özelliklerinden ödün vermeden onarım kapasitesi kazandırılması ve bu etkinliğin daha gerçekçi yaşlandırma ve yükleme koşullarında değerlendirilmesi üzerine giderek genişleyen bir literatür oluşmuştur. Bu bölümde dental kompozitlere kendini onarma özelliği kazandırmak amacıyla geliştirilen materyal stratejileri, bu sistemlerin temel çalışma prensipleri ve mevcut deneysel kanıtlar ele alınacaktır.

Kendini Onarma Kavramı ve Temel İlkeler

Kendini onarma, bir materyalin kullanım sırasında oluşan fiziksel hasara yanıt vererek kaybettiği yapısal veya işlevsel özelliklerin bir bölümünü yeniden kazanabilmesini ifade eder. Bu yaklaşım, hasarın ortaya çıkmasını bütünüyle engellemek yerine, oluşan hasarın ilerlemesini sınırlandırabilecek veya hasar sonrasında materyalin performansını kısmen geri kazandırabilecek bir mekanizmanın materyal tasarımına dâhil edilmesine dayanır.

Polimerik materyallerde hedeflenen özellik çoğunlukla çatlak oluşumu sonrasında mekanik bütünlüğün yeniden sağlanmasıdır (Wang & Urban, 2020). Bununla birlikte kendini onarma kavramı yalnızca çatlağın fiziksel olarak kapanması anlamına gelmez. Hasarlı yüzeylerin temas etmesi veya çatlak aralığının azalması, materyalin başlangıçtaki mekanik özelliklerini yeniden kazandığını tek başına göstermez. Bu nedenle kendini onarma davranışının değerlendirilmesinde gözlenen morfolojik değişimin yanı sıra kırılma tokluğu, dayanım veya diğer ilgili materyal özelliklerindeki geri kazanımın da dikkate alınması gerekir. Sentetik materyallerde kendini onarma düşüncesinin gelişiminde biyolojik sistemlerin hasara verdikleri yanıt önemli bir model oluşturmuştur. Canlı dokularda hasarın meydana geldiği bölgede başlayan ve doku bütünlüğünün yeniden oluşturulmasını amaçlayan süreçlerden farklı olarak sentetik polimerlerde hücresel veya metabolik bir iyileşme söz konusu değildir. Buradaki biyolojik esin, hasarın yalnızca bir bozulma olarak kalmaması ve aynı zamanda lokal bir onarım sürecini başlatabilmesidir. Bu nedenle kendini onaran polimerler biyolojik iyileşmeyi taklit eden materyallerden çok, biyolojik sistemlerdeki hasara yanıt verme prensibinden yararlanan tasarımlar olarak değerlendirilmelidir (Blaiszik et al., 2010).

Polimerlerde otonom kendini onarma kavramının gelişiminde White ve arkadaşlarının 2001 yılında yayımladıkları çalışma belirleyici bir aşama olmuştur. Araştırmacılar termoset bir polimer içerisine onarıcı ajan taşıyan mikrokapsüller yerleştirerek, çatlak oluşumunun doğrudan onarım sürecini başlatabildiğini göstermiştir. Bu çalışma kendini onaran polimerlerin ilk örneği olmamakla birlikte, hasarın herhangi bir dış müdahale olmadan materyal içerisinde lokal bir onarım yanıtı oluşturabileceğini deneysel olarak ortaya koymuş ve daha sonra geliştirilen kapsül temelli sistemler için temel oluşturmuştur (White et al., 2001). İzleyen yıllarda kendini onarma yaklaşımı yalnızca kapsül içeren

sistemlerle sınırlı kalmamış, farklı rezervuar sistemleri ile polimer ağının kendi kimyasal yapısından yararlanan yöntemleri de kapsayacak şekilde genişlemiştir.

Hasar ve Onarım Arasındaki İlişki

Kendini onaran bir materyalin tasarımında hasarın niteliği ile kullanılan onarım mekanizmasının birbiriyle uyumlu olması gerekir. Polimerlerde hasar, moleküler ölçekte bağ kopmalarından mikrometre düzeyindeki çatlaklara ve makroskopik kırıklara kadar farklı ölçeklerde ortaya çıkabilir. Her onarım sistemi bu hasarların tamamına aynı şekilde yanıt vermez. Örneğin çatlağın belirli bir taşıyıcı yapıyı kırmasıyla aktive olan bir sistemde, çatlak ile onarıcı bileşenin fiziksel olarak karşılaşması gerekir. Polimer ağındaki reversibl etkileşimlerden yararlanan sistemlerde ise hasarlı yüzeylerin yeniden temas etmesi ve ilgili moleküler grupların etkileşime girebilecek hareketliliğe sahip olması gerekir (Patrick et al., 2016). Bu nedenle kendini onarma kapasitesi materyalin değişmez ve tek başına değerlendirilebilecek bir özelliği değildir. Hasarın büyüklüğü, oluşma biçimi, onarım için ayrılan süre, çevresel koşullar ve değerlendirilen materyal özelliği elde edilen sonucu değiştirebilir. Bir materyalin belirli deney koşullarında kırılma tokluğunun büyük bölümünü geri kazanması, farklı bir çatlak geometrisinde veya tekrarlayan yorulma yükleri altında aynı düzeyde onarım göstereceği anlamına gelmez. Benzer şekilde yüzeyde gözlenen çatlak kapanması ile mekanik performansın geri kazanımı birbirinin yerine kullanılamaz. Bu ayrım, kendini onaran dental kompozitlere ilişkin deneysel çalışmaların değerlendirilmesinde özellikle dikkate alınmalıdır (Ning et al., 2023; Yahyazadehfar et al., 2018).

Kendini onarma sonucunda başlangıç özelliğinin ne ölçüde geri kazanıldığını tanımlamak amacıyla literatürde “healing efficiency” kavramı kullanılmaktadır. Bu değer, incelenen özelliğin

onarım sonrasındaki düzeyinin hasar öncesindeki düzeyle karşılaştırılmasına dayanır. Ancak değerlendirmeye alınan özellik çalışmalar arasında farklılık gösterebildiğinden, bildirilen onarım oranlarının yalnızca sayısal değerleri üzerinden karşılaştırılması yanıltıcı olabilir. Dental kompozit çalışmalarında bu amaçla sıklıkla kırılma tokluğundaki geri kazanım kullanılmıştır (Althaqafi et al., 2020).

Otonom ve Dış Uyaranla Aktive Edilen Onarım

Kendini onaran sistemler, onarım sürecinin başlaması için dışarıdan bir uyaran gerekip gerekmediğine göre de sınıflandırılabilir. Otonom sistemlerde hasarın kendisi onarım mekanizmasını başlatan olaydır. Materyal içerisinde ilerleyen bir çatlağın onarıcı ajanı taşıyan yapıyı bozması ve ajanın hasarlı bölgeye ulaşmasını sağlaması bu yaklaşımın tipik bir örneğidir (Fugolin & Pfeifer, 2022). Onarımın başlatılması için hasarın ayrıca belirlenmesi veya materyale dışarıdan enerji uygulanması gerekmez. Otonom olmayan sistemlerde ise hasarlı yapının yeniden düzenlenebilmesi için sıcaklık, ışık veya başka bir dış uyaranın uygulanması gerekebilir. Dış uyaranın işlevi kullanılan sisteme göre değişir; polimer zincirlerinin hareketliliğini artırabilir, reversibl bir reaksiyonu başlatabilir veya hasarlı yüzeylerde yeniden bağ oluşmasını kolaylaştırabilir. Bu sistemlerde materyal kendini onarma kapasitesine sahip olsa da süreç yalnızca hasarın meydana gelmesiyle başlamaz (Althaqafi et al., 2020; Wang & Ding, 2024).

Otonomluk, kullanılan onarım mekanizmasından bağımsız olarak değerlendirilmesi gereken bir özelliktir. Bu nedenle “otonom” ve “ekstrinsik” terimleri eş anlamlı değildir. Ekstrinsik sistemlerin önemli bir bölümü hasarın onarıcı ajanı serbest bırakması nedeniyle otonom davranırken, bazı intrinsik sistemler dışarıdan uygulanan bir uyaran gerektirebilir (Fugolin & Pfeifer, 2022). Buna karşılık uygun çevresel koşullarda kendiliğinden yeniden düzenlenebilen intrinsik

sistemlerin de geliştirilmesi mümkündür. Bir materyalin sınıflandırılması sırasında onarım kapasitesinin nereden kaynaklandığı ile onarımın nasıl aktive edildiğinin ayrı ayrı değerlendirilmesi bu terminolojik karışıklığı önler.

Kendini Onaran Polimerlerin Temel Sınıflandırılması

Onarım kapasitesinin materyale nasıl kazandırıldığı esas alındığında kendini onaran polimer sistemleri temel olarak ekstrinsik ve intrinsik olmak üzere iki grupta incelenmektedir. Ekstrinsik sistemlerde onarım için gerekli bileşen materyalin esas polimer ağından ayrı olarak sisteme eklenir. Onarıcı ajan mikrokapsül, kanal veya başka bir rezervuar içerisinde depolanabilir ve hasar sonrasında ihtiyaç duyulan bölgeye ulaştırılır. İntrinsik sistemlerde ise ayrı bir onarıcı ajan rezervuarına gereksinim duyulmaz; onarım kapasitesi polimer ağının kendi moleküler yapısındaki reversibl etkileşimlerden kaynaklanır (Fugolin & Pfeifer, 2017).

Bu iki yaklaşım yalnızca farklı onarım mekanizmalarını değil, farklı materyal tasarımı sorunlarını da beraberinde getirir. Ekstrinsik sistemlerde onarıcı bileşenin matriks içerisine eklenmesi, bu bileşenin miktarı, dağılımı ve matriksle olan arayüzü üzerinde kontrol gerektirir. İntrinsik sistemlerde ise mekanik olarak kararlı bir polimer ağı oluşturulurken hasar sonrasında yeniden düzenlenmeye izin verecek yeterli moleküler hareketliliğin korunması gerekir. Bu nedenle bir sistemin kendini onarma kapasitesi yalnızca onarım reaksiyonunun gerçekleşebilmesine değil, onarım mekanizmasının materyalin diğer fiziksel ve mekanik özellikleriyle uyumuna da bağlıdır (Singer et al., 2023).

Ekstrinsik Kendini Onaran Dental Kompozitler

Ekstrinsik kendini onarma yaklaşımında onarım kapasitesi, polimer ağının kendi yapısından değil, materyale ayrıca eklenen bir onarıcı sistemden kaynaklanır. Onarıcı ajan, hasar oluşuncaya kadar kapsül, kanal veya benzeri bir taşıyıcı içerisinde ana matriksten ayrı

tutulur ve taşıyıcının hasarla birlikte bozulması sonucunda serbest kalır. Dental kompozitlerde bu amaçla en fazla araştırılan yaklaşım mikrokapsül temelli sistemlerdir ve dental alandaki ilk deneysel çalışmaların önemli bir bölümü bu tasarım üzerinden geliştirilmiştir (Althaqafi et al., 2020). Ekstrinsik sistemlerin bir avantajı, mevcut termoset rezin matriksin tamamen yeniden tasarlanmasını gerektirmeden kompozite ayrı bir onarım işlevi kazandırılabilmesidir (Fugolin & Pfeifer, 2022). Bununla birlikte sisteme eklenen bileşenlerin kompozitin mekanik, reolojik ve polimerizasyon özellikleriyle uyumlu olması gerekir.

Onarım süreci, ilerleyen çatlağın onarıcı ajanı taşıyan yapıyla karşılaşmasıyla başlar. Taşıyıcının bütünlüğü bozulduğunda serbest kalan ajan çatlak boşluğuna ilerler ve kullanılan sisteme bağlı olarak polimerizasyon veya başka bir sertleşme reaksiyonuna katılır. Bu aşamada ajanın akışkanlığı, çatlağın geometrisi ve hasarlı yüzeyleri ıslatma kapasitesi çatlak boyunca yayılımı etkiler (Junling Wu et al., 2016). Düşük viskoziteli bir ajan dar çatlaklara daha kolay ulaşabilirken, reaksiyonun çok erken başlaması yeterli yayılımı engelleyebilir; çok yavaş gerçekleşmesi ise çatlak yüzeyleri arasında mekanik bütünlüğün oluşmasını geciktirebilir (Ning et al., 2021). Bu nedenle başarılı bir onarım için ajanın yalnızca serbest kalması değil, uygun zamanda hasarlı bölgeye ulaşması ve burada yeterli bir yapı oluşturması gerekir.

Onarım reaksiyonunun başlatılma biçimi sistemler arasında farklılık gösterir. Bazı tasarımlarda onarıcı ajan kapsül içerisinde tutulurken katalizör veya başlatıcı matrikse yerleştirilir ve iki bileşen çatlak oluştuğunda bir araya gelir. Başka sistemlerde reaktif bileşenler farklı taşıyıcılarda depolanabilir veya serbest kalan ajan matriksteki başka bir bileşenle reaksiyona girebilir. Dental kompozitlerde monomer polimerizasyonuna dayanan sistemlerin yanı sıra farklı reaksiyonlardan yararlanan tasarımlar da geliştirilmiştir. Ekstrinsik yaklaşımın ortak özelliği, kullanılan

kimyadan bağımsız olarak onarım için gerekli bileşenin hasar oluşuncaya kadar ana polimer ağından ayrı tutulmasıdır (White et al., 2001).

Dental literatürde kullanılan onarıcı sistemler de zaman içerisinde değişmiştir. İlk çalışmalarda genel polimer bilimi için geliştirilen DCPD ve katalizör temelli sistemler dental rezinlere uyarlanmış, daha sonra TEGDMA gibi dental monomerlerle daha uyumlu onarıcı ajanlara ve farklı reaksiyon mekanizmalarına yönelinmiştir (Wertzberger et al., 2010; J. Wu et al., 2016). Bu çalışmalar bazı deneysel kompozitlerde hasar sonrasında mekanik özelliklerin kısmen geri kazanılabildiğini göstermiştir. Ancak elde edilen sonuçlar kapsülün yapısı ve miktarı, onarıcı ajanın özellikleri, başlatıcı sistem ve uygulanan test koşullarına bağlı olarak değişmektedir (G. Huyang et al., 2016).

Onarıcı ajanın çatlağı doldurması tek başına başarılı bir mekanik onarım anlamına gelmez. Sertleşen yapının çatlak yüzeyleriyle yeterli bağlantı kurması ve hasarlı bölgede yeniden yük aktarımına izin vermesi gerekir. Bu nedenle onarımın değerlendirilmesinde çatlağın morfolojik olarak kapanmasının yanı sıra kaybedilen mekanik özelliklerin ne ölçüde geri kazanıldığı da dikkate alınmalıdır (Ning et al., 2021). Taşıyıcı yapının özellikleri de bu sürecin önemli bir parçasıdır. Özellikle mikrokapsüller, kompozitin hazırlanması ve yerleştirilmesi sırasında bütünlüklerini koruyacak kadar dayanıklı, ilerleyen bir çatlakla karşılaştıklarında ise kırılabilecek kadar duyarlı olmalıdır. Kapsülün boyutu, dağılımı, kabuk özellikleri ve matriksle olan mekanik ilişkisi çatlakla karşılaşma ve onarıcı ajanın serbest kalma biçimini etkileyebilir. Üç boyutlu görüntüleme çalışmalarında ilerleyen çatlakların kapsülleri kademeli olarak aktive edebildiği ve çatlak genişledikçe onarıcı ajanın boşluğa salınmaya devam ettiği gösterilmiştir (George Huyang et al., 2016; McDonald et al., 2019). Dolayısıyla ekstrinsik kendini onarma, tek bir reaksiyondan çok birbirini izleyen

aşamalardan oluşur. Taşıyıcının hasarla aktive olması, onarıcı ajanın serbest kalması ve çatlağa ulaşması, uygun reaksiyonun gerçekleşmesi ve oluşan yapının mekanik bütünlüğe katkı sağlaması sistemin başarısını birlikte belirler. Bu nedenle ekstrinsik dental kompozitler değerlendirilirken yalnızca bildirilen onarım oranı değil, onarım mekanizmasının güvenilirliği ve bu işlev kazandırılırken kompozitin başlangıç özelliklerinin ne ölçüde korunduğu da göz önünde bulundurulmalıdır.

Mikrokapsül Temelli Sistemler

Mikrokapsül temelli yaklaşım, dental kompozitlerde ekstrinsik kendini onarma amacıyla en fazla araştırılan yöntemdir. Sistemin temel birimi, sıvı veya düşük viskoziteli bir onarıcı bileşeni çevresindeki katı kabuk sayesinde rezin matriksten izole eden mikroskobik bir rezervuardır. Bu yapı iki farklı işlevi aynı anda yerine getirir. Çekirdek kısmı onarım için gerekli reaktif bileşeni depolarken, kabuk materyali bu bileşenin kompozitin hazırlanması, polimerizasyonu ve kullanım süresi boyunca kontrolsüz biçimde matrikse geçmesini sınırlar. Dolayısıyla mikrokapsül yalnızca bir taşıyıcı değil, onarıcı ajanın doğru zamana kadar kimyasal olarak kullanılabilir durumda tutulmasını sağlayan işlevsel bir bileşendir (Althaqafi et al., 2020). Kapsül kabuğunun özellikleri, sistemin nasıl davranacağını doğrudan etkiler. Kabuk, kompozitin hazırlanması sırasında uygulanan karıştırma ve yerleştirme işlemlerine dayanabilecek bütünlüğe sahip olmalıdır. Bunun yanında ilerleyen bir çatlak kapsüle ulaştığında kırılmaya izin vermesi gerekir. Aşırı dayanıklı bir kabuk çatlak tarafından aktive edilmeyebilir; mekanik olarak zayıf bir kapsül ise kompozitin üretimi sırasında parçalanarak onarıcı ajanı zamanından önce serbest bırakabilir (Rozza et al., 2024). Kabuğun geçirgenliği de önem taşır. Depolama sırasında çekirdek materyalinin difüzyonla kaybedilmesi veya dış ortamdan kapsül içerisine bileşen geçişi, kullanılabilir onarıcı ajan miktarını ve uzun dönem stabiliteyi değiştirebilir. Bu açıdan kapsülün

kimyasal bileşimi kadar kabuk kalınlığı, yüzey morfolojisi ve yapısal bütünlüğü de materyal tasarımının bir parçasıdır (Huynh et al., 2024).

Dental self healing çalışmalarında kapsüllerin hazırlanmasında farklı yöntemler kullanılmıştır. Poli(üre formaldehit) kabuklu sistemlerde en yaygın yaklaşımlardan biri yağ içinde su veya su içinde yağ emülsiyonlarından yararlanılan in situ polimerizasyondur. Uygun koşullar sağlandığında kabuk polimeri emülsiyon damlacıklarının çevresinde oluşur ve çekirdek faz kapalı bir yapı içerisinde tutulur (J. Wu et al., 2016). Bununla birlikte mikrokapsül üretimi tek bir yöntemle sınırlı değildir. PMMA esaslı kapsüllerin hazırlanmasında çözücü buharlaştırma yönteminin kullanıldığı dental çalışmalar da bulunmaktadır; silika temelli kapsüller ise farklı kapsülasyon süreçleriyle elde edilmiştir. Üretim yönteminin seçimi, yalnızca kapsülün kimyasal yapısını değil, elde edilen partiküllerin boyut dağılımını, yüzey morfolojisini ve çekirdek materyalini tutma kapasitesini de etkileyebilir (Ahangaran & Navarchian, 2022).

Emülsiyon temelli üretimde karıştırma koşulları bu ilişkinin açık örneklerinden biridir. Karıştırma hızı ve emülsiyonun kararlılığı değiştikçe oluşan damlacıkların boyutu, buna bağlı olarak da son kapsül çapı ve dağılımı değişebilir. Dental kullanıma yönelik mikrokapsüllerin sentezini inceleyen çalışmalar, üretim parametrelerinde yapılan değişikliklerin daha homojen veya daha heterojen kapsül popülasyonları oluşturabildiğini göstermiştir. Bu durum yalnızca üretim tekniği açısından önemli değildir. Kompozit içerisinde çok geniş bir kapsül boyutu dağılımının bulunması, kapsüllerin matrikste nasıl yerleştiğini ve çatlakla karşılaşma olasılığını değiştirebilir. Daha büyük kapsüller daha fazla miktarda onarıcı ajan taşıyabilirken, aynı zamanda kompozitin sürekli fazında daha büyük heterojenlikler oluşturabilir. Küçük kapsüller ise matrikse daha fazla sayıda dağıtılabilmesine rağmen her bir

kapsülün taşıdığı ajan miktarı daha düşüktür. Bu ilişkinin onarım etkinliği üzerindeki sonucu doğrudan deneysel olarak da gösterilmiş, kapsül çapının değiştirilmesiyle aynı rezin sisteminde farklı self healing performansları elde edilmiştir (Ning et al., 2021; Tăut et al., 2024).

Kapsülün yalnızca büyüklüğü değil, morfolojisi ve matriks içerisindeki dağılımı da önemlidir. Küresel veya küresele yakın morfoloji, kapsülasyon işleminin kontrolü ve kapsüllerin rezin içerisinde dağıtılması açısından tercih edilmektedir. Yüzey yapısı ise kapsül ile çevresindeki organik matriks arasındaki mekanik etkileşimi değiştirebilir. Mikrokapsüllerin kümelenmesi, lokal olarak kapsül oranının yükselmesine ve kompozit içerisinde zayıf bölgelerin oluşmasına yol açabileceğinden, homojen dağılım materyal tasarımında hedeflenen özelliklerden biridir. Kapsül ile matriks arasındaki arayüzün aşırı güçlü olması çatlağın kapsülü kırmak yerine çevresinden yön değiştirmesine, yetersiz bağlantı ise arayüzde istenmeyen ayrılmalara neden olabilir (Althaqafi et al., 2020). Bu nedenle self healing açısından işlevsel bir kapsülün yalnızca yeterli miktarda onarıcı ajan içermesi yeterli değildir; kompozit içerisinde çatlakla kontrollü biçimde etkileşime girecek mekanik özelliklere de sahip olması gerekir.

Dental alandaki çalışmalarda kapsül boyutu ve morfolojisinin incelenmesi için taramalı elektron mikroskopisi, yüzey özelliklerinin daha ayrıntılı değerlendirilmesi için atomik kuvvet mikroskopisi, kabuk ve çekirdek bileşenlerinin kimyasal doğrulanması için Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi gibi yöntemler kullanılmıştır (Tăut et al., 2024). Daha yakın tarihli araştırmalarda yüksek performanslı sıvı kromatografisi ve düşük alan nükleer manyetik rezonans yöntemlerinden de yararlanılarak kapsül içerisinde bulunan sıvı fazın varlığı ve zaman içerisindeki salınım davranışı değerlendirilmiştir. Böylece kapsülasyonun başarılı olup olmadığı yalnızca mikroskobik görüntü üzerinden

değil, çekirdek ajanın gerçekten kapsül içerisinde tutulduğunu ve kontrollü biçimde serbest bırakılabildiğini gösteren kimyasal analizlerle de doğrulanabilmektedir (Taut et al., 2026).

Mikrokapsülün kompozite eklenmesiyle birlikte kapsül, artık bağımsız bir partikül olmaktan çıkar ve restoratif materyalin mikro yapısının bir parçası haline gelir. Bu noktada kapsül çapı, kapsül oranı, kabuk materyali, çekirdek hacmi ve matriks içerisindeki dağılım birbiriyle ilişkili değişkenler haline gelir. Daha yüksek kapsül miktarı teorik olarak bir çatlağın kapsülle karşılaşma ve yeterli miktarda onarıcı ajan açığa çıkarma olasılığını artırabilir. Buna karşılık organik ve inorganik fazların yerini alan kapsüllerin fazla miktarda eklenmesi başlangıçtaki mekanik özellikleri olumsuz etkileyebilir. Nitekim dental kompozitler üzerinde yapılan çalışmalar kapsül konsantrasyonu ve boyutundaki değişikliklerin hem onarım etkinliğini hem de kırılma ve eğilme davranışını değiştirebildiğini göstermektedir (Ning et al., 2021). Dolayısıyla başarılı bir mikrokapsül sistemi, maksimum sayıda kapsül içeren sistem değil; yeterli onarım kapasitesini sağlarken restoratif materyalin başlangıç özelliklerini kabul edilebilir düzeyde koruyan sistemdir.

DCPD ve Grubbs Katalizörüne Dayalı Erken Sistemler

Mikrokapsül temelli kendini onaran polimerlerin ilk önemli örneklerinden biri, diklopentadien (DCPD) ve Grubbs katalizörünün birlikte kullanıldığı sistemdir. DCPD, uygun bir katalizör varlığında polimerleşebilen düşük viskoziteli bir monomer, Grubbs katalizörü ise bu reaksiyonu başlatan rutenyum esaslı bir katalizördür. White ve arkadaşlarının 2001 yılında geliştirdiği sistemde DCPD, üre formaldehit mikrokapsüller içinde depolanmış, Grubbs katalizörü ise polimer matriksine eklenmiştir. Çatlağın kapsülü kırmasıyla serbest kalan DCPD, katalizörle temas ederek halka açılma metatez polimerizasyonuna uğramış ve çatlak yüzeyleri arasında yeni bir

polimer yapı oluşturmuştur (White et al., 2001). Böylece onarım süreci dışarıdan bir müdahale gerektirmeden doğrudan çatlak oluşumuyla başlatılmıştır.

DCPD ve Grubbs katalizörüne dayalı sistem, daha sonra dental kompozitlere uyarlanmıştır. Wertzberger ve arkadaşları, DCPD içeren mikrokapsüller ile Grubbs katalizörünü deneysel bir dental kompozitte değerlendirerek kırılma sonrasında başlangıç kırılma tokluğunun yaklaşık %57'sinin geri kazanılabildiğini göstermiştir. Bununla birlikte mikrokapsül içeren gruplarda elastik modülde azalma bildirilmiş, böylece onarım kapasitesi kadar materyalin başlangıç mekanik özelliklerinin de değerlendirilmesi gerektiği ortaya konmuştur (Wertzberger et al., 2010). Sonraki çalışmalarda kapsül yapısının dental rezinle uyumu da araştırılmış ve düşük kapsül konsantrasyonlarında eğilme dayanımı ile sertlik özelliklerinin büyük ölçüde korunabildiği gösterilmiştir (Then et al., 2011). Buna karşın DCPD ve Grubbs katalizörüne dayalı sistem, biyolojik uygunluk konusundaki kaygılar ve katalizörün maliyeti nedeniyle dental alanda yaygınlaşmamıştır. Bu sınırlılıklar, sonraki araştırmalarda dental rezinlerde zaten kullanılan dimetakrilat monomerlerine dayalı alternatif onarıcı sistemlere yönelimi artırmıştır.

TEGDMA ve DHEPT Temelli Sistemler

DCPD ve Grubbs katalizörüne dayalı sistemlerin ardından, dental rezinlerle daha uyumlu onarıcı bileşenlerin geliştirilmesine yönelinmiştir. Bu amaçla, dental materyallerde kullanılan düşük viskoziteli bir monomer olan TEGDMA ile polimerizasyonu destekleyen DHEPT mikrokapsüller içerisinde birlikte kullanılmıştır. Çatlak oluştuğunda kapsüllerden serbest kalan bu bileşenlerin polimerleşmesiyle hasarlı bölgede yeni bir yapı oluşturulması ve mekanik bütünlüğün kısmen geri kazanılması hedeflenmiştir (Rozza et al., 2024; J. Wu et al., 2016).

Deneysel çalışmalarda bu sistemle kırılma tokluğunda yaklaşık %65'e varan geri kazanım sağlanırken, uygun kapsül oranlarında kompozitin başlangıç mekanik özelliklerinin büyük ölçüde korunabildiği bildirilmiştir (J. Wu et al., 2016). Ayrıca altı aylık su yaşlandırması sonrasında onarım kapasitesinin önemli ölçüde azalmaması, sistemin nemli koşullardaki stabilitesine ilişkin olumlu bulgular sağlamıştır (Junling Wu et al., 2016). Bununla birlikte onarım etkinliğinin kapsül boyutu, miktarı ve başlatıcı sistem gibi değişkenlerden etkilendiği gösterilmiştir (Ning et al., 2021). Mevcut sonuçlar umut verici olmakla birlikte, uzun dönem stabilite ve biyolojik güvenliğe ilişkin verilerin sınırlı olması nedeniyle TEGDMA ve DHEPT temelli kompozitler halen deneysel düzeyde değerlendirilmektedir (Althaqafi et al., 2024).

Vasküler ve Rezervuar Temelli Ekstrinsik Sistemler

Vasküler kendini onarma sistemlerinde onarıcı ajan, materyal içerisinde oluşturulan içi boş kanallar veya tübüler yapılar içinde depolanır. İlerleyen çatlak bu kanallardan birini bozduğunda onarıcı bileşen hasarlı bölgeye taşınır ve uygun reaksiyon koşullarında çatlak içerisinde sertleşir. Çalışma prensibi mikrokapsül temelli sistemlere benzese de onarıcı ajanın depolanma biçimi farklıdır. Mikrokapsüllerde birbirinden bağımsız ve sınırlı miktarda ajan içeren rezervuarlar bulunurken, vasküler sistemlerde birbiriyle bağlantılı kanallar oluşturulabilir. Bu yapının başlıca avantajı, hasarlı bölgeye daha fazla miktarda onarıcı ajan ulaştırılabilmesi ve uygun şekilde tasarlanmış bağlantılı ağlarda aynı bölgede birden fazla onarım döngüsünün teorik olarak mümkün olmasıdır (Toohey et al., 2007). Bu özellik, kapsül içerisindeki ajan tüketildikten sonra aynı kapsülün yeniden işlev göremediği mikrokapsül sistemlerinden önemli bir fark oluşturur. Genel polimer literatüründe üç boyutlu mikrokanal ağları kullanılarak tekrarlayan hasarların birden fazla kez onarılabildiği deneysel olarak gösterilmiştir (Fugolin & Pfeifer, 2022).

Vasküler ağların oluşturulmasında içi boş lifler, geçici lif veya iskeletlerin materyal içerisinden uzaklaştırılmasıyla elde edilen kanallar ve üç boyutlu üretim teknikleri gibi farklı yöntemler geliştirilmiştir. Bununla birlikte bu yapıların küçük hacimli dental restoratif materyallere aktarılması kolay değildir. Kanal ağının restorasyon içerisinde yeterli bölgeye ulaşması gerekirken, aynı zamanda materyalin mekanik bütünlüğünü zayıflatmaması gerekir. Kanalların çapı ve dağılımı, onarıcı ajanın akış özellikleri ve çatlağın kanallarla karşılaşma olasılığı sistemin işlevini doğrudan etkileyebilir (Khan, 2025). Bu nedenle vasküler sistemler kendini onaran materyaller açısından dikkat çekici bir yaklaşım olmakla birlikte, dental kompozitlerde mikrokapsül temelli sistemler kadar gelişmiş değildir. Mevcut dental literatürde mikrokanal ağlarının doğrudan restoratif kompozitlerde kullanıldığı deneysel çalışmalar oldukça sınırlıdır ve güncel değerlendirmelerde bu yaklaşımın diş hekimliğinde henüz yeterince araştırılmadığı belirtilmektedir. Özellikle üç boyutlu üretim teknolojilerindeki gelişmelerin, gelecekte mikrokanal içeren indirekt kompozit restorasyonların veya diğer polimerik dental yapıların üretimini kolaylaştırabileceği düşünülmektedir (Fugolin & Pfeifer, 2022). Ancak günümüzde bu yaklaşım, doğrudan klinik uygulamaya yakın bir yöntemden çok, gelecekte geliştirilme potansiyeli bulunan bir materyal tasarım stratejisi olarak değerlendirilmelidir.

İntrinsik Kendini Onaran Dental Polimer Sistemleri

İntrinsik kendini onaran sistemlerde onarım kapasitesi, materyale sonradan eklenen bir kapsül veya rezervuardan değil, polimer ağının kendi moleküler yapısından kaynaklanır. Polimer içerisinde hasar sırasında kopabilen ancak uygun koşullar oluştuğunda yeniden kurulabilen bağlar veya moleküler etkileşimler bulunur. Çatlak oluştuğunda hasarlı yüzeylerdeki bu bağlantıların bir bölümü bozulur. Yüzeylerin yeniden temas etmesi ve ilgili moleküler grupların birbirine yaklaşabilmesi durumunda

bağlantıların yeniden oluşması, çatlak bölgesindeki bütünlüğün kısmen geri kazanılmasına olanak sağlayabilir (Bompolaki et al., 2022). Bu yönüyle intrinsik yaklaşım, onarım için tüketilebilir miktarda bir ajan depolayan ekstrinsik sistemlerden ayrılır.

Onarımın gerçekleşebilmesi yalnızca reversibl bağların bulunmasına bağlı değildir. Hasar sonrasında birbirinden uzaklaşan polimer zincirlerinin veya fonksiyonel grupların yeniden etkileşebilmesi için belirli ölçüde moleküler hareketlilik gerekir. Bu hareket bazı materyallerde ortam koşullarında yeterli olabilirken, bazı sistemlerde sıcaklık veya ışık gibi bir dış uyaranla artırılabilir (Fugolin & Pfeifer, 2022). Hasarın büyüklüğü de süreci etkiler. Birbirine yakın çatlak yüzeyleri arasında moleküler etkileşimlerin yeniden kurulması mümkün olabilirken, geniş bir kırık sonucunda tamamen ayrılmış yüzeylerin aynı mekanizmayla bütünleşmesi çok daha güçtür. Bu özellik dental polimerler açısından önemli bir tasarım sorununu beraberinde getirir (Khan, 2025). Rezin esaslı restoratif materyallerde mekanik dayanım, aşınma direnci ve boyutsal kararlılık için yoğun çapraz bağlı ve rijit bir polimer ağı oluşturulması istenir. Ancak yüksek çapraz bağ yoğunluğu, zincir hareketliliğini azaltarak intrinsik onarım için gerekli olan moleküler yeniden düzenlenmeyi sınırlandırabilir. Daha hareketli bir polimer ağı onarımı kolaylaştırabilir, fakat aynı değişiklik materyalin sertliğini ve mekanik dayanımını olumsuz etkileyebilir. Bu nedenle intrinsik kendini onaran dental materyallerin geliştirilmesinde temel problem, onarım için yeterli moleküler hareketliliği sağlarken restoratif materyalden beklenen mekanik özellikleri koruyabilmektir (Li et al., 2023).

Ekstrinsik sistemlerden farklı olarak, onarım mekanizmasının sınırlı miktardaki bir kapsül içeriğinin tüketilmesine bağlı olmaması intrinsik sistemlere tekrarlanabilir onarım açısından teorik bir avantaj sağlar. Reversibl bağlantılar uygun koşullarda birden fazla kez bozulup yeniden oluşabilir.

Bununla birlikte bu durum sınırsız sayıda onarım yapılabileceği veya materyalin her hasardan sonra başlangıç özelliklerini tamamen geri kazanacağı anlamına gelmez. Tekrarlayan mekanik hasarlar polimer ağında kalıcı değişiklikler oluşturabilir ve bağların yeniden oluşma derecesi kullanılan polimer yapısına, çevresel koşullara ve hasarın niteliğine bağlı olarak değişebilir (Fugolin & Pfeifer, 2022).

İntrinsik kendini onaran polimerlerde başlıca iki moleküler yaklaşım öne çıkmaktadır. İlkinde, polimer ağını oluşturan kovalent bağların kontrollü biçimde yeniden düzenlenebilmesinden yararlanılır. İkinci yaklaşımda ise hidrojen bağları gibi reversibl kovalent olmayan etkileşimler onarım sürecine katılır. Genel polimer biliminde her iki stratejiyle de çok sayıda kendini onaran materyal geliştirilmiş olmakla birlikte, dental materyallere ilişkin doğrudan deneysel kanıt mikrokapsül temelli ekstrinsik sistemlere kıyasla oldukça sınırlıdır. Bu nedenle intrinsik sistemler değerlendirilirken genel polimer literatüründe gösterilen mekanizmalar ile dental materyaller üzerinde doğrudan sınanmış uygulamaların birbirinden ayrılması gerekir.

Dinamik Kovalent Bağlara Dayalı Sistemler

Dinamik kovalent bağlar, normal kullanım koşullarında polimer ağının bütünlüğünü korurken uygun bir uyaran veya kimyasal ortam oluştuğunda kopabilen ve yeniden kurulabilen bağlardır. Geleneksel termoset rezinlerde polimerizasyon sonrasında oluşan kovalent ağ büyük ölçüde kalıcıdır. Dinamik bağların polimer yapısına dahil edilmesi ise ağın belirli bölgelerde yeniden düzenlenmesine olanak sağlayabilir. Bu özellik, hasar sırasında kopan bağlantıların yeniden oluşturulması veya gerilim yoğunlaşan bölgelerde bağ değişimi yoluyla gerilimin dağıtılması açısından kendini onaran materyaller için kullanılmaktadır (Khan, 2025; Sowan et al., 2020).

Dental materyallerde bu yaklaşımın doğrudan araştırıldığı örneklerden biri, doldurucu ile rezin matriks arasındaki arayüzün dinamik hale getirilmesidir. Sowan ve arkadaşları geleneksel Bis GMA ve TEGDMA esaslı bir dental rezinde silika doldurucuların yüzeyini tiyol ve tiyoester grupları içeren bir sistemle modifiye etmiştir. Bu gruplar arasındaki bağ değişimi sayesinde doldurucu ile matriks arasındaki arayüz tamamen sabit bir yapı olmaktan çıkarılarak, oluşan gerilimlere karşı yeniden düzenlenebilen bir bölge haline getirilmiştir. Çalışmada bu dinamik arayüzün polimerizasyon sırasında ve sonrasında gelişen gerilimlerin azaltılmasına katkı sağladığı, aynı zamanda materyalin kırılmaya karşı direncini artırabildiği gösterilmiştir (Sowan et al., 2020). Buradaki yaklaşım klasik mikrokapsül sistemlerinden farklıdır; çatlak oluştuktan sonra boşluğu dolduran ayrı bir ajan bulunmaz. Bunun yerine hasarın gelişmeye eğilimli olduğu arayüzdeki bağların yeniden düzenlenebilmesi hedeflenir.

Dental kompozitler açısından dinamik kovalent bağların önemli bir avantajı, onarım işlevinin ayrı bir kapsül veya onarıcı sıvıya bağlı olmamasıdır. Buna karşılık bağ değişiminin ağız ortamına uygun koşullarda gerçekleşmesi gerekir. Yüksek sıcaklık veya güçlü kimyasal uyaran gerektiren reaksiyonların doğrudan klinik kullanıma aktarılması gerçekçi değildir. Ayrıca dinamik yapı kazandırılırken polimer ağının sertliği, aşınma direnci ve uzun dönem stabilitesinin korunması gerekir (Li et al., 2023). Bu nedenle mevcut çalışmalar, dinamik kovalent kimyanın dental materyaller için uygulanabilir olduğunu göstermeye başlamış olsa da, yaklaşım henüz mikrokapsül temelli sistemler kadar kapsamlı deneysel kanıta sahip değildir.

Supramoleküler Kendini Onarma Sistemleri

Supramoleküler kendini onarma sistemlerinde polimer zincirleri arasındaki bağlantı, yeniden kurulabilen kovalent olmayan

etkileşimlere dayanır. Hidrojen bağlarının yanı sıra iyonik etkileşimler, metal ligand koordinasyonu, π–π etkileşimleri ve konak konuk kompleksleri de bu amaçla kullanılmaktadır (Li et al., 2023). Tek tek zayıf olan bu etkileşimler, çok sayıda bir araya geldiklerinde polimer ağına bütünlük kazandırabilir ve hasar sonrasında yeniden oluşarak onarım sürecine katkı sağlayabilir (Fugolin & Pfeifer, 2022). Bu bağların bazı dinamik kovalent sistemlere göre daha ılımlı koşullarda yeniden kurulabilmesi avantaj sağlarken, yüksek moleküler hareketlilik ile mekanik dayanım arasında denge kurulması gerekir. Bu durum, yüksek dayanım gerektiren dental kompozitlerde supramoleküler onarımın uygulanmasını güçleştirebilmektedir (Li et al., 2023).

Dental alandaki çalışmalar özellikle adeziv sistemler üzerinde yoğunlaşmıştır. Birden fazla hidrojen bağı oluşturabilen ureidopirimidinon (UPy) grupları içeren deneysel monomerlerin adezivlere eklenmesiyle mekanik özelliklerin ve dentine bağlanma performansının geliştirilebildiği bildirilmiştir. Katekol içeren polimerler de dentin kollajeni ve hidroksiapatitle oluşturdukları reversibl etkileşimler nedeniyle araştırılmaktadır (Fu et al., 2025). Bununla birlikte bu bulgular doğrudan kendini onaran dental kompozit kanıtı olarak değerlendirilmemelidir. UPy ve katekol temelli sistemlerde mevcut dental veriler daha çok bağlanma dayanımı, ara yüz stabilitesi ve nemli ortam performansına ilişkindir; hasar sonrasında mekanik özelliklerin geri kazanıldığını gösteren çalışmalar ise sınırlıdır (Fu et al., 2025; Lee et al., 2015). Bu nedenle supramoleküler sistemler umut verici olmakla birlikte, dental self healing açısından henüz mikrokapsül temelli yaklaşımlar kadar güçlü deneysel desteğe sahip değildir.

Multifonksiyonel Kendini Onaran Dental Kompozitler

Kendini onaran kompozitlerde mikroçatlakların ilerlemesinin sınırlandırılması hedeflenirken, restorasyon

başarısızlığında sekonder çürük, biyofilm ve çevre dokulardaki mineral kaybı gibi biyolojik etkenler de önem taşımaktadır. Bu nedenle self healing özelliğinin antibakteriyel ve remineralizan işlevlerle birleştirildiği multifonksiyonel kompozitler geliştirilmiştir. Bu sistemlerde farklı işlevler ayrı bileşenlerle sağlanmakta; ancak eklenen her bileşenin materyalin diğer özelliklerini olumsuz etkilememesi gerekmektedir. Deneysel çalışmalar bu üç işlevin aynı kompozitte bir araya getirilebildiğini göstermiş olsa da mevcut bulgular belirli formülasyonlarla sınırlıdır ve klinik başarıyı doğrudan göstermemektedir (Wu et al., 2015; Zhang et al., 2024).

Multifonksiyonel yaklaşım daha yakın dönemde hasarı algılayabilen sistemleri de kapsayacak şekilde genişlemiştir. Qiu ve arkadaşlarının 2026 yılında geliştirdiği deneysel dental rezinde, çatlakları floresan sinyalle görünür hale getiren kapsüller ile kendini onaran kapsüller birlikte kullanılmıştır. Böylece hasarın hem belirlenmesi hem de onarılması aynı materyalde hedeflenmiştir. Bu sistemler henüz deneysel aşamada olmakla birlikte, kendini onaran dental materyallerin daha kapsamlı akıllı materyal tasarımlarına doğru geliştiğini göstermektedir (Qiu et al., 2026).

Antibakteriyel ve Kendini Onaran Kompozitler

Kendini onaran kompozitlerde mekanik hasarın kontrol altına alınması hedeflenirken, restorasyon başarısızlığında önemli bir diğer etken olan sekonder çürüğe karşı antibakteriyel özelliklerin de materyale kazandırılması araştırılmıştır (Yao et al., 2023). Bu amaçla geliştirilen deneysel sistemlerden birinde, TEGDMA ve DHEPT içeren kendini onaran mikrokapsüller ile kuaterner amonyum yapısındaki antibakteriyel monomer DMAHDM aynı kompozitte kullanılmıştır. DMAHDM içeren gruplarda biyofilm canlılığı, metabolik aktivite ve laktik asit üretiminin azaldığı; mikrokapsüllerin ise kendini onarma işlevini koruduğu bildirilmiştir.

Belirli kapsül oranlarında materyalin başlangıç mekanik özelliklerinde de anlamlı bir kayıp görülmemiştir (Wu et al., 2015).

Daha sonraki çalışmalarda antibakteriyel bileşenlerin doğrudan mikrokapsül yapısına dahil edilmesi de araştırılmıştır. Kuaterner amonyum bileşikleri taşıyan nanopartiküllerle modifiye edilen kapsüller, onarıcı ajanı depolarken aynı zamanda antibakteriyel özellik gösterecek şekilde tasarlanmıştır (Yao et al., 2022). Bu tür sistemlerin Streptococcus mutans üzerinde antibakteriyel aktivite gösterebildiği ve kendini onarma işlevinin korunabildiği bildirilmiştir (Ahangaran & Navarchian, 2022). Bununla birlikte mevcut bulgular ağırlıklı olarak laboratuvar çalışmalarına dayandığından, antibakteriyel etkinliğin uzun dönem sürekliliği ve biyolojik güvenliği henüz yeterince açıklığa kavuşmamıştır.

Antibakteriyel, Remineralizan ve Kendini Onaran Sistemler

Multifonksiyonel kompozitlerde bir sonraki adım, kendini onarma ve antibakteriyel özelliklere remineralizasyon potansiyelinin eklenmesi olmuştur. Bu amaçla kendini onaran mikrokapsüller ve DMAHDM ile birlikte amorf kalsiyum fosfat nanopartikülleri (NACP) kullanılmıştır. NACP, kalsiyum ve fosfat iyonları sağlayarak demineralize diş dokularının remineralizasyonunu desteklemek amacıyla materyale eklenmiştir. Böylece aynı restoratif materyalde mekanik hasarın onarılması, biyofilm aktivitesinin azaltılması ve mineral kaybına karşı koruyucu bir ortam oluşturulması hedeflenmiştir (Wu et al., 2015; Yue et al., 2018; Zhang et al., 2024).

Wu ve arkadaşlarının deneysel kompozitinde kırılma tokluğunda %65 ile %81 arasında geri kazanım sağlanmış, DMAHDM biyofilm aktivitesini azaltmış ve NACP remineralizasyon amacıyla iyon kaynağı olarak kullanılmıştır (Wu et al., 2015). Benzer yaklaşım daha sonra adeziv rezinlere

uygulanmış; kendini onaran mikrokapsüller, DMAHDM ve NACP içeren deneysel adezivde dentine bağlanma dayanımının korunduğu, kırılma tokluğunda yaklaşık %67 geri kazanım elde edildiği ve biyofilm aktivitesinin azaldığı bildirilmiştir (Yue et al., 2018).Bu sonuçlar farklı işlevlerin aynı rezin esaslı materyalde bir araya getirilebildiğini göstermektedir. Ancak self healing kapasitesi, antibakteriyel etki, iyon salımı ve mekanik özelliklerin birlikte ve uzun süre korunup korunamayacağı henüz klinik olarak doğrulanmış değildir.

Hasarı Algılayan ve Kendini Onaran Akıllı Kompozit Sistemler

Kendini onaran dental kompozitlerde mikroçatlakların yalnızca onarılması değil, erken dönemde belirlenebilmesi de araştırılan konulardan biridir. Qiu ve arkadaşları 2026 yılında bu amaçla iki farklı mikrokapsül içeren deneysel bir dental rezin geliştirmiştir. Kapsüllerden biri çatlak oluştuğunda floresan sinyal oluşturarak hasarlı bölgenin ultraviyole ışık altında görünür hale gelmesini, diğeri ise onarıcı ajanın serbest kalmasıyla çatlağın onarılmasını sağlamıştır. Deneysel değerlendirmede görünür floresan sinyal elde edilmiş ve kendini onaran kapsüllerle yaklaşık %63 düzeyinde onarım etkinliği bildirilmiştir. Kullanılan kapsül oranlarında materyalin temel mekanik özellikleri, termal stabilitesi ve hücre uyumluluğunda anlamlı bir olumsuz değişiklik saptanmamıştır (Qiu et al., 2026).

Hasarı algılama ve onarma işlevlerinin aynı materyalde birleştirilmesi, restorasyon içerisindeki mikroçatlakların hem lokalizasyonuna hem de kontrolüne yönelik yeni bir yaklaşım sunmaktadır. Bununla birlikte mevcut bulgular laboratuvar koşullarıyla sınırlıdır ve floresan sinyalin klinik restorasyonlarda ne ölçüde kullanılabilir olduğu henüz gösterilmemiştir. Bu nedenle söz konusu sistemler, klinik kullanımdan çok gelişmekte olan akıllı

restoratif materyal tasarımlarının erken örnekleri olarak değerlendirilmelidir.

Klinik Uygulamaya Geçişte Mevcut Sorunlar ve Araştırma Gereksinimleri

Kendini onaran dental kompozitlerde laboratuvar ortamında elde edilen sonuçlar, mikroçatlaklar sonrasında mekanik özelliklerin belirli ölçüde geri kazanılabileceğini göstermektedir. Bununla birlikte bir materyalin kontrollü deney koşullarında kendini onarma kapasitesi göstermesi, klinik kullanım için yeterli değildir. Restoratif kompozitlerin ağız ortamında yıllar boyunca tekrarlayan oklüzal yükler, sıcaklık ve pH değişimleri, nem, enzimatik etkiler ve biyofilm varlığı altında işlev görmesi beklenir. Bu nedenle klinik geçiş açısından temel soru yalnızca materyalin bir kez hasar gördükten sonra onarılıp onarılamadığı değil, bu özelliğin uzun süreli kullanım koşullarında mekanik performansa anlamlı bir katkı sağlayıp sağlamadığıdır.

Self healing kompozitlere ilişkin ilk çalışmaların önemli bir bölümü kırılma tokluğunun hasar öncesi ve sonrası karşılaştırılmasına dayanmıştır. Bu yöntem sistemin onarım kapasitesini göstermek için yararlı olmakla birlikte, restorasyonların klinikte karşılaştığı hasar çoğunlukla tek seferlik aşırı yüklenmeden değil, çok sayıda düşük şiddetli yükün birikiminden kaynaklanır. Sonraki çalışmaların yorulma testleri ve çiğneme simülasyonlarına yönelmesi bu nedenle önemlidir. Mikrokapsül içeren deneysel bir kompozitin tekrarlayan yükleme altında kapsül içermeyen materyallere göre daha iyi dayanıklılık gösterebildiği bildirilmiş olsa da aynı çalışmada self healing materyalin başlangıç mekanik dayanımının klinik geçiş açısından halen yetersiz olduğu belirtilmiştir. Gelecekteki araştırmalarda termal, mekanik ve hidrolitik yaşlandırmanın birlikte uygulandığı daha uzun süreli protokollerin kullanılması, materyalin gerçek kullanım

koşullarındaki davranışını değerlendirmek açısından daha anlamlı olacaktır.

Biyolojik güvenlik de yalnızca başlangıç sitotoksisite testleriyle değerlendirilebilecek bir konu değildir. Mikrokapsül temelli sistemlerde kapsül kabuğu, kapsül içerisinde depolanan monomerler, polimerizasyon başlatıcıları ve onarım sonrasında oluşan ürünlerin her biri biyolojik açıdan değerlendirilmelidir. Özellikle poli(üre formaldehit) kapsüllerde serbest formaldehit salınımı uzun süredir tartışılan konulardan biridir. Daha yeni çalışmalar kapsül yüzeyinin modifiye edilmesiyle formaldehit salınımının azaltılabileceğini ve biyolojik yanıtın iyileştirilebileceğini göstermektedir. Bununla birlikte bu sonuçlar hücre kültürü ve kısa süreli deneysel modellerden elde edilmektedir. Uzun süre ağız ortamında kalan kapsüllerin nasıl yaşlandığı, kapsül içeriğinin zaman içerisinde sızıp sızmadığı ve çatlak oluştuğunda açığa çıkan bileşenlerin pulpa ve çevre dokular üzerindeki etkileri daha kapsamlı araştırılmalıdır. Bir diğer sorun, kendini onarma etkinliğinin çalışmalar arasında aynı şekilde değerlendirilmemesidir. Kırılma tokluğundaki geri kazanım en sık kullanılan ölçütlerden biri olsa da kapsül miktarı, oluşturulan çatlağın boyutu, iyileşme süresi, saklama ortamı ve test yöntemi çalışmalar arasında önemli farklılıklar göstermektedir. Morfolojik olarak kapanan bir çatlak ile mekanik özelliğin geri kazanılması da aynı sonucu ifade etmez. Farklı materyallerin güvenilir biçimde karşılaştırılabilmesi için hasar oluşturma yöntemi, onarım süresi, yaşlandırma koşulları ve performans ölçütlerinin daha fazla standardize edilmesi gerekmektedir.

Materyalin üretilebilirliği de klinik uygulama açısından göz ardı edilmemelidir. Laboratuvarda hazırlanan mikrokapsüllerin boyutu ve kapsül duvarı özellikleri üretim koşullarından etkilenebilmekte, kapsüllerin kompozit içerisinde homojen dağılımı ise materyalin hem onarım kapasitesini hem de mekanik davranışını

değiştirebilmektedir. Klinik bir ürün açısından bu özelliklerin yalnızca tek bir deney serisinde değil, farklı üretim partilerinde tekrarlanabilir olması gerekir. Ayrıca kendini onarma işlevi eklenirken kompozitin polimerizasyonu, viskozitesi, uygulanabilirliği, yüzey özellikleri ve estetik gereksinimleri gibi geleneksel restoratif materyallerden beklenen özelliklerin de korunması gerekir. Yüksek bir onarım etkinliği, bu temel özelliklerde belirgin kayıplar meydana geliyorsa tek başına klinik üstünlük sağlamaz.

Mevcut kanıtlar bu materyallerin potansiyelini ortaya koymakla birlikte, klinik etkinlik henüz laboratuvar bulgularının düzeyinde doğrulanmış değildir. Araştırmaların büyük bölümü deneysel kompozitler üzerinde yürütülmekte ve yeni çalışmalar halen kapsül yapısını, onarıcı ajanları, biyouyumluluğu ve test yöntemlerini geliştirmeye odaklanmaktadır. Bu nedenle araştırmaların bir sonraki aşamasında yalnızca daha yüksek onarım yüzdelerine ulaşmak yerine, yeterli başlangıç mekanik özelliklerine sahip, uzun dönem yaşlanmaya dirençli, biyolojik olarak güvenli ve üretimi tekrarlanabilir sistemlerin geliştirilmesine öncelik verilmesi gerekir. Bu koşullar sağlandıktan sonra kontrollü klinik çalışmalar, kendini onarma özelliğinin restorasyon ömrü üzerinde gerçekten anlamlı bir avantaj sağlayıp sağlamadığını ortaya koyabilir.

Sonuç

Kendini onaran dental kompozitler, restoratif materyallerde gelişen mikrohasara materyalin kendi yapısı içinde yanıt verebilmesini amaçlayan yenilikçi bir araştırma alanıdır. Mevcut çalışmalar, özellikle mikrokapsül temelli ekstrinsik sistemlerde, hasar sonrasında kırılma tokluğu gibi mekanik özelliklerin belirli ölçüde geri kazanılabileceğini göstermiştir. TEGDMA ve DHEPT temelli sistemler dental rezin kimyasıyla daha uyumlu bir yaklaşım sunarken, intrinsik sistemler ayrı bir onarıcı ajan gerektirmeden

polimer ağının reversibl özelliklerinden yararlanmayı hedeflemektedir. Antibakteriyel, remineralizan ve hasarı algılayan işlevlerin self healing mekanizmalarıyla birleştirilmesi ise bu alandaki materyal tasarımının giderek daha multifonksiyonel bir yapıya yöneldiğini göstermektedir.

Bununla birlikte mevcut kanıtların büyük bölümü laboratuvar çalışmalarına dayanmaktadır. Onarım kapasitesinin uzun dönem ağız koşullarında korunması, materyalin başlangıç mekanik özelliklerinden ödün verilmemesi, biyolojik güvenliğin sağlanması ve üretim süreçlerinin standardize edilmesi klinik uygulamaya geçiş açısından çözülmesi gereken başlıca sorunlardır. Bu nedenle kendini onaran dental kompozitler günümüzde klinik olarak doğrulanmış restoratif materyallerden çok, restorasyonların hasara karşı daha dirençli ve işlevsel hale getirilmesine yönelik gelişmekte olan bir materyal stratejisi olarak değerlendirilmelidir.

Kaynakça

Ahangaran, F., & Navarchian, A. H. (2022). Towards the development of self-healing and antibacterial dental nanocomposites via incorporation of novel acrylic microcapsules. Dental Materials, 38(5), 858–873. https://doi.org/10.1016/j.dental.2022.04.004

Althaqafi, K. A., Satterthwaite, J., AlShabib, A., & Silikas, N. (2024). Synthesis and characterisation of microcapsules for self-healing dental resin composites. BMC Oral Health, 24(1), 109. https://doi.org/10.1186/s12903-023-03764-8

Althaqafi, K. A., Satterthwaite, J., & Silikas, N. (2020). A review and current state of autonomic self-healing microcapsules-based dental resin composites. Dental Materials, 36(3), 329–342. https://doi.org/10.1016/j.dental.2019.12.005

Blaiszik, B. J., Kramer, S. L. B., Olugebefola, S. C., Moore, J. S., Sottos, N. R., & White, S. R. (2010). Self-healing polymers and composites. Annual Review of Materials Research, 40, 179–211. https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-070909-104532 Annual Reviews

Bompolaki, D., Lubisich, E. B., & Fugolin, A. P. (2022). Resin-based composites for direct and indirect restorations: Clinical applications, recent advances, and future trends. Dental Clinics of North America, 66(4), 517–536. https://doi.org/10.1016/j.cden.2022.05.003 PubMed

Fernández, E., Chaple Gil, A., Caviedes, R., Díaz, L., & Bersezio, C. (2026). Clinical longevity of direct dental restorations: An umbrella review of systematic reviews. Journal of Esthetic and Restorative Dentistry, 38(2), 307–324. https://doi.org/10.1111/jerd.70052 PubMed

Fu, D., Hardy, J., & Szczepanski, C. R. (2025). Improvement of dentin bonding via adhesive monomers with multiple hydrogen

bonding moieties. Acta Biomaterialia, 205, 705–722. https://doi.org/10.1016/j.actbio.2025.08.052

Fugolin, A. P., & Pfeifer, C. S. (2022). Strategies to design extrinsic stimuli-responsive dental polymers capable of autorepairing. JADA Foundational Science, 1, 100013. https://doi.org/10.1016/j.jfscie.2022.100013

Fugolin, A. P. P., & Pfeifer, C. S. (2017). New resins for dental composites. Journal of Dental Research, 96(10), 1085–1091. https://doi.org/10.1177/0022034517720658

Huyang, G., Debertin, A. E., & Sun, J. (2016). Design and development of self-healing dental composites. Materials & Design, 94, 295–302. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.01.046

Huynh, B. Q., Rajasekaran, S., Batista, J., Lewis, S., Sinhoreti, M. A. C., Pfeifer, C. S., & Fugolin, A. P. (2024). Improving self-healing dental-restorative materials with functionalized and reinforced microcapsules. Polymers, 16(17), 2410. https://doi.org/10.3390/polym16172410

Khan, A. A. (2025). Self-healing dental biomaterials: Bioinspired pathways to sustainable dentistry. Biomaterial Investigations in Dentistry, 12(1), 288–299. https://doi.org/10.2340/biid.v12.45229

Lee, S. B., González-Cabezas, C., Kim, K. M., Kim, K. N., & Kuroda, K. (2015). Catechol-functionalized synthetic polymer as a dental adhesive to contaminated dentin surface for a composite restoration. Biomacromolecules, 16(8), 2265–2275. https://doi.org/10.1021/acs.biomac.5b00451

Li, B., Cao, P.-F., Saito, T., & Sokolov, A. P. (2023). Intrinsically self-healing polymers: From mechanistic insight to current challenges. Chemical Reviews, 123(2), 701–735. https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.2c00575

Lohbauer, U., Belli, R., & Ferracane, J. L. (2013). Factors involved in mechanical fatigue degradation of dental resin composites. Journal of Dental Research, 92(7), 584–591. https://doi.org/10.1177/0022034513490734

McDonald, S. A., Coban, S. B., Sottos, N. R., & Withers, P. J. (2019). Tracking capsule activation and crack healing in a microcapsule-based self-healing polymer. Scientific Reports, 9(1), 17773. https://doi.org/10.1038/s41598-019-54242-7

Ning, K., Loomans, B., Yeung, C., Li, J., Yang, F., & Leeuwenburgh, S. (2021). Influence of microcapsule parameters and initiator concentration on the self-healing capacity of resin-based dental composites. Dental Materials, 37(3), 403–412. https://doi.org/10.1016/j.dental.2020.11.025

Ning, K., Yang, F., Bronkhorst, E., Ruben, J., Nogueira, L., Haugen, H., Loomans, B., & Leeuwenburgh, S. (2023). Fatigue behaviour of a self-healing dental composite. Dental Materials, 39(10), 913–921. https://doi.org/10.1016/j.dental.2023.08.172

Patrick, J. F., Robb, M. J., Sottos, N. R., Moore, J. S., & White, S. R. (2016). Polymers with autonomous life-cycle control. Nature, 540(7633), 363–370. https://doi.org/10.1038/nature21002

Qiu, X., Liu, X., Qi, Y., Zhang, Y., Zhou, C., & Wu, J. (2026). Novel dual-capsule dental resin for crack-sensing, self-healing and self-warning. Dental Materials, 42(8), 1335–1345. https://doi.org/10.1016/j.dental.2026.03.153

Rozza, B. Y., El-Refai, D. A., Essawy, H. A., & Alian, G. A. (2024). Effect of silanization of poly (urea-formaldehyde) microcapsules on the flexural strength and self-healing efficiency of an experimental self-healing dental resin composite (an in-vitro study). Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 151, 106372. https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2024.106372

Singer, L., Fouda, A., & Bourauel, C. (2023). Biomimetic approaches and materials in restorative and regenerative dentistry: Review article. BMC Oral Health, 23(1), 105. https://doi.org/10.1186/s12903-023-02808-3

Sowan, N., Dobson, A., Podgorski, M., & Bowman, C. N. (2020). Dynamic covalent chemistry (DCC) in dental restorative materials: Implementation of a DCC-based adaptive interface (AI) at the resin–filler interface for improved performance. Dental Materials, 36(1), 53–59. https://doi.org/10.1016/j.dental.2019.11.021

Tăut, M. A., Moldovan, M., Filip, M., Petean, I., Saroşi, C., Cuc, S., Taut, A. C., Ardelean, I., Lazăr, V., & Man, S. C. (2024). Synthesis and characterization of microcapsules as fillers for self-healing dental composites. Nanomaterials, 14(22), 1853. https://doi.org/10.3390/nano14221853

Taut, M. A., Moldovan, M., Sarosi, C., Paltinean, G. A., Petean, I., Filip, M. R., Silaghi-Dumitrescu, L., Ilie, N., & Ardelean, I. (2026). Microencapsulated hydroxyapatite–TEGDMA systems for self-healing in dental applications. Molecules, 31(5), 873. https://doi.org/10.3390/molecules31050873

Then, S., Neon, G. S., & Abu Kasim, N. H. (2011). Performance of melamine modified urea–formaldehyde microcapsules in a dental host material. Journal of Applied Polymer Science, 122(4), 2557–2562. https://doi.org/10.1002/app.34361

Toohey, K. S., Sottos, N. R., Lewis, J. A., Moore, J. S., & White, S. R. (2007). Self-healing materials with microvascular networks. Nature Materials, 6(8), 581–585. https://doi.org/10.1038/nmat1934

Wang, S., & Urban, M. W. (2020). Self-healing polymers. Nature Reviews Materials, 5(8), 562–583. https://doi.org/10.1038/s41578-020-0202-4

Wang, X., & Ding, T. (2024). A review on the current state of microcapsule-based self-healing dental composites. Journal of Functional Biomaterials, 15(6), 165. https://doi.org/10.3390/jfb15060165

Wertzberger, B. E., Steere, J. T., Pfeifer, R. M., Nensel, M. A., Latta, M. A., & Gross, S. M. (2010). Physical characterization of a self-healing dental restorative material. Journal of Applied Polymer Science, 118(1), 428–434. https://doi.org/10.1002/app.31542

White, S. R., Sottos, N. R., Geubelle, P. H., Moore, J. S., Kessler, M. R., Sriram, S. R., Brown, E. N., & Viswanathan, S. (2001). Autonomic healing of polymer composites. Nature, 409(6822), 794–797. https://doi.org/10.1038/35057232

Wu, J., Weir, M. D., Melo, M. A. S., & Xu, H. H. K. (2015). Development of novel self-healing and antibacterial dental composite containing calcium phosphate nanoparticles. Journal of Dentistry, 43(3), 317–326. https://doi.org/10.1016/j.jdent.2015.01.009

Wu, J., Weir, M. D., Melo, M. A. S., Strassler, H. E., & Xu, H. H. K. (2016). Effects of water-aging on self-healing dental composite containing microcapsules. Journal of Dentistry, 47, 86–93. https://doi.org/10.1016/j.jdent.2016.01.008

Wu, J., Weir, M. D., Zhang, Q., Zhou, C., Melo, M. A. S., & Xu, H. H. K. (2016). Novel self-healing dental resin with microcapsules of polymerizable triethylene glycol dimethacrylate and N,N-dihydroxyethyl-p-toluidine. Dental Materials, 32(2), 294–304. https://doi.org/10.1016/j.dental.2015.11.014

Yahyazadehfar, M., Huyang, G., Wang, X., Fan, Y., Arola, D., & Sun, J. (2018). Durability of self-healing dental composites: A comparison of performance under monotonic and cyclic loading. Materials Science and Engineering: C, 93, 1020–1026. https://doi.org/10.1016/j.msec.2018.08.057

Yao, S., Qin, L., Ma, L., Zhang, X., Jiang, H., Zhang, J., Zhou, C., & Wu, J. (2023). Novel antimicrobial and self-healing dental resin to combat secondary caries and restoration fracture. Dental Materials, 39(11), 1040–1050. https://doi.org/10.1016/j.dental.2023.09.009

Yao, S., Qin, L., Wang, Z., Zhu, L., Zhou, C., & Wu, J. (2022). Novel nanoparticle-modified multifunctional microcapsules with self-healing and antibacterial activities for dental applications. Dental Materials, 38(8), 1301–1315. https://doi.org/10.1016/j.dental.2022.06.012

Yue, S., Wu, J., Zhang, Q., Zhang, K., Weir, M. D., Imazato, S., Bai, Y., & Xu, H. H. K. (2018). Novel dental adhesive resin with crack self-healing, antimicrobial and remineralization properties. Journal of Dentistry, 75, 48–57. https://doi.org/10.1016/j.jdent.2018.05.009

Zhang, J., Yang, Y., Chen, Y., Chen, X., Li, A., Wang, J., Shen, D., & Zheng, S. (2024). A review of new generation of dental restorative resin composites with antibacterial, remineralizing and self-healing capabilities. Discover Nano, 19(1), 189. https://doi.org/10.1186/s11671-024-04151-0

BÖLÜM 8

KENDİ KENDİNİ İYİLEŞTİREN DENTAL KOMPOZİTLER

Zeynep Su SÖNMEZ[1]

Nurcan ÖZAKAR[2]

Giriş

Dental kompozitlerin geliştirilmesinden bu yana, bu malzemeler estetik özellikleri ve restorasyon sırasında sağlıklı diş dokusunun daha az kaybı sayesinde restoratif malzeme olarak popülerlik kazanmıştır(Ferracane, 2011). Günümüzde, rezin kompozit, ön ve arka dişlerin restorasyonunda ilk tercih edilen malzemedir(Baldissera et al., 2013; Correa et al., 2012; Demarco et al., 2013). Rezin kompozit restorasyonlar arka ve ön dişlerde tatmin edici performans göstermesine rağmen, klinik çalışmalar bu tür restorasyonların başarısız olmasının başlıca nedeninin kırıklar olduğunu göstermektedir(Da Rosa Rodolpho et al., 2011). Yüzeyde

[1] Arş. Gör. Dt., Atatürk Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi, Restoratif Diş Tedavisi AD, ORCID: 0009-0001-7880-2295

[2] Prof. Dr., Atatürk Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi, Restoratif Diş Tedavisi AD, ORCID: 0000-0003-4023-6723

biriken biyofilm tabakasının yanı sıra, maruz kalınan çiğneme kuvvetleri de restorasyon kalitesini olumsuz etkileyerek kenar uyumsuzluklarına ve yapısal kusurlara yol açabilir(Ferracane, 2013). Materyalde meydana gelen bu bozulmalar, restorasyonun başarısızlığıyla ve nihayetinde yenilenmesi gerekliliğiyle sonuçlanır(Melgar et al., 2017). Ancak bu tekrarlayan restorasyon döngüsü, her diş hazırlığı sürecinde sağlıklı dokunun kaçınılmaz kaybına neden olarak diş yapısının giderek zayıflamasına yol açar(Blum et al., 2011).

Kompozitlerin kırılma direncini artırmak amacıyla pek çok geliştirme çalışması yürütülmüştür(Feilzer et al., 1993; Ferracane, 1995; Ruddell et al., 2002; Venhoven et al., 1996; H. Zhang & Darvell, 2012). Bu çalışmalar; inorganik dolgu oranlarının optimize edilmesini, dolgu boyutlarının nanometre seviyesine indirgenmesini ve yapıya fiber veya nanotüp gibi farklı formdaki takviye bileşenlerinin eklenmesini kapsamaktadır. Ayrıca, polimer matris yapısının geliştirilmesi ve polimerizasyon reaksiyonlarının en üst düzeye çıkarılması da bu süreçteki temel stratejiler arasında yer almıştır(Ferracane,2011).

Uygulanan bu stratejiler, mekanik performansı artırılmış ve kullanım ömrü uzatılmış kompozitlerin elde edilmesini sağlamıştır. Ancak, tüm bu gelişmelere rağmen kompozit rezinler hâlâ kırılgan bir yapı sergilemekte ve özellikle yüksek çiğneme kuvvetine maruz kalan bölgelerdeki geniş restorasyonlarda kırılmaya eğilim göstermektedir(Ferracane,2011).

Bu nedenle, rezin bazlı diş restorasyonlarında çatlak ilerlemesini durdurmak ve buna bağlı kırılma hatalarının önüne geçmek için daha dirençli sistemlerin geliştirilmesine duyulan ihtiyaç güncelliğini korumaktadır. Kendi kendini iyileştiren dental

kompozit araştırmaları da bu sorunları çözmeye yönelik olarak ortaya çıkmış, güncelliği ve geliştirilebilirliği sayesinde çeşitli çalışmalara konu olmuştur(Jandt & Sigusch, 2009).

Gelişim Süreçleri

Doğadan ilham alan araştırmacılar; materyallere iç veya dış hasarları onarabilme, işlevlerini geri kazanma ve kullanım ömürlerini uzatma yeteneği kazandıran kendi kendini iyileştirme mekanizmaları entegre etmişlerdir(Li & Zuo, 2020; Rekondo et al., 2014; Rodriguez et al., 2011; Utrera-Barrios et al., 2023; S. Wang & Urban, 2020). Literatürde "kendi kendini iyileştiren materyaller" olarak tanımlanan bu yapılar, sundukları stratejik avantajlar sayesinde yeni nesil ileri teknoloji malzemeleri olarak görülmekte ve pek çok farklı disiplinde yaygın olarak uygulanmaktadır(Chan et al., 2016; Yang & Urban, 2013; W. Zhang et al., 2020).

Son yıllarda bu alan, modern bilim, malzeme mühendisliği ve endüstriyel hammadde araştırmalarının odak noktası haline gelmiştir. Kendini iyileştiren polimerler; üretim süreçlerine dahil edildikleri ürünlere yüksek dayanıklılık, mekanik stabilite ve güvenilirlik kazandırmalarının yanı sıra, düşük çevresel etkileriyle sürdürülebilir bir profil sergilemektedir(Chan et al., 2016; Urdl et al., 2017; Willocq et al., 2020; Yang & Urban, 2013; W. Zhang et al., 2020).

Kendi kendini iyileştirme özelliğine sahip malzemeler, hasarın ilerlemesini potansiyel olarak birden fazla kez durdurabilir. Bu, malzemenin ve dolayısıyla kullanıldığı cihazın ömrünü ve güvenilirliğini büyük ölçüde artırır. Bu gelişmiş performans seviyeleri, özellikle tıp, inşaat, havacılık, otomotiv ve enerji mühendisliği sektörleri gibi insan erişiminin sınırlı veya hiç

olmadığı alanlarda kullanılan malzemeler için önemlidir(Ahangaran & Navarchian, 2022).

Bu teknoloji malzeme güvenilirliğini büyük ölçüde artıracak ve bileşen tasarımı ve üretiminde devrim yaratacaktır. Ek olarak, kritik bileşenlerin ömrünün uzatılması, ekonomik verimliliği önemli ölçüde artıracaktır. Örneğin, stentlerin ömrünün uzatılması, tedavi maliyetlerini düşürebilir. Diğer potansiyel uygulamalar arasında alternatif enerji üretimi (rüzgar enerjisi, güneş enerjisiyle ısıtma), yeni aydınlatma teknolojileri (örneğin, LED'ler) ve tıbbi implantlar gibi alanlar yer almaktadır(Ahangaran & Navarchian, 2022).

Genel olarak, kendi kendini iyileştiren malzemelerin mekanizmaları dışsal iyileşme ve içsel iyileşme şeklinde iki kategoriye ayrılır.Dışsal iyileşme, mikrokapsüller, mikrodamar ağları ve nanopartikülleri içerir. Buna karşılık, içsel iyileşme, Diels–Alder reaksiyonu, disülfid ve dinamik kovalent olmayan bağları, hidrojen bağları, iyonik etkileşimler ve koordinasyonu içeren dinamik kovalent bağ türlerine ayrılır(Jiang et al., 2023).

Mikrokapsülleme, 'katı, sıvı veya gaz halindeki maddelerin, belirli koşulların etkisi altında içeriklerini kontrollü oranlarda salabilen mini, kapalı kapsüller içinde paketlenmesi teknolojisi' olarak tanımlanır(Anal & Singh, 2007).

Kendinden onarılan hidrojeller ve yumuşak malzeme sistemleri üzerine literatürde kapsamlı makaleler ve incelemeler mevcut olsa da, kemik simanları ve dental rezinler gibi sert malzemeler için geliştirilen otonom onarım sistemlerine yönelik çalışmalar daha kısıtlıdır(Menikheim & Lavik, 2020). Bu materyaller genellikle yeniliklere kapalı, "olgunlaşmış teknolojiler" olarak değerlendirilse de yapısal başarısızlıklarının (kırılma,

gevşeme vb.) klinik sonuçları oldukça ciddidir. Eğer bu alanlarda güvenli ve sürdürülebilir yenilik yolları keşfedilebilirse, restoratif tedavilerin başarısında devrim niteliğinde bir klinik etki yaratılacaktır(Menikheim & Lavik, 2020).

Kendi kendini iyileştirme yaklaşımı, dental kompozitlere otonom çatlak onarım yeteneği kazandıran yenilikçi bir çözümdür. İyileştirici ajanın polimerik bir kabuk içinde kapsüllenmesi, bu tür akıllı dental kompozitlerin geliştirilmesinde öncü bir yöntem olarak öne çıkmaktadır(D. Y. Wu et al., 2008).

2010 yılında Wertzberger ve ark., PUF-DCPD(Poliüreformaldehit-disiklopentadien), mikrokapsülleri ile Grubbs katalizörünü, yüksek oranda inorganik dolgu (%55 ağırlıkça) içeren bir dental kompozit rezine entegre ederek White'ın kendi kendini onarma modelini(White et al., 2001) diş hekimliği alanında ilk kez uygulamışlardır. Bu çalışma sonucunda, materyalde %57 oranında kendi kendini iyileştirme verimliliği elde edilmiştir(Wertzberger et al., 2010). Elde edilen sonuçlar; dental kompozitlerin yüksek dolgu oranına rağmen, sisteme entegre edilen monomerler ve katalizörlerin gerçekleştirdiği çapraz bağlanma ve polimerizasyon reaksiyonları sayesinde mekanik özelliklerin geri kazanılabileceğini kanıtlamıştır(Then et al. 2011). Bu çalışmanın devamında, Then ve ark. tarafından yürütülen incelemede; kapsül kabuk yapısına melamin ilave edilmiştir. Bu modifikasyon ile matris ve kapsül arasında çok daha güçlü bir mekanik tutunma sağlanması hedeflenmiştir(Then et al., 2011).

DCPD düşük maliyeti ve kolay kapsüllenebilmesi gibi avantajlara sahip olsa da, kullanımında ciddi biyogüvenlik sorunları tespit edilmiştir(Bevan et al., 1992). Bununla birlikte, bu sistemi aktive eden Grubbs katalizörlerinin yüksek maliyeti ve toksik

özellikleri(Caruso et al., 2007), DCPD–Grubbs sistemlerinin diş hekimliği alanındaki klinik uygulamalarını kısıtlamıştır(Wang and Ding 2024). Bu kısıtlamalar sonucunda araştırmacılar, dental klinik uygulamalara daha uygun, biyouyumlu ve etkin mikrokapsül tabanlı kendi kendini iyileştirme sistemleri üzerine çalışmalarını yoğunlaştırmışlardır(Wang and Ding 2024).

Ouyang ve ark., miniemülsiyon polimerizasyonu yöntemini kullanarak PU-TEGDMA(trietilen glikol dimetakrilat) nanokapsüllerini sentezlemiş ve bu nanokapsülleri ticari dental rezin adezivlere entegre etmişlerdir(Ouyang et al., 2011).

İçerikleri ve İyileştirme Mekanizmaları

Bu malzemeler; kırılma bölgesini içsel (çatlama esnasında serbest kalan kapsüllenmiş iyileştirici maddelerin yapıya entegre edilmesi) veya dışsal (ısı ya da ışık gibi dış enerji kaynaklarının uygulanması) bir yaklaşımla iyileştirerek çatlakların ilerlemesini durduracak şekilde tasarlanabilmektedir(Fugolin and Pfeifer 2022a, 2022b).

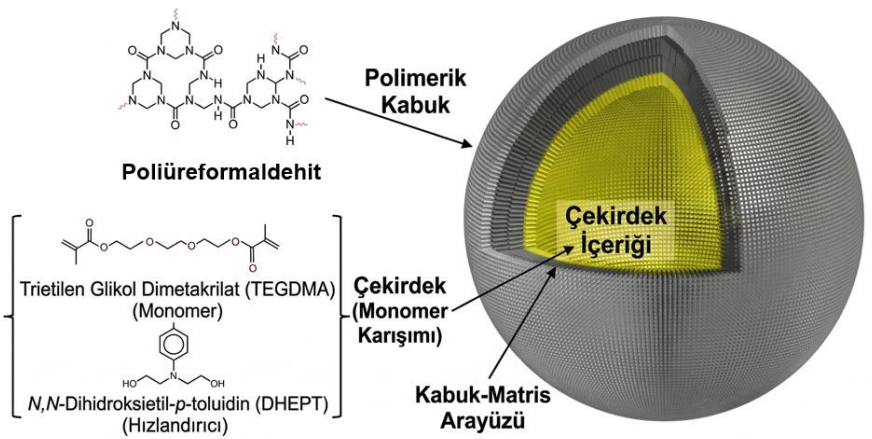
Bu tür malzemeler, ilerleyen bir çatlağın oluşturduğu gerilme alanına yanıt vererek çatlağı onarıp kapatma yeteneğine sahip olacak ve böylece yapıyı daha fazla çatlamaya karşı daha dirençli hale getirecektir. Günümüzde diş hekimliğinde henüz böyle bir ürün bulunmamakla birlikte, aktif bir araştırma alanıdır(J. Wu et al., 2015; Yao et al., 2023).

Literatürdeki çalışmalarda, kendi kendini iyileştiren dental kompozitlerinin geliştirilmesinde çekirdek materyali olarak TEGDMA(trietilen glikol dimetakrilat), BisGMA(Bisfenol A-glisidil metakrilat) ve DMAM(N,N-Dimetilakrilamid) gibi çeşitli

monomerler kapsüllenmektedir(Rajasekaran et al. 2024; Wu et al. 2016).

Tersiyer amin bazlı bir hızlandırıcı olan N,N-dihidroksietil-p-toluidin (DHEPT) içeren PUF mikrokapsüllerinin iyileştirici ajan olarak kullanıldığını bildirilmektedir(J. Wu et al., 2015; J. Wu, Weir, Melo, et al., 2016; J. Wu, Weir, Zhang, et al., 2016). Şekil 1'de çalışmalarda elde edilen bir mikrokapsül içerik örneği görülmektedir(Görsel aslına uygun olarak düzenlenmiştir)(Althaqafi et al., 2024).

Şekil 1: Mikrokapsül içerik örneği



(Althaqafi et al., 2024)

Ayrıca, benzoil peroksit (BPO) katalizörü rezin matrisinin vazgeçilmez bir parçasıdır, bir başlatıcı olarak işlev görür ve mikro kapsüllerde yer alan iyileştirici ajanların kimyasal polimerizasyonunu kolaylaştırır(J. Wu et al., 2015; J. Wu, Weir, Melo, et al., 2016; J. Wu, Weir, Zhang, et al., 2016). Benzoil peroksit (BPO) ile temas eden tersiyer amin içerikli iyileştirici ajan,

polimerizasyon reaksiyonunu başlatarak mikro çatlakları etkili bir şekilde kapatır(J. Wu, Weir, Melo, et al., 2016).

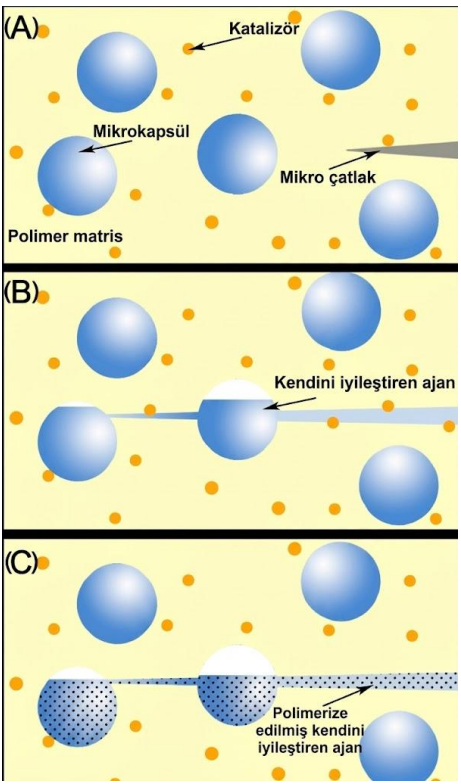
Yayımlanmış çalışmalarda farklı içerikli mikrokapsüller de gösterilmiştir; Örnek olarak BisGMA-TEGDMA (1:1), %1 oranında fenil bis(2,4,6-trimetilbenzoil) fosfin oksit (BAPO) fotobaşlatıcı, %0,5 BPO kimyasal katalizör ile PUF mikrokapsüller oluşturulmuştur(J. Wu, Weir, Zhang, et al., 2016). Kompozit üzerinde oluşan stres mikro çatlaklara yol açtığında, matris içerisinde yer alan mikrokapsüller bu çatlaklar tarafından kırılır. Kapsülün parçalanmasıyla serbest kalan sıvı iyileştirici ajan, kapiller kuvvetin etkisiyle çatlak yüzeylerine ve hasarlı bölgeye nüfuz eder. İyileştirici ajanın matris içindeki katalizörle temas etmesiyle tetiklenen polimerizasyon süreci, çatlağın doldurulmasını sağlayarak ilerlemesini durdurur ve kendi kendine iyileşme mekanizmasını tamamlar(J. Wu, Weir, Zhang, et al., 2016). Şekil 2'de bu kendi kendini iyileştirme süreci görselleştirilmiştir(Görsel aslına uygun olarak düzenlenmiştir)(Wang and Ding 2024).

Bu yaklaşım umut verici sonuçlar sunsa da, yöntemin yaygınlaşmasını kısıtlayan iki temel sınırlama bulunmaktadır: Birincisi, kompozit formülasyonlarına eklenebilecek mikrokapsül oranının limitli olması; ikincisi ise çatlakların henüz kırılma safhasına gelmeden yayılmasına yol açabilecek kabuk bütünlüğü sorunlarıdır(J. Wu, Weir, Melo, et al., 2016).

Mikrokapsüllerin yüksek oranlarda formülasyona dahil edilememesinin temel nedeni, bu yapıların organik matris ile kimyasal bağ kuramamasıdır. Bu durum, mikrokapsüllerin malzeme içinde birer boşluk veya yapısal kusur gibi davranmasına yol açarak, yüksek konsantrasyonlarda mekanik özelliklerin zayıflamasına sebebiyet vermektedir(X. Wang & Ding, 2024). Ayrıca, kapsüllerin

kırılmadan kalması esasen hareketliliklerinden kaynaklanmaktadır; bu serbestlik, mikro çatlakların kapsülü parçalamak yerine daha düşük direnç gösteren 'kabuk-matris' ara yüzü boyunca ilerleyerek kapsülden uzaklaşmasına neden olmaktadır(Dou et al., 2022).

Şekil 2: Kendi kendini iyileştirme süreci



(Wang and Ding 2024)

Fiziksel Özellikler

Kendi kendini iyileştirme özelliği gösteren kompozitler kırılma tokluğu, elastik modül, eğilme mukavemeti, antibakteriyel

aktivite gibi özellikleri açısından çeşitli çalışmalara konu olmuştur. Farklı içeriklerdeki birçok kompozit çalışmalara dahil edilmiştir.

TEGDMA-DHEPT mikrokapsülleri, rezin kompozitlerin başlangıç kırılma tokluğunu (KIC) önemli ölçüde artırmaktadır. Bir çalışmada mikrokapsül içermeyen kontrol numuneleriyle kıyaslandığında, %15 mikrokapsül ilavesiyle %40 daha yüksek bir KIC değeri elde edilmiştir(J. Wu, Weir, Zhang, et al., 2016). Bununla birlikte, iyileşme sonrası kırılma tokluğu değerleri incelendiğinde; %0 mikrokapsül içeren numunelerde hiçbir onarım gözlenmezken, %10–15 mikrokapsül içeren kompozitlerde maksimum iyileşme performansına ulaşılmış ve anlamlı bir artış kaydedilmiştir. Kendi kendini iyileşme performansı bağlamında, %10–15 mikrokapsül içeren kompozitler, orijinal KIC değerlerinin %64 ila %68'ini geri kazanmayı başarmıştır(J. Wu, Weir, Zhang, et al., 2016).

Farklı monomerler ve polimerizasyon hızlandırıcılar içeren iyileştirici kapsüllerin, deneysel bir fotopolimerize edilebilir rezin bazlı kompozitin kendi kendini iyileştirme verimliliği üzerindeki etkisini değerlendiren çalışmada; mikrokapsülsüz(kontrol grubu) ve farklı monomer ve polimerizasyon hızlandırıcılara sahip mikrokapsüller eklenen kompozit örnekleri karşılaştırılmıştır(Moreira et al., 2022). Kontrol materyaliyle karşılaştırıldığında, iyileştirici kapsüllerin eklenmesi dönüşüm derecesi (DC), eğilme dayanımı (σf), elastik modül(Ef) değerlerini etkilememiştir. Kırılma tokluğu, deney grupları arasında istatistiksel olarak benzer bulunmuştur. Kendi kendini iyileştirme verimliliği TEGDMA ve DHEPT katalizör içeren gruplar için daha yüksektir. Yüzey pürüzlülüğü tüm gruplar arasında istatistiksel olarak benzer çıkmıştır(Moreira et al., 2022).

Yapılan bir çalışmada kullanılan kendi kendini iyileştirme, antibakteriyel etki ve remineralizasyon potansiyeline sahip bir kompozite farklı konsantrasyonlarda (ağırlıkça %0, 2.5, 5, 7.5 ve 10) mikrokapsüller ilave edilmiştir. Ağırlıkça %7,5 oranına kadar mikrokapsül içeren kompozitlerin eğilme mukavemeti (85–100 MPa) ve elastik modül (5,5–6 GPa) değerlerinde, kontrol grubuna kıyasla istatistiksel olarak anlamlı bir değişim gözlenmemiştir(J. Wu et al., 2015).

Ancak, mikrokapsül oranı ağırlıkça %10 seviyesine ulaştığında, eğilme mukavemeti 60 MPa'ya, elastik modül ise 4 GPa'ya gerileyerek diğer gruplara göre anlamlı bir düşüş sergilemiştir. Öte yandan, onarım performansı değerlendirildiğinde; %10 ağırlığa kadar mikrokapsül içeren kompozitler arasında anlamlı bir fark saptanmamış ve başlangıç KIC değerlerinin %65 ile %81'i oranında bir geri kazanım elde edilmiştir(J. Wu et al., 2015).

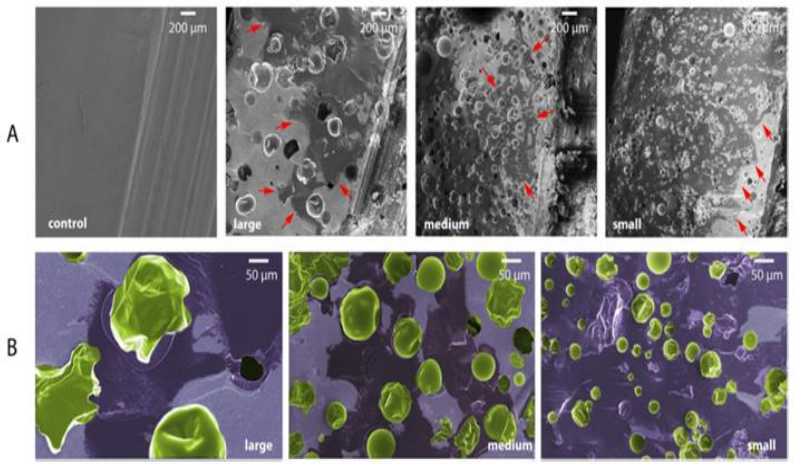
Bu materyallerin onarım kapasitesi ile mikrokapsül ve rezin parametreleri arasındaki ilişki henüz tam olarak aydınlatılamamıştır. Yapılan bir çalışmada; ticari akışkan kompozitlerin kendi kendini iyileştirme performansı üzerinde, rezindeki başlatıcı konsantrasyonu ile mikrokapsül boyutu ve miktarının etkilerini sistematik olarak incelemeyi amaçlanmaktadır(Ning et al., 2021).

Çalışma kapsamında, akrilik onarım sıvısı içeren poliüre-formaldehit (PUF) mikrokapsüller; küçük (33 ± 8 μm), orta (68 ± 21 μm) ve büyük (198 ± 43 μm) boyutlarda sentezlenerek karakterize edilmiştir. Hazırlanan bu mikrokapsüller, farklı oranlarda (ağırlıkça %5–15) ve farklı benzoil peroksit (BPO) başlatıcı konsantrasyonlarında (ağırlıkça %0,5–2,0), akışkan rezin kompozite entegre edilmiştir(Ning et al., 2021).

Şekil 3A'da farklı büyüklükteki mikrokapsüllerin SEM görüntüleri mevcuttur. Şekil 3B'de ise daha anlaşılabilir olması için SEM görüntüleri renklendirilmiştir. Mikrokapsüller yeşil renk ile, kompozit matris mor renk ile temsil edilmiştir. Koyu mor renkle gösterilen bölgeler iyileştirici ajanın polimerize olduğu bölgeleri temsil etmektedir(Ning et al., 2021).

Şekil 3A: Farklı büyüklükteki mikrokapsüllerin SEM görüntüleri

Şekil 3B: Renklendirilmiş SEM görüntüler



(Ning et al., 2021)

Test örneklerinin kırılma tokluğu ölçülmüştür. Tam kırılmanın gerçekleşmesinin ardından iki kırık parça iyileşmenin sağlanması amacıyla 72 saat boyunca bir arada tutulmuştur. Bu sürenin sonunda, kendi kendini iyileştiren rezin bazlı kompozitlerin nihai kırılma tokluğu yeniden test edilerek değerlendirilmiştir(Ning et al., 2021). Kırılma tokluğu, mikrokapsül boyutu ve konsantrasyonundaki artışla birlikte istatistiksel olarak anlamlı bir yükseliş göstermiştir. Bu kapsamda en yüksek iyileşme verimi

(%76'ya kadar),büyük (198 ± 43 μm) boyuttaki mikro kapsüllerin kullanımıyla elde edilmiştir. Çalışmanın bulguları, ticari rezin bazlı kompozitlerin, büyük mikro kapsüller (198 ± 43 μm) entegre edilerek en yüksek onarım verimliliğine ulaştırılabileceğini göstermektedir. Bununla birlikte, bu materyallerin klinik etkinliğini doğrulamak adına yorgunluk direnci ve aşınma davranışları üzerine uzun vadeli testlerin yapılması gerekmektedir(Ning et al., 2021).

Amacı; polimetil metakrilat (PMMA) mikrokapsülleri içeren, kendi kendini onarabilen yeni nesil dental kompozitlerin geliştirilmesi olan araştırma kapsamında, PMMA mikrokapsül miktarının kompozitlerin kendi kendini iyileştirme performansı ile eğilme dayanımı, eğilme modülü ve kırılma tokluğu gibi mekanik özellikleri üzerindeki etkileri ayrıntılı olarak tartışılmıştır. Ayrıca, belirlenen optimum içeriğe sahip kompozitlerin antibakteriyel aktiviteleri ve biyouyumluluk özellikleri de değerlendirilmiştir(Ahangaran & Navarchian, 2022).

Ortalama çapı yaklaşık 30 μm ve çekirdek içeriği %15 olan akrilik mikrokapsüller başarıyla sentezlenmiştir. PMMA mikrokapsüllerinin dental kompozit formülasyonuna dahil edilmesinin, materyalin eğilme özellikleri üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir olumsuz etkisi gözlemlenmemiştir. Sentezlenen kendi kendini iyileştiren kompozitler, %78 ile %121 arasında değişen oldukça yüksek bir iyileşme verimliliği sergilemiştir. Bu materyaller ayrıca, çürüklerin başlıca sorumlusu olan Streptococcus mutans (S. mutans) bakterisine karşı etkileyici bir antibakteriyel aktivite göstermiştir. MTT testi sonuçları ise, akrilik mikrokapsüllerin dental kompozit yapısına dahil edilmesinin herhangi bir sitotoksik etki yaratmadığını ve biyouyumlu olduğunu ortaya koymuştur. Bu çalışmada, ilk defa, mükemmel iyileşme

performansı ve antibakteriyel özelliklere sahip akrilik mikro kapsüller içeren kendiliğinden iyileşen dental nanokompozitler hazırlanmıştır(Ahangaran & Navarchian, 2022).

BisGMA-UDMA(Üretan Dimetil Metakrilat)-TEGDMA (1:1:1) rezin matrisi, ağırlıkça %0,5 CQ (kamforokinon) ve %0,5 EDMAB (başlatıcı sistem), %2 Grubb katalizörü, %55 silanlanmış baryum borosilikat cam dolgu (0,7 μm) ve %5 DCPD mikrokapsüllerinden (50 μm) oluşan dental kompozitlerin performansı incelenen çalışmada özellikle DCPD mikrokapsüllerinin kompozit yapı içerisindeki kullanımına odaklanılmıştır(Wertzberger et al., 2010). Amaç, kompozit içindeki %5 ağırlık oranındaki DCPD mikrokapsüllerini kontrol gruplarıyla (mikrokapsül ve Grubb katalizörü içermeyen, sadece %5 ağırlık oranında mikro kapsül içeren ve sadece %2 ağırlık oranında Grubb katalizörü içeren) karşılaştırmaktı. Bu karşılaştırma sonucunda, kendiliğinden iyileşen kompozit numunede ilk kırılma tokluğunun %57 oranında geri kazanıldığı bulunmuştur. Üç kontrol grubunun tamamında ise herhangi bir onarım verimliliği bildirilmemiştir(Wertzberger et al., 2010).

Mikrobiyal Kaynaklı Kalsiyum Karbonat Çökeltisi (MICP) tabanlı kendi kendini iyileştiren rezin kompozitler, restoratif diş hekimliğinde yenilikçi bir çözüm sunmaktadır. Bu sistemde, çatlak oluşumuyla birlikte açığa çıkan nem ve hava, malzeme içindeki bakterileri aktive ederek kalsiyum karbonat ($CaCO_3$) çökeltilmesini sağlar ve bu mineralizasyon sayesinde mikro çatlaklar otonom olarak doldurulur. Çatlak tamamen kapandığında bakteriler, yeni bir hasar oluşana dek uykuda kalır veya spor formuna geçer; bu döngüsel mekanizma, malzemenin tekrarlanabilir kendi kendini iyileştirme özelliği sergilemesini sağlar(Han et al., 2025). Yapılan

bir çalışma sekiz farklı bakteri suşunu içeren dental rezin kompozitlerinin hazırlanmasını, kendi kendini iyileştirme özelliklerini artırmak için Mn^{2+} iyonunun araştırılmasını ve ağız ortamına özel olarak tasarlanmış bir kendi kendini iyileştirme verimliliğini değerlendirme yönteminin kullanılmasını içermektedir(Han et al., 2025). Elde edilen sonuçlara göre, Mn^{+2} ile kültüre edilen Bacillus sphaericus , çalışmadaki en etkileyici kendi kendini iyileştirme performansını sergilerken; Bacillus pasteurii en düşük iyileşme etkisini göstermiştir. Diğer taraftan, Bifidobacterium longum grubunda, ilk onarım ile ikincil onarım verimliliği arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark saptanmamıştır. Bu kendi kendini iyileştiren dental rezin kompozit, tekrarlı iyileşme döngülerini başarıyla gerçekleştirebilme yeteneğine ve yüksek biyouyumluluğa sahiptir. Bu özellikler, dental restorasyonların klinik başarısızlık oranlarında önemli bir düşüş sağlanmasına doğrudan katkıda bulunabilir(Han et al., 2025).

Araştırmacılar tarafından antibakteriyel, kendi kendini iyileştirme, düşük büzülme özelliklerine sahip yeni bir dental rezin sentezlenen bir çalışma yapılmıştır. Düşük büzülme özelliğine sahip bu dental rezin; büzülme önleyici karışımın %20 ağırlık oranında matrise dahil edilmesiyle hazırlanmıştır(X. Zhang et al., 2023). Çok fonksiyonlu bir yapı elde etmek amacıyla bu karışıma hem antibakteriyel özellik gösteren hem de kendi kendini iyileştiren mikrokapsüller farklı kütle oranlarında (%0, %2,5, %5, %7,5 ve %10) eklenerek nihai dental rezin sentezlenmiştir. Ağırlıkça %20 oranında büzülme önleyici karışım ve %7,5 oranında mikrokapsül içeren rezinin polimerizasyon hacimsel büzülmesi, kontrole kıyasla %30,12 (%4,13 ± %0,42) oranında azalmıştır. Ayrıca, mekanik özelliklerini ve hücre canlılığını olumsuz etkilemeden yüksek

antibakteriyel aktivite ve %71'lik iyi bir kendi kendini iyileştirme verimliliği sergilemiştir(X. Zhang et al., 2023).

Sekonder çürükleri önlemede umut verici bir potansiyel sunan ve restorasyon kırılmalarını azaltan çift fonksiyonlu kompozit kullanılan çalışmada; protein tutulumunu engelleyen 2-metakrililoksietil fosforilkolin (MPC) ajanı ve kendi kendine iyileşme özelliği göstermesi için mikrokapsüller kompozit yapısına dahil edilmiştir(Chen et al., 2017). Protein tutulumunu engelleyen MPC ajanı, literatürde belirtilen yöntemlere uygun olarak sentezlenmiştir. Bu ajan, protein absorpsiyonunu azaltmada ve bakterilerin restorasyon yüzeyine yapışmasına zemin hazırlayan tabakanın oluşumunu engellemede kritik bir rol oynamaktadır(Chen et al., 2017; N. Zhang et al., 2015). Kompozit yapısında ağırlıkça %7,5 MPC tozu ve %10 TEGDMA-DHEPT mikrokapsülünün karıştırılması, kabul edilebilir mekanik özelliklerin korunması açısından optimum formülasyon olarak belirlenmiştir. Kendi kendini iyileştiren, antibakteriyel kompozitlerin eğilme dayanımı ve elastik modül değerleri, mikrokapsül içermeyen kontrol gruplarıyla kıyaslandığında istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık göstermemiştir(Chen et al., 2017). %10 mikrokapsül ilavesiyle (MPC varlığından bağımsız olarak), kompozitlerin KIC (kırılma tokluğu) değerleri kontrol grubuna göre %36 daha yüksek çıkmıştır; ayrıca MPC ilavesinin iyileşme sonrası kırılma tokluğu üzerinde olumsuz bir etkisi saptanmamıştır. Bu çift fonksiyonlu kompozitin sergilediği onarım performansı, başlangıç kırılma tokluğu değerinde %57 ile %71 oranında bir geri kazanım sağlamaktadır(Chen et al., 2017).

Mikrokapsüller dental rezinlerde kendi kendini iyileştirme yeteneği kazandırmak amacıyla kullanılsa da, organik kabuk

yapılarının hassasiyeti ve kullanım ömrü boyunca yalnızca bir kez onarım gerçekleştirebilmeleri bu materyallerin kullanımını kısıtlamaktadır(Yao et al., 2022).

Bu kısıtlamaları aşmak için; kuaterner amonyum tuzu içeren, nano-antibakteriyel inorganik dolgu maddesi (NIF) ile modifiye edilmiş yenilikçi bir nanoparçacıklı mikrokapsül sistemi sentezlenen bir çalışma yürütülmüştür(Yao et al., 2022). Nanomalzemelerin kullanımı, mikrokapsüllerin kabuk yapısını güçlendirmenin yanı sıra onlara antibakteriyel bir özellik kazandırmıştır. Nano-antibakteriyel inorganik dolgu maddelerinin (NIF) entegrasyonu ile mikrokapsüllerin pürüzlülük, elastik modül ve sertlik değerlerinde istatistiksel olarak anlamlı bir artış kaydedilmiştir. Mikrobiyolojik analizlerde, NIF kullanımı kontrol grubuna kıyasla bakteriyel koloni düzeyinde azalma görülmüştür. Ayrıca, %7,5 Mikrokapsül-%10 NIF içeren rezin, hücre canlılığını riske atmadan yaklaşık %69 oranında bir kendi kendine iyileşme verimliliği sergilemiştir(Yao et al., 2022).

Hem sekonder çürüklerle hem de restorasyon hasarlarıyla eş zamanlı mücadele edebilmek amacıyla, nanoparçacıklarla modifiye edilmiş, kendi kendini iyileştiren mikrokapsüller içeren, antimikrobiyal dental rezin sentezlenen bir çalışma yapılmıştır(J. Wu, Weir, Melo, et al., 2016). Sentezlenen bu yeni çok işlevli dental rezin, mikrokapsül kütlesi %10 olarak ayarlandığında; materyal hem yüksek bir antibakteriyel oran (%80,3) hem de güçlü bir kendi kendine iyileşme verimliliği (%66,1) sergilemiştir. Buna ek olarak; malzemenin hidrofillik düzeyi, mekanik özellikleri ve hücre toksisitesi bu modifikasyondan olumsuz etkilenmeyerek stabil kalmıştır(J. Wu, Weir, Melo, et al., 2016).

TiO_2 ve kitosan nanopartikülleri kullanılarak dental nanokompozitin kendi kendini iyileştirme özelliklerini geliştirmesi

amaçlanan çalışmada suya maruz bırakıldıktan 3 ay sonra eğilme ve basma dayanımı, çatlak onarımı ve kendi kendini iyileştirme ömrü değerlendirilmiştir(Ravandi et al., 2024). Bu iki malzeme eş zamanlı kullanıldığında, eğilme dayanımında yaklaşık %2 oranında bir iyileşme kaydedilmiş; ancak basınç dayanımı bu modifikasyondan etkilenmemiştir. Diğer numunelerle kıyaslandığında, ağırlıkça %0,5 nano-TiO_2 ve kitosan içeren nanokompozit, daha yüksek kırılma tokluğu iyileşmesi ve kendi kendini iyileştirme verimliliği sergilemiştir(Ravandi et al., 2024).

İyileştirici sıvı olarak trietilen glikol dimetakrilat (TEGDMA) ve N,N-dihidroksietil-p-toluidin (DHEPT) içeren kendi kendini iyileştiren yeni bir dental kompozit geliştirilmesi amaçlanan çalışmada geliştirilen bu kompozitin mekanik performansının yanı sıra, 6 ay boyunca suya maruz kaldıktan sonraki kendi kendini iyileştirme etkinliği ve dayanıklılığı incelenmiştir(J. Wu, Weir, Melo, et al., 2016). Çalışmanın sonucunda suya maruz kalmasına rağmen mükemmel bir kendi kendini iyileştirme kapasitesine sahip olan bu kompozit, başarıyla geliştirilmiştir. Elde edilen veriler, 6 aylık suyla yaşlandırma süreci boyunca kendi kendini iyileştirme etkinliğinde herhangi bir azalma meydana gelmediğini kanıtlamıştır(J. Wu, Weir, Melo, et al., 2016).

Bir dizi çalışma, su/poliasit çözeltisi ile doldurulmuş silika mikrokapsüller içeren dental kompozitlerin kullanımını incelemiştir(Huyang et al., 2016; Sharma et al., 2019; Yahyazadehfar et al., 2018). Bu araştırmalardan birinde farklı oranlarda (ağırlıkça %0, 2,5, 5 ve 10) silanlanmış silika mikrokapsüller içeren bir formülasyon test edilmiştir. Kompozitteki silika mikrokapsül yüklemesinin artırılması (≥ %10), materyalin

elastik modül değerlerinde önemli bir düşüşe neden olarak bu değeri 10 GPa'nın altına çekmiştir(Huyang et al., 2016).

Su/poliasit dolgulu silanlanmış silika mikrokapsüllerin onarım performansı incelendiğinde; kompozit yapısında ağırlıkça %5–10 oranında mikrokapsül kullanımı, başlangıç kırılma tokluğunun %25'ine kadar bir geri kazanım sağlamaktadır. Ancak, ağırlıkça %10 oranındaki mikrokapsül yüklemesinin, kompozitin mekanik özellikleri üzerinde olumsuz etkileri olduğu gözlemlenmiştir. Silanlanmış silika mikrokapsülleri içeren kendi kendini iyileştiren dental kompozitler için en iyi genel performans, ağırlıkça %5 mikrokapsül konsantrasyonu ile elde edilmiştir(Huyang et al., 2016). Benzer bulgular; ağırlıkça %5 MA(metakrilat silan)-silanize mikrokapsül kullanımının hem iyileşme performansı hem de kırılma tokluğu açısından optimum formülasyon olduğunu doğrulamaktadır. Öte yandan, kompozit formülasyonlarında ağırlıkça %5'in altındaki silanlanmış silika mikrokapsül oranlarının herhangi bir iyileşme sağlamadığı tespit edilmiştir(Yahyazadehfar et al., 2018). Literatürde, maksimum onarım performansının ağırlıkça %25 oranında mikrokapsül içeren kompozitlerde elde edildiği rapor edilse de bu yüksek yükleme oranının materyalin kırılma tokluğu ve yorgunluk çatlağı ilerlemesi üzerinde dramatik derecede olumsuz bir etki yarattığı bildirilmiştir(Yahyazadehfar et al., 2018).

Ağızda yaşlanmayı fizyolojik olarak anlamlı koşullarda simüle etmek için özel tasarlanmış bir çiğneme simülatörü kullanılarak mikrokapsüller içeren kendini iyileştiren kompozitlerin yorgunluk davranışını inceleyen çalışmanın sonuçlarına göre test edilen tüm numunelerin başlangıç ve son eğilme dayanımları değerleri karşılaştırıldığında, fleksural dayanım değerlerinde önemli

bir düşüş gözlemlenmiştir(Ning et al., 2023). Mikrokapsül içermeyen rezin bazlı kompozitlerin son eğilme dayanımı değerleri, başlangıç değerlerine kıyasla anlamlı derecede azalırken, kendi kendini iyileştiren kompozitlerde bu azalma istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır. Buna karşın, kendi kendini iyileştiren kompozitlerin henüz düşük mekanik dayanımla karakterize edilen deneysel aşamada olmaları, bu materyallerin klinik uygulamaya geçişini kısıtlayan temel bir engel teşkil etmektedir(Ning et al., 2023).

Kendi kendini iyileştiren dental kompozitlerin yorgunluk direncini incelemek amacıyla yapılan çalışmada, yaygın kullanılan dental monomerleri içeren dört farklı tip PUF mikrokapsülünü in situ polimerizasyon yöntemiyle sentezlenmesi sonucu elde edilen sonuçlar, kompozitlerin yorgunluk direncinde bir artış olduğunu doğrulamıştır; ancak kendi kendini iyileştirme verimliliği %40 seviyesinde kalmıştır. Bu durumun, onarıcı monomerin kapsüllerden yetersiz salınımı veya çatlak yüzeylerinin tam olarak birleşememesi nedeniyle kaynaklanabileceği değerlendirilmektedir(D. Kafagy et al., 2017; D. H. Kafagy et al., 2018).

Kendi kendini iyileştiren dental kompozitlerin antibakteriyel etkinliği incelendiği bir çalışmada; formülasyona dimetilaminododesil metakrilat (DMAHDM) eklenmesinin, materyale güçlü bir antibakteriyel özellik kazandırdığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, DMAHDM içeren kompozitler, kontrol kompozit ile karşılaştırıldığında en düşük metabolik aktiviteye ve laktik asit üretimine sahiptir(J. Wu, Weir, Melo, et al., 2016).

Farklı Dental Materyallerde Kendini İyileştirme Özelliği

Dental kompozit çalışmalarının yanı sıra araştırmacılar, antibakteriyel ve remineralizasyon özelliklerine sahip ilk kendi kendini iyileştiren rezin adezivi geliştirmiştir. Çalışmada, ağırlıkça %7,5 TEGDMA/PUF mikrokapsülü içeren kendi kendini iyileştirme özellikleri üzerinde; DMAHDM ve amorf kalsiyum fosfat (NACP) nanopartiküllerinin etkileri incelenmiştir(Yue et al., 2018). Elde edilen sonuçlar, hazırlanan adezivlerin dentin dokusu ile yüksek uyum sergilediğini ortaya koymuştur. Ayrıca, bu adeziv sistemlerin başlangıç kırılma tokluğu değerlerini %67 oranında geri kazanma yeteneğine sahip olduğu kanıtlanmıştır. Onarım ajanının mikrokapsüllerden serbest kalması ve ardından polimerleşmesiyle meydana gelen yeni polimer tabakaları görülmektedir(Yue et al., 2018).

Amacı; kendi kendini iyileştiren bir adeziv sistemde temel bileşen olarak kullanılmak üzere, çekirdek materyali olarak trietilen glikol dimetakrilat (TEGDMA) içeren ve poliüretan kabuk yapısına sahip nanokapsüller sentezlemek olan çalışmada FTIR analizi, TEGDMA nanokapsüllerinin başarıyla sentezlendiğini doğrulamıştır(Ouyang et al., 2011). Bu nanokapsüllerin yüksek oranda iyileştirici madde yükleme kapasitesine sahip olduğu saptanmıştır. Ağırlıkça %9 oranında TEGDMA nanokapsül içeren dental adezivin bağlanma dayanımı, diğer gruplarla kıyaslandığında istatistiksel olarak anlamlı derecede daha yüksek bulunmuştur. Ayrıca, adeziv sistemin biyouyumluluğunun, TEGDMA nanokapsül ilavesinden olumsuz etkilenmediği ve güvenli kullanım profilini koruduğu gözlemlenmiştir(Ouyang et al., 2011).

Bir çalışmada mikro çatlak oluşumunu engellemek ve 3B baskılı protezlerin mekanik dayanıklılığını artırmak amacıyla,

çekirdek materyali olarak TEGDMA iyileştirici ajanını içeren PUF mikrokapsülleriyle güçlendirilmiş 3B baskılı protez rezin kompozitlerinin geliştirilmesini ve karakterizasyonunun incelenmesi hedeflenmiştir(Syed et al., 2025).

Kontrol grubuyla kıyaslandığında; PUF mikrokapsülleri ile modifiye edilmiş, 3B yazıcı üretimi protez kaide kompozitinin dönüşüm derecesinde, yüzey sertliğinde ve eğilme dayanımında hafif bir azalma kaydedilmiştir. Buna karşın sonuçlar, mikrokapsül konsantrasyonundaki artışın; malzemenin kırılma tokluğunu ve kendi kendini iyileştirme verimliliğini istatistiksel olarak anlamlı ölçüde artırdığını kanıtlamıştır(Syed et al., 2025). Analizler iyileştirici ajanın zamanla kontrollü bir salınım profili izlediğini ve maksimum salınımın 7. günde gerçekleştiğini ortaya koymuştur. Mikroskobik incelemeler ise çatlak düzleminde Rodamin B ile işaretlenmiş iyileştirici ajanın başarılı bir şekilde kapsüllendiğini ve hedeflenen bölgede kontrollü olarak salındığını doğrulamıştır. PUF mikrokapsülleri ile modifiye edilmiş 3B protez rezin kompozitleri, mikrokapsül içerik oranına bağlı olarak mikrokırıkların kendi kendini iyileştirme ve gelişmiş kırılma tokluğu açısından önemli bir potansiyel göstermiştir(Syed et al., 2025).

İndirekt restorasyonların yapıştırılmasında yaygın olarak simanlar kullanılmaktadır; ancak oluşabilen mikro çatlaklar sıklıkla siman başarısızlıklarına yol açmaktadır. Amacı, literatürdeki ilk kendi kendini iyileştiren yapıştırma simanını geliştirmek olan çalışma kapsamında geliştirilen bu simanın dentine bağlanma dayanımı ve mekanik özellikleri incelenmiş; ayrıca çatlak onarım kapasitesi ile 6 aylık su yaşlandırması altındaki kendi kendini iyileştirme dayanıklılığı kapsamlı bir şekilde araştırılmıştır(J. Wu et al., 2017). Simana %7,5 oranında mikrokapsül eklenmesi, dentin

bağlanma dayanımı ve orijinal mekanik özellikler üzerinde herhangi bir olumsuz etki yaratmaksızın etkili bir kendi kendini iyileştirme kapasitesi sağlamıştır. Bu modifikasyon sonucunda, %68 ile %77 arasında değişen mükemmel bir iyileşme oranı elde edilmiştir. Ayrıca, altı aylık su yaşlandırması sonundaki kendi kendini iyileştirme verimliliği, 1 günlük sonuçlarla kıyaslandığında istatistiksel olarak anlamlı bir azalma göstermemiştir. Bu bulgu, geliştirilen materyalin kendi kendini iyileştirme özelliğinin sulu ortamda zamanla bozulmadığını ve dayanıklılığını koruduğunu kanıtlamaktadır. Geliştirilen bu kendi kendini iyileştiren siman; kron ve köprülerin simantasyonu ile diğer adeziv uygulamalarda, mikro çatlakları otonom olarak onarma ve restorasyon ömrünü uzatma potansiyeliyle diş hekimliği için oldukça umut vericidir(J. Wu et al., 2017).

Amacı, periodontal hastalıklar için yardımcı bir tedavi olarak kullanılmak üzere, optimum fiziko-kimyasal özelliklere, güçlü doku adezyonuna, uzun süreli antimikrobiyal aktiviteye ve biyouyumluluğa sahip jel tipi bir antimikrobiyal ajan geliştirmek olan çalışma yapılmıştır(Kim et al., 2024). Alg–PBA(konjuge aljinat-fenilboronik asit) ve TA(Tannik asit) bazlı antimikrobiyal, adeziv ve kendi kendini iyileştiren hidrojeller geliştirilmiştir. TA, hem polimerik ağlar oluşturan bir çapraz bağlayıcı hem de P. gingivalis'i inhibe eden bir antimikrobiyal ajan olarak görev yapmıştır. Bu hidrojeller mükemmel kendi kendini iyileştirme yetenekleri, güçlü doku adezyonu ve biyouyumluluk göstererek P. gingivalis'in uzaklaştırılmasında etkili olmuşlardır. Bundan dolayı bu hidrojeller, özellikle periodontitis ve peri-implantitisin önlenmesi ve tedavisinde olmak üzere, biyomedikal uygulamalar için umut vaat etmektedir(Kim et al., 2024).

Sonuç

Doku mühendisliği aracılığıyla diş sert dokusunun rejenerasyonu tam anlamıyla sağlanana dek, restoratif rezin kompozitler diş kusurlarının tedavisinde kritik bir rol oynamaya devam edecektir. Bu bağlamda, kompozitlerin klinik ömrünü uzatmak amacıyla bu materyallere antibakteriyel, remineralizasyon ve kendi kendini iyileştirebilme özelliklerinin entegre edilmesi oldukça faydalıdır(J. Zhang et al., 2024).

Öte yandan, farklı özelliklerin geliştirilmesi birbiri üzerinde olumsuz etkiler yaratabildiği için kompozit formülasyonlarını optimize etmek oldukça güçtür. Temel hedef; fonksiyonel bileşenlerin eklenmesiyle, mevcut performans kriterlerinden ödün vermeksizin kompozitlere üstün yeni özellikler kazandırmaktır. Mükemmel özelliklere sahip rezin materyaller sentezleyebilmek için her bir fonksiyonel bileşenin ideal kullanım miktarını araştırmak, bu süreçteki en etkili çözüm yoludur(J. Zhang et al., 2024).

Bu yeni materyallerin, karmaşık ağız ortamında dayanıklılık gösterebilmesi için in vitro uzun süreli deneylerin ötesinde, çok daha zorlu koşullarla başa çıkma kapasitesine sahip olması da aynı derecede kritik bir öneme sahiptir. Gelecekte, yeni nesil dental rezin kompozitlerinin etkinliğini ve ağız mikroflorası ile olan etkileşimlerini derinlemesine incelemek amacıyla, daha kapsamlı canlı organizma in vivo çalışmalarının ve klinik araştırmaların yapılması öngörülmektedir(J. Zhang et al., 2024).

Kaynakça

Ahangaran, F., & Navarchian, A. H. (2022). Towards the development of self-healing and antibacterial dental nanocomposites via incorporation of novel acrylic microcapsules. *Dental Materials*, *38*(5), 858–873. https://doi.org/10.1016/j.dental.2022.04.004

Althaqafi, K. A., Satterthwaite, J., AlShabib, A., & Silikas, N. (2024). Synthesis and characterisation of microcapsules for self-healing dental resin composites. *BMC Oral Health 2024 24:1*, *24*(1), 109-. https://doi.org/10.1186/S12903-023-03764-8

Anal, A. K., & Singh, H. (2007). Recent advances in microencapsulation of probiotics for industrial applications and targeted delivery. *Trends in Food Science and Technology*, *18*(5), 240–251. https://doi.org/10.1016/J.TIFS.2007.01.004

Baldissera, R. A., Corrêa, M. B., Schuch, H. S., Collares, K., Nascimento, G. G., Jardim, P. S., Moraes, R. R., Opdam, N. J. M., & Demarco, F. F. (2013). Are there universal restorative composites for anterior and posterior teeth? *Journal of Dentistry*, *41*(11), 1027–1035. https://doi.org/10.1016/j.jdent.2013.08.016

Bevan, C., Snellings, W. M., Dodd, D. E., & Egan, G. F. (1992). Subchronic toxicity study of dicyclopentadiene vapor in rats. *Toxicology and Industrial Health*, *8*(6), 353–367.

Blum, I. R., Jagger, D. C., & Wilson, N. H. F. (2011). Defective dental restorations: to repair or not to repair? Part 1: direct composite restorations. *Dental Update*, *38*(2). https://doi.org/10.12968/denu.2011.38.2.78

Caruso, M. M., Delafuente, D. A., Ho, V., Sottos, N. R., Moore, J. S., & White, S. R. (2007). Solvent-promoted self-healing epoxy materials. *Macromolecules*, *40*(25), 8830–8832. https://doi.org/10.1021/MA701992Z

Chan, B. Q. Y., Low, Z. W. K., Heng, S. J. W., Chan, S. Y., Owh, C., & Loh, X. J. (2016). Recent Advances in Shape Memory Soft Materials for Biomedical Applications. *ACS Applied Materials & Interfaces*, *8*(16), 10070–10087. https://doi.org/10.1021/ACSAMI.6B01295

Chen, C., Wu, J., Weir, M., Wang, L., Zhou, X., Xu, H., & Melo, M. (2017). Dental Composite Formulation Design with Bioactivity on Protein Adsorption Combined with Crack-Healing Capability. *Journal of Functional Biomaterials*, *8*(3), 40. https://doi.org/10.3390/jfb8030040

Correa, M. B., Peres, M. A., Peres, K. G., Horta, B. L., Barros, A. D., & Demarco, F. F. (2012). Amalgam or composite resin? Factors influencing the choice of restorative material. *Journal of Dentistry*, *40*(9), 703–710. https://doi.org/10.1016/j.jdent.2012.04.020

Da Rosa Rodolpho, P. A., Donassollo, T. A., Cenci, M. S., Loguércio, A. D., Moraes, R. R., Bronkhorst, E. M., Opdam, N. J. M., & Demarco, F. F. (2011). 22-Year clinical evaluation of the performance of two posterior composites with different filler characteristics. *Dental Materials*, *27*(10), 955–963. https://doi.org/10.1016/j.dental.2011.06.001

Demarco, F. F., Baldissera, R. A., Madruga, F. C., Simões, R. C., Lund, R. G., Correa, M. B., & Cenci, M. S. (2013). Anterior composite restorations in clinical practice: findings

from a survey with general dental practitioners. *Journal of Applied Oral Science*, *21*(6), 497–504. https://doi.org/10.1590/1679-775720130013

Dou, G., Peng, G., Hu, Y., Sun, Y., Jiang, H., & Zhang, T. (2022). Effects of interface bonding on the macro-mechanical properties of microcapsule/epoxy resin composites. *Surfaces and Interfaces*, *34*, 102310. https://doi.org/10.1016/J.SURFIN.2022.102310

Feilzer, A. J., de Gee, A. J., & Davidson, C. L. (1993). Setting stresses in composites for two different curing modes. *Dental Materials*, *9*(1), 2–5. https://doi.org/10.1016/0109-5641(93)90095-8

Ferracane, J. L. (1995). Current trends in dental composites. In *Critical Reviews in Oral Biology and Medicine* (Vol. 6, Issue 4, pp. 302–318). Crit Rev Oral Biol Med. https://doi.org/10.1177/10454411950060040301

Ferracane, J. L. (2011). Resin composite - State of the art. In *Dental Materials* (Vol. 27, Issue 1, pp. 29–38). Dent Mater. https://doi.org/10.1016/j.dental.2010.10.020

Ferracane, J. L. (2013). Resin-based composite performance: Are there some things we can't predict? *Dental Materials*, *29*(1), 51–58. https://doi.org/10.1016/j.dental.2012.06.013

Fugolin, A. P., & Pfeifer, C. S. (2022a). Engineering a new generation of thermoset self-healing polymers based on intrinsic approaches. *JADA Foundational Science*, *1*, 100014. https://doi.org/10.1016/J.JFSCIE.2022.100014

Fugolin, A. P., & Pfeifer, C. S. (2022b). Strategies to design extrinsic

stimuli-responsive dental polymers capable of autorepairing. *JADA Foundational Science*, *1*, 100013. https://doi.org/10.1016/J.JFSCIE.2022.100013

Han, Y., Zhang, X., Weng, J., Tian, S., Dong, X., Cai, Z., Zhang, Y., Wu, T., Lin, D., & Zhu, Y. (2025). Optimization of a novel dental self-healing resin composite by bacteria-induced biomineralization. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, *13*. https://doi.org/10.3389/FBIOE.2025.1590348

Huyang, G., Debertin, A. E., & Sun, J. (2016). Design and development of self-healing dental composites. *Materials and Design*, *94*, 295–302. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.01.046

Jandt, K. D., & Sigusch, B. W. (2009). Future perspectives of resin-based dental materials. *Dental Materials : Official Publication of the Academy of Dental Materials*, *25*(8), 1001–1006. https://doi.org/10.1016/J.DENTAL.2009.02.009

Jiang, Y., Ng, E. L. L., Han, D. X., Yan, Y., Chan, S. Y., Wang, J., & Chan, B. Q. Y. (2023). Self-Healing Polymeric Materials and Composites for Additive Manufacturing. *Polymers 2023, Vol. 15, Page 4206*, *15*(21), 4206. https://doi.org/10.3390/POLYM15214206

Kafagy, D., Adams, K., Khajotia, S., & Keller, M. (2017). Quasi-static characterization of self-healing dental composites. *Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series*, *7*, 203–208. https://doi.org/10.1007/978-3-319-41766-0_24/QUASI-STATIC-CHARACTERIZATION-SELF-HEALING-DENTAL-COMPOSITES-DHYAA-

KAFAGY-KEVIN-ADAMS-SHARUKH-KHAJOTIA-MICHAEL-KELLER

Kafagy, D. H., Khajotia, S. S., & Keller, M. W. (2018). Fatigue Characterization of In-Situ Self-Healing Dental Composites. *Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series*, *6*, 151–155. https://doi.org/10.1007/978-3-319-63408-1_15/FATIGUE-CHARACTERIZATION-SITU-SELF-HEALING-DENTAL-COMPOSITES-KAFAGY-KHAJOTIA-KELLER

Kim, H. S., Kim, M., Kim, Y., Shin, H. H., Lee, S. woo, & Ryu, J. H. (2024). Antimicrobial adhesive self-healing hydrogels for efficient dental biofilm removal from periodontal tissue. *Dental Materials*, *40*(11), 1970–1980. https://doi.org/10.1016/j.dental.2024.09.012

Li, C. H., & Zuo, J. L. (2020). Self-Healing Polymers Based on Coordination Bonds. *Advanced Materials (Deerfield Beach, Fla.)*, *32*(27). https://doi.org/10.1002/ADMA.201903762

Melgar, X. C., Opdam, N. J. M., Britto Correa, M., Franzon, R., Demarco, F. F., Araujo, F. B., & Casagrande, L. (2017). Survival and Associated Risk Factors of Selective Caries Removal Treatments in Primary Teeth: A Retrospective Study in a High Caries Risk Population. *Caries Research*, *51*(5), 466–474. https://doi.org/10.1159/000478535

Menikheim, S. D., & Lavik, E. B. (2020). Self-healing biomaterials: The next generation is nano. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Nanomedicine and Nanobiotechnology*, *12*(6), e1641. https://doi.org/10.1002/WNAN.1641

Moreira, A. G., Cuevas-Suárez, C. E., Ribeiro, J. S., Maass, J. B., Piva, E., de Moraes, R. R., Bottino, M. C., & Lima, G. da S. (2022). Development of functional fillers as a self-healing system for dental resin composite. *Journal of Dentistry*, *127*. https://doi.org/10.1016/j.jdent.2022.104313

Ning, K., Loomans, B., Yeung, C., Li, J., Yang, F., & Leeuwenburgh, S. (2021). Influence of microcapsule parameters and initiator concentration on the self-healing capacity of resin-based dental composites. *Dental Materials*, *37*(3), 403–412. https://doi.org/10.1016/j.dental.2020.11.025

Ning, K., Yang, F., Bronkhorst, E., Ruben, J., Nogueira, L., Haugen, H., Loomans, B., & Leeuwenburgh, S. (2023). Fatigue behaviour of a self-healing dental composite. *Dental Materials : Official Publication of the Academy of Dental Materials*, *39*(10), 913–921. https://doi.org/10.1016/J.DENTAL.2023.08.172

Ouyang, X., Huang, X., Pan, Q., Zuo, C., Huang, C., Yang, X., & Zhao, Y. (2011). Synthesis and characterization of triethylene glycol dimethacrylate nanocapsules used in a self-healing bonding resin. *Journal of Dentistry*, *39*(12), 825–833. https://doi.org/10.1016/J.JDENT.2011.09.001

Rajasekaran, S. P., Huynh, B., & Fugolin, A. P. P. (2024). Tailoring Microemulsification Techniques for the Encapsulation of Diverse Cargo: A Systematic Analysis of Poly (Urea-Formaldehyde) Microcapsules. *Journal of Functional Biomaterials 2024, Vol. 15, Page 117*, *15*(5), 117. https://doi.org/10.3390/JFB15050117

Ravandi, R., Zeinali Heris, S., Hemmati, S., Aghazadeh, M.,

Davaran, S., & Abdyazdani, N. (2024). Effects of chitosan and TiO2 nanoparticles on the antibacterial property and ability to self-healing of cracks and retrieve mechanical characteristics of dental composites. *Heliyon*, *10*(6). https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e27734

Rekondo, A., Martin, R., Ruiz De Luzuriaga, A., Cabañero, G., Grande, H. J., & Odriozola, I. (2014). Catalyst-free room-temperature self-healing elastomers based on aromatic disulfide metathesis. *Materials Horizons*, *1*(2), 237–240. https://doi.org/10.1039/C3MH00061C

Rodriguez, E. D., Luo, X., & Mather, P. T. (2011). Linear/network poly(ε-caprolactone) blends exhibiting shape memory assisted self-healing (SMASH). *ACS Applied Materials & Interfaces*, *3*(2), 152–161. https://doi.org/10.1021/AM101012C

Ruddell, D. E., Maloney, M. M., & Thompson, J. Y. (2002). Effect of novel filler particles on the mechanical and wear properties of dental composites. *Dental Materials*, *18*(1), 72–80. https://doi.org/10.1016/S0109-5641(01)00022-7

Sharma, A., Alam, S., Sharma, C., Patnaik, A., & Kumar, S. R. (2019). Static and dynamic mechanical behavior of microcapsule-reinforced dental composite. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, *233*(6), 1184–1190. https://doi.org/10.1177/1464420717733770

Syed, M. R., Aati, S., Flematti, G., Matinlinna, J. P., & Fawzy, A. (2025). Development and characterization of 3D-printed denture base resin composites having self-healing potential. *Dental Materials : Official Publication of the Academy of*

Dental Materials, *41*(4), 451–463. https://doi.org/10.1016/J.DENTAL.2025.02.003

Then, S., Neon, G. S., & Abu Kasim, N. H. (2011). Performance of melamine modified urea-formaldehyde microcapsules in a dental host material. *Journal of Applied Polymer Science*, *122*(4), 2557–2562. https://doi.org/10.1002/APP.34361/ABSTRACT

Urdl, K., Kandelbauer, A., Kern, W., Müller, U., Thebault, M., & Zikulnig-Rusch, E. (2017). Self-healing of densely crosslinked thermoset polymers—a critical review. *Progress in Organic Coatings*, *104*, 232–249. https://doi.org/10.1016/J.PORGCOAT.2016.11.010

Utrera-Barrios, S., Verdejo, R., López-Manchado, M. Á., & Hernández Santana, M. (2023). Self-Healing Elastomers: A sustainable solution for automotive applications. In *European Polymer Journal* (Vol. 190, p. 112023). Pergamon. https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2023.112023

Venhoven, B. A. M., De Gee, A. J., Werner, A., & Davidson, C. L. (1996). Influence of filler parameters on the mechanical coherence of dental restorative resin composites. *Biomaterials*, *17*(7), 735–740. https://doi.org/10.1016/0142-9612(96)86744-5

Wang, S., & Urban, M. W. (2020). Self-healing polymers. *Nature Reviews Materials*, *5*(8), 562–583. https://doi.org/10.1038/s41578-020-0202-4

Wang, X., & Ding, T. (2024). A Review on the Current State of Microcapsule-Based Self-Healing Dental Composites. In

Journal of Functional Biomaterials (Vol. 15, Issue 6, p. 165). Multidisciplinary Digital Publishing Institute. https://doi.org/10.3390/jfb15060165

Wertzberger, B. E., Steere, J. T., Pfeifer, R. M., Nensel, M. A., Latta, M. A., & Gross, S. M. (2010). Physical characterization of a self-healing dental restorative material. *Journal of Applied Polymer Science*, *118*(1), 428–434. https://doi.org/10.1002/APP.31542

White, S. R., Sottos, N. R., Geubelle, P. H., Moore, J. S., Kessler, M. R., Sriram, S. R., Brown, E. N., & Viswanathan, S. (2001). Autonomic healing of polymer composites. *Nature*, *409*(6822), 794–797. https://doi.org/10.1038/35057232

Willocq, B., Odent, J., Dubois, P., & Raquez, J.-M. (2020). Advances in intrinsic self-healing polyurethanes and related composites. *RSC Advances*, *10*(23), 13766–13782. https://doi.org/10.1039/D0RA01394C

Wu, D. Y., Meure, S., & Solomon, D. (2008). Self-healing polymeric materials: A review of recent developments. *Progress in Polymer Science (Oxford)*, *33*(5), 479–522. https://doi.org/10.1016/J.PROGPOLYMSCI.2008.02.001

Wu, J., Weir, M. D., Melo, M. A. S., Strassler, H. E., & Xu, H. H. K. (2016). Effects of water-aging on self-healing dental composite containing microcapsules. *Journal of Dentistry*, *47*, 86–93. https://doi.org/10.1016/j.jdent.2016.01.008

Wu, J., Weir, M. D., Melo, M. A. S., & Xu, H. H. K. (2015). Development of novel self-healing and antibacterial dental composite containing calcium phosphate nanoparticles.

Journal of Dentistry, *43*(3), 317–326. https://doi.org/10.1016/j.jdent.2015.01.009

Wu, J., Weir, M. D., Zhang, Q., Zhou, C., Melo, M. A. S., & Xu, H. H. K. (2016). Novel self-healing dental resin with microcapsules of polymerizable triethylene glycol dimethacrylate and N,N-dihydroxyethyl-p-toluidine. *Dental Materials*, *32*(2), 294–304. https://doi.org/10.1016/j.dental.2015.11.014

Wu, J., Zhang, Q., Weir, M. D., Oates, T. W., Zhou, C., Chang, X., & Xu, H. H. K. (2017). Novel self-healing dental luting cements with microcapsules for indirect restorations. *Journal of Dentistry*, *66*, 76–82. https://doi.org/10.1016/j.jdent.2017.08.006

Yahyazadehfar, M., Huyang, G., Wang, X., Fan, Y., Arola, D., & Sun, J. (2018). DURABILITY OF SELF-HEALING DENTAL COMPOSITES: A COMPARISON OF PERFORMANCE UNDER MONOTONIC AND CYCLIC LOADING. *Materials Science & Engineering. C, Materials for Biological Applications*, *93*, 1020. https://doi.org/10.1016/J.MSEC.2018.08.057

Yang, Y., & Urban, M. W. (2013). Self-healing polymeric materials. *Chemical Society Reviews*, *42*(17), 7446–7467. https://doi.org/10.1039/C3CS60109A

Yao, S., Qin, L., Ma, L., Zhang, X., Jiang, H., Zhang, J., Zhou, C., & Wu, J. (2023). Novel antimicrobial and self-healing dental resin to combat secondary caries and restoration fracture. *Dental Materials : Official Publication of the Academy of Dental Materials*, *39*(11), 1040–1050.

https://doi.org/10.1016/J.DENTAL.2023.09.009

Yao, S., Qin, L., Wang, Z., Zhu, L., Zhou, C., & Wu, J. (2022). Novel nanoparticle-modified multifunctional microcapsules with self-healing and antibacterial activities for dental applications. *Dental Materials : Official Publication of the Academy of Dental Materials*, *38*(8), 1301–1315. https://doi.org/10.1016/J.DENTAL.2022.06.012

Yue, S., Wu, J., Zhang, Q., Zhang, K., Weir, M. D., Imazato, S., Bai, Y., & Xu, H. H. K. (2018). Novel dental adhesive resin with crack self-healing, antimicrobial and remineralization properties. *Journal of Dentistry*, *75*, 48–57. https://doi.org/10.1016/J.JDENT.2018.05.009

Zhang, H., & Darvell, B. W. (2012). Mechanical properties of hydroxyapatite whisker-reinforced bis-GMA-based resin composites. *Dental Materials*, *28*(8), 824–830. https://doi.org/10.1016/j.dental.2012.04.030

Zhang, J., Yang, Y., Chen, Y., Chen, X., Li, A., Wang, J., Shen, D., & Zheng, S. (2024). A review of new generation of dental restorative resin composites with antibacterial, remineralizing and self-healing capabilities. *Discover Nano*, *19*(1). https://doi.org/10.1186/S11671-024-04151-0

Zhang, N., Ma, J., Melo, M. A. S., Weir, M. D., Bai, Y., & Xu, H. H. K. (2015). Protein-repellent and antibacterial dental composite to inhibit biofilms and caries. *Journal of Dentistry*, *43*(2), 225–234. https://doi.org/10.1016/j.jdent.2014.11.008

Zhang, W., Jiang, H., Chang, Z., Wu, W., Wu, G., Wu, R., & Li, J. (2020). Recent achievements in self-healing materials based on

ionic liquids: a review. *Journal of Materials Science*, *55*(28), 13543–13558. https://doi.org/10.1007/S10853-020-04981-0

Zhang, X., Zhang, J., Zhang, T., Yao, S., Wang, Z., Zhou, C., & Wu, J. (2023). Novel low-shrinkage dental resin containing microcapsules with antibacterial and self-healing properties. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, *148*. https://doi.org/10.1016/J.JMBBM.2023.106212

BÖLÜM 9

DİŞ HEKİMLİĞİNDE RENK SEÇİMİ

MELİKE BİLCE[1]
YEŞİM DEMİREL KARADUMAN[2]

Giriş

Son yıllarda hastaların estetik beklentilerinin artmasıyla birlikte, doğal diş görünümünün başarılı bir şekilde taklit edilmesi restoratif diş hekimliğinin önemli hedeflerinden biri haline gelmiştir. Estetik açıdan başarılı bir restorasyon için uygun anatomik formun oluşturulmasının yanı sıra doğal diş dokularıyla renk uyumunun sağlanması da önem taşımaktadır. Diş rengi, dental görünümün ve estetik algının önemli bileşenlerinden biridir (Alkhatib et al., 2005).

Doğal diş rengi; mine ve dentinin optik özellikleri ile ışığın bu dokulardaki yansıma, absorbsiyon, iletim ve saçılma davranışlarının etkileşimi sonucunda ortaya çıkmaktadır. Renk algısının ışık kaynağı, çevresel koşullar ve gözlemciye bağlı faktörlerden etkilenmesi ise klinik renk seçimini

[1] Uzm. Dt., Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi, Restoratif Tedavisi Anabilim Dalı, , melikebilce@hotmail.com , 0009-0000-0015-5967
[2] Uzm. Dt., Çorlu Ağız ve Diş Sağlığı Merkezi, yesimdemirel1417@gmail.com, 0009-0005-6981-7961

güçleştirebilmektedir. Görsel renk değerlendirmesi subjektif olduğundan farklı gözlemciler arasında, hatta aynı gözlemcinin farklı zamanlarda yaptığı değerlendirmelerde farklılıklar görülebilmektedir (Culpepper, 1970).

Diş hekimliğinde renk seçimi genel olarak görsel ve cihaz destekli yöntemlerle gerçekleştirilmektedir. Görsel değerlendirmede renk skalalarından yararlanılırken, cihaz destekli yöntemler daha objektif ve tekrarlanabilir renk ölçümüne olanak sağlamaktadır. Bu nedenle klinik renk seçiminde görsel ve cihaz destekli yöntemlerin birlikte kullanılması önerilmektedir (Bayındır & Wee, 2006). Bu bölümde rengin temel özellikleri, renk sistemleri ve diş hekimliğinde kullanılan renk belirleme yöntemleri ele alınacaktır.

Renk

Renk, ışık, nesne ve gözlemci arasındaki etkileşimin sonucunda ortaya çıkan görsel bir algıdır. Bir nesnenin renkli olarak algılanabilmesi için ortamda uygun bir ışık kaynağının bulunması, bu kaynaktan gelen ışığın nesneyle etkileşmesi ve nesneden göze ulaşan ışığın görsel sistem tarafından işlenmesi gerekmektedir. Dolayısıyla renk, yalnızca nesneye ait değişmez bir fiziksel özellik olarak değil; ışığın özellikleri, nesnenin optik davranışı ve gözlemcinin görsel yanıtının birlikte belirlediği bir olgu olarak değerlendirilmelidir (Joiner, 2004; Sengez & Dörter, 2019; Sikri, 2010).

Işık, elektromanyetik enerjinin insan gözü tarafından algılanabilen bölümünü içermektedir (Wee, 2006). İnsan gözü elektromanyetik spektrumun yaklaşık 380–780 nm dalga boyları arasındaki bölümüne duyarlıdır ve bu aralık görünür spektrum olarak tanımlanmaktadır (McPhee, 1985). Bir nesne üzerine ulaşan ışığın bir bölümü absorbe edilirken bir bölümü yansıtılabilir veya nesnenin optik özelliklerine bağlı olarak iletilebilir. Göze ulaşan bu ışığın spektral özellikleri, nesnenin hangi renkte algılanacağını belirleyen

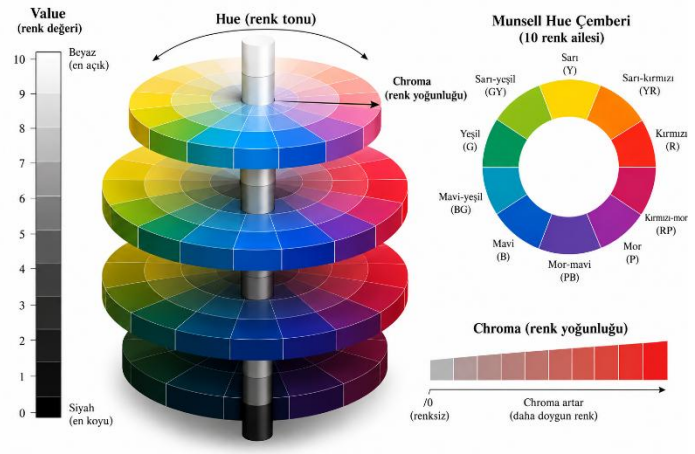
temel faktörlerden biridir (Joiner, 2004; Sikri, 2010). Görünür spektrumdaki dalga boylarının birlikte göze ulaşması beyaz renk algısına neden olurken, görünür ışığın göze ulaşmaması siyah olarak algılanmaktadır (Fondriest, 2003).

Renk algısında bireysel farklılıkların bulunması, görsel renk değerlendirmesinin belirli ölçüde subjektif olmasına neden olmaktadır (Gürel, 2004). Bu durum özellikle küçük renk farklılıklarının klinik sonucu etkileyebildiği estetik diş hekimliğinde önem kazanmaktadır. Rengin daha standart ve karşılaştırılabilir biçimde ifade edilebilmesi amacıyla farklı renk sistemleri geliştirilmiştir. Diş hekimliğinde bu amaçla Munsell ve CIE renk sistemlerinden yararlanılmaktadır (Wee, 2006).

Munsell Renk Sistemi

Albert H. Munsell tarafından 1905 yılında geliştirilen Munsell renk sistemi, renklerin sistematik olarak tanımlanmasına olanak sağlayan en eski renk sınıflandırma sistemlerinden biridir (Wee, 2006). Tutarlı ve kullanımı kolay bir sistem olması nedeniyle diş hekimliğinde renk değerlendirilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Seghi et al., 1986; Tung et al., 2002). Munsell sisteminde renk, üç boyutlu bir yapı içerisinde hue (renk tonu), value (renk değeri) ve chroma (renk yoğunluğu) olmak üzere üç temel özellik üzerinden tanımlanmaktadır (Culpepper, 1970).

Şekil 1. Munsell renk sisteminde hue, value ve chroma boyutlarının şematik gösterimi.



Hue (renk tonu), bir rengin ait olduğu renk ailesini ifade eder ve kırmızı, sarı, yeşil veya mavi gibi renklerin birbirinden ayırt edilmesini sağlar (Fondriest, 2003). Munsell sisteminde hue, renk uzayının merkez ekseni çevresinde konumlandırılmış beş ana ve beş ara renk ailesiyle temsil edilmektedir (Horn et al., 1998). Bu on renk ailesi kırmızı (R), sarı-kırmızı (YR), sarı (Y), yeşil-sarı (GY), yeşil (G), mavi-yeşil (BG), mavi (B), mor-mavi (PB), mor (P) ve kırmızı-mor (RP) şeklinde sıralanmaktadır (Della Bona et al., 2009). VITA Classical renk skalasında ise hue A, B, C ve D harfleriyle ifade edilmektedir (Horn et al., 1998).

Value (renk değeri), rengin açıklık-koyuluk veya parlaklık derecesini tanımlar. Munsell renk uzayında value, akromatik dikey eksen boyunca siyah ile beyaz arasında değişmektedir; 0 siyahı, 10 ise beyazı temsil etmektedir (Della Bona et al., 2009; Hammad & Stein, 1991). Üç boyutlu modelde koyu renkler alt bölgelerde, açık

renkler ise üst bölgelerde konumlanmaktadır (Sproull, 2001; Tung et al., 2002).

Chroma (renk yoğunluğu) ise bir rengin doygunluğunu veya yoğunluğunu ifade etmektedir. Üç boyutlu renk uzayında merkezde bulunan akromatik eksenden dışa doğru uzaklaştıkça chroma artmakta ve renk daha doygun hale gelmektedir (Horn et al., 1998; Tung et al., 2002). VITA Classical renk skalasında chroma, harflerle belirtilen hue grupları içerisindeki rakamlarla ifade edilmektedir (Fondriest, 2003; Wee, 2006).

Munsell renklerinin üç boyutlu organizasyonu, 1915 yılında yayımlanan Munsell Renk Sistemi Atlasında bir renk ağacı modeliyle gösterilmiştir. Bu modelin merkezinde beyazdan siyaha uzanan akromatik value ekseni bulunurken, hue bu eksenin çevresinde, chroma ise merkezden perifere doğru artacak şekilde düzenlenmiştir. Böylece renklerin üç temel özelliğinin birbirleriyle ilişkisi üç boyutlu bir renk uzayı içerisinde sistematik olarak ifade edilebilmektedir (Wee, 2006).

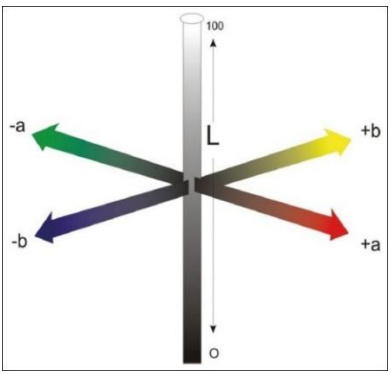
CIE L*a*b* Renk Sistemi

Renk ve görünümün standartlaştırılması amacıyla çalışmalar yürüten Uluslararası Aydınlatma Komisyonu (Commission Internationale de l'Éclairage, CIE), 1931 yılında standart gözlemci ve standart ışık kaynağı kavramlarını tanımlayarak renklerin nicel olarak ifade edilmesine yönelik temel kolorimetrik sistemi oluşturmuştur (McLaren, 1987). Bu sistemde renk algısı, insan görme sisteminin kırmızı, yeşil ve mavi bölgelere verdiği yanıtı temsil eden tristimulus değerleri (X, Y ve Z) aracılığıyla tanımlanmaktadır. CIE, 1976 yılında renk farklılıklarının insan görsel algısıyla daha uyumlu biçimde değerlendirilmesini sağlamak amacıyla üç boyutlu CIE L*a*b* renk uzayını tanımlamıştır (Joiner & Luo, 2017; McLaren, 1987).

CIE L*a*b* renk uzayında renkler L*, a* ve b* olmak üzere üç koordinat ile ifade edilmektedir. L* koordinatı rengin açıklık-koyuluk özelliğini belirtir ve 0 ile 100 arasında değişir; 0 siyahı, 100 ise beyazı temsil eder (Della Bona et al., 2009; Joiner, 2004; McLaren, 1987). Bu yönüyle L* koordinatı, Munsell renk sistemindeki value kavramına benzerlik göstermektedir (Joiner, 2004; Paravina & Powers, 2004).

a* ve b* koordinatları rengin kromatik özelliklerini tanımlamaktadır. Pozitif a* değerleri kırmızı, negatif a* değerleri yeşil yönündeki renk değişimini; pozitif b* değerleri sarı, negatif b* değerleri ise mavi yönündeki renk değişimini göstermektedir (Della Bona et al., 2009; McLaren, 1987). Beyaz ve gri gibi nötr renklerde a* ve b* değerleri sıfıra yaklaşırken, rengin doygunluğu arttıkça bu koordinatların mutlak değerleri de artmaktadır (Joiner, 2004; McLaren, 1987). Bununla birlikte a* ve b* koordinatları Munsell sistemindeki hue ve chroma kavramlarıyla doğrudan bire bir karşılık göstermemektedir (Seghi et al., 1986).

*Şekil 2. CIE L*a*b* renk koordinatlarının üç boyutlu gösterimi*



CIE L*a*b* sisteminin önemli avantajlarından biri, renklerin standart bir koordinat sistemi içerisinde tanımlanmasına ve iki renk arasındaki farklılığın sayısal olarak ifade edilmesine olanak sağlamasıdır (Karamouzos et al., 2007; O'Brien et al., 1997). Klasik

CIELAB sisteminde iki ölçüm arasındaki toplam renk farkı ΔE*ab değeri ile ifade edilmekte ve L*, a* ve b* koordinatlarındaki değişimlerden hesaplanmaktadır (CIE, 1986; Della Bona et al., 2009).

$$\Delta E = [(L1^* - L0^*)2 + (a1^* - a0^*)2 + (b1^* - b0^*)2]\ ½$$

Burada ΔL*, iki ölçüm arasındaki açıklık-koyuluk farkını; Δa*, kırmızı-yeşil eksenindeki değişimi; Δb* ise sarı-mavi eksenindeki değişimi ifade etmektedir (Hindle & Harrison, 2000; O'Brien et al., 1997). Bununla birlikte CIELAB renk uzayının tüm bölgelerinde algısal olarak tamamen homojen olmaması nedeniyle, insan gözünün renk farklılıklarına verdiği yanıtı daha iyi yansıtmak amacıyla CIEDE2000 (ΔE_{00}) renk farkı formülü geliştirilmiştir (Luo et al., 2001). CIEDE2000 renk farkı aşağıdaki formülle ifade edilmektedir:

$$\Delta E_{00} = \sqrt{\left(\frac{\Delta L'}{K_L S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C'}{K_C S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H'}{K_H S_H}\right)^2 + \mathrm{RT} \times \left(\frac{\Delta C'}{K_C S_C}\right) \times \left(\frac{\Delta H'}{K_H S_H}\right)}$$

Bu formülde ΔL′, ΔC′ ve ΔH′ sırasıyla açıklık, chroma ve hue farklılıklarını; S_l, S_c ve S_h ağırlıklandırma fonksiyonlarını; k_l, k_c ve k_h parametrik faktörleri; R_t ise hue ve chroma arasındaki etkileşimi dikkate alan rotasyon terimini ifade etmektedir (Luo et al., 2001). Günümüzde CIEDE2000 formülü, CIELAB tabanlı renk farklarının değerlendirilmesinde uluslararası standardizasyon kapsamında tanımlanmış olup diş hekimliği çalışmalarında da yaygın olarak kullanılmaktadır (Luo et al., 2001; Paravina et al., 2015).

Renk Seçiminde Kullanılan Yöntemler

Kolorimetre

Kolorimetreler, ışığın belirli dalga boylarındaki yoğunluğunu değerlendirerek renk ölçümü yapan cihazlardır (Anusavice, 2005). Kolorimetrelerde yansıyan ışık, insan gözündeki renk algısına benzer şekilde kırmızı, yeşil ve mavi bileşenlerine ayrılır ve standart

gözlemci ile standart aydınlatma koşulları esas alınarak değerlendirilir (Knispel, 1991). Ölçüm sonuçları genellikle CIE L*a*b* renk uzayında L*, a* ve b* koordinatları şeklinde doğrudan ifade edilmektedir (Seghi et al., 1989).

Filtreli kolorimetrelerde çoğunlukla spektral düzeltme filtreleri ile birlikte üç veya dört fotodiyot kullanılmaktadır. Bu filtreler, dedektöre ulaşan ışığın spektral özelliklerini sınırlandırarak renk bilgisinin elde edilmesini sağlar (Brewer et al., 2004). Kolorimetrelerin hızlı, kullanımı kolay ve tekrarlanabilir ölçümler sağlayabilmesi önemli avantajları arasındadır (Okubo et al., 1998; Samanta, 2024). Bununla birlikte filtrelerin zamanla özelliklerini kaybetmesi ve standart gözlemci fonksiyonlarıyla tam uyum göstermemesi ölçüm doğruluğunu olumsuz etkileyebilmektedir (Brewer et al., 2004; Samanta, 2024).

Diş ve restoratif materyallerin translüsensi, yüzey geometrisi ve ışık saçılımı gibi optik özellikleri de kolorimetrik ölçümlerde farklılıklara neden olabilmektedir. Özellikle yarı saydam materyallerde meydana gelen lateral ışık saçılması, ölçüm sonucunu etkileyebilen önemli faktörlerden biridir (Cho et al., 2007; Seghi et al., 1989). Bu nedenle kolorimetreler objektif ve tekrarlanabilir renk verileri sağlamakla birlikte, elde edilen sonuçların materyalin optik özellikleri ve ölçüm koşulları dikkate alınarak değerlendirilmesi gerekmektedir.

Spektrofotometre ve Spektroradyometre

Spektrofotometreler, görünür spektrum boyunca bir yüzeyden yansıyan ışık miktarını ölçerek spektral yansıma verisi elde eden renk ölçüm cihazlarıdır. Elde edilen veriler CIEXYZ, CIELAB veya CIELCH gibi renk koordinatlarına ve dental renk skalalarındaki karşılıklara dönüştürülebilmektedir. Bu cihazlarda sabit bir ışık kaynağı bulunmakta ve spektral ölçümler farklı dalga boylarında gerçekleştirilmektedir (Cal et al., 2006).

Spektrofotometrik yöntemlerin objektif ve tekrarlanabilir sonuçlar sağlaması nedeniyle doğal diş renginin belirlenmesi, restoratif materyallerin renk stabilitesinin incelenmesi ve diş beyazlatma çalışmalarında yaygın olarak kullanıldığı bildirilmektedir (Hugo et al., 2005; Raoufi & Birkhed, 2010).

Spektroradyometreler bir yüzeyden yayılan veya yansıyan ışığın spektral dağılımını ölçerek renk özelliklerinin sayısal olarak değerlendirilmesini sağlayan cihazlardır (Berns, 2019). Ölçüm sonucunda elde edilen spektral veriler renk koordinatlarına dönüştürülebilmekte ve çoğunlukla yüzeye temas etmeden ölçüm yapılabilmektedir. Diş hekimliği araştırmalarında doğal diş renginin, beyaz nokta lezyonlarının, mine yüzeyindeki değişimlerin ve diş beyazlığının değerlendirilmesinde spektroradyometrik yöntemlerden yararlanılmıştır (Luo et al., 2009). Temassız ölçüm yapabilmeleri önemli bir avantaj olmakla birlikte, cihaz maliyeti ve aydınlatma ile gözlem koşullarının dikkatli biçimde standardize edilmesi gerekliliği kullanımını sınırlayabilmektedir (Lim, Yu, & Lee, 2010; Lim, Yu, Lim, et al., 2010).

Görsel ve cihaz destekli renk seçimini karşılaştıran çalışmalarda spektrofotometre kullanımının doğru renk eşleştirme oranını artırdığı gösterilmiş; yapılan çalışmaların çoğunda spektrofotometrik yöntemin görsel değerlendirmeye göre daha hassas sonuçlar verdiği belirtilmiştir (Bahannan, 2014; Paul et al., 2002).

Dijital Kameralar

Dijital kameralar, diş hekimliğinde renk değerlendirmesi ve renk iletişimi amacıyla giderek daha fazla kullanılan temassız görüntüleme sistemleridir (Wee et al., 2006). Bu sistemlerde görüntü, her piksel için kırmızı, yeşil ve mavi (RGB) değerleri şeklinde kaydedilmektedir (Hunt, 2005). Tüm diş yüzeyinin tek bir görüntü üzerinden değerlendirilebilmesi, görüntülerin arşivlenerek

daha sonra yeniden analiz edilebilmesi ve temassız ölçüm yapılabilmesi dijital kameraların önemli avantajları arasındadır (Brook et al., 2007; Guan et al., 2005).

Kamera sensörlerinin spektral duyarlılığı CIE standart gözlemci fonksiyonlarıyla doğrudan örtüşmediğinden, kameradan elde edilen RGB değerlerinin CIE XYZ veya CIELAB gibi cihazdan bağımsız renk sistemlerine dönüştürülmesi gerekmektedir. Bu amaçla referans renklerin kullanıldığı kalibrasyon işlemleri ve matematiksel dönüşüm modellerinden yararlanılmaktadır (Powers & Sakaguch, 2006). Ölçüm doğruluğunun artırılabilmesi için kamera nesne mesafesi, aydınlatma koşulları ve kamera ayarlarının standardize edilmesi önemlidir; ayrıca yüzey yansımalarının azaltılmasında polarizasyon filtrelerinden yararlanılabilmektedir (Caglar et al., 2010).

Dijital görüntüleme yöntemlerinin, uygun kalibrasyon ve standart ölçüm koşulları sağlandığında diş renginin belirlenmesinde güvenilir ve objektif sonuçlar verebildiği bildirilmiştir. Bu yöntemler diş beyazlatma etkinliğinin değerlendirilmesi, yüzey lekelerinin izlenmesi ve renk uyumunun belirlenmesi gibi farklı klinik ve araştırma uygulamalarında kullanılmaktadır (Adeyemi et al., 2006; Peskersoy et al., 2014; Schropp, 2009). Ayrıca bazı sistemlerde dijital görüntüleme, kolorimetrik veya spektrofotometrik analizle birlikte kullanılarak renk değerlendirmesinin desteklenmesi amaçlanmaktadır (Cal et al., 2004).

Görsel Renk Seçimi ve Renk Skalaları

Görsel renk seçimi, hastanın doğal diş renginin standart bir renk skalasıyla karşılaştırılmasına dayanan ve klinik diş hekimliğinde yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir (Brook et al., 2007). Hızlı ve ekonomik olması önemli avantajları arasında yer almakla birlikte; aydınlatma koşulları, gözlemcinin yaşı ve deneyimi, göz yorgunluğu, renk görme farklılıkları ve çevresel

faktörler nedeniyle subjektif özellik gösterebilmektedir (Bahannan, 2014; Chen et al., 2012). Bununla birlikte uygun eğitim ve deneyimle görsel renk ayırt etme yeteneğinin geliştirilebildiği bildirilmiştir (Olms et al., 2013; Watts & Addy, 2001).

Görsel renk seçiminde doğal diş, standart renk örnekleri içeren ticari renk skalalarıyla karşılaştırılmaktadır. Yaygın olarak kullanılan sistemlerden biri VITA Classical renk skalasıdır. Bu sistemde renkler hue esas alınarak A, B, C ve D gruplarına ayrılmakta ve chroma farklılıkları rakamlarla ifade edilmektedir (Paravina & Powers, 2004). Bununla birlikte VITA Classical skalasının doğal diş renk uzayını tamamen ve homojen biçimde temsil edememesi ve komşu renk örnekleri arasındaki farkların eşit olmaması sistemin başlıca sınırlamaları arasındadır (Li, 2003).

Bu sınırlamaları azaltmak amacıyla geliştirilen VITA Toothguide 3D-Master, renklerin daha sistematik ve geniş bir renk uzayında dağılımını sağlamayı amaçlamaktadır (Gómez-Polo et al., 2015). Bu sistemde renk seçimi öncelikle value, ardından chroma ve hue değerlerinin belirlenmesi esasına dayanmaktadır. Renk örneklerinin açık renkten koyu renge doğru beş temel value grubunda düzenlenmesi, seçim sürecinin daha sistematik gerçekleştirilmesine olanak sağlamaktadır (Brewer et al., 2004).

Restoratif materyaller için kullanılan renk skalalarının, materyalin gerçek optik özelliklerini her zaman tam olarak yansıtamayabileceği de göz önünde bulundurulmalıdır. Özellikle kompozit rezinlerde translüsensi, opasite ve polimerizasyon sonrası renk değişimleri nedeniyle standart porselen renk skalalarıyla uyumsuzluk görülebilmektedir (Paolone et al., 2014). Bu nedenle klinik renk seçimini kolaylaştırmak amacıyla üreticiler, restoratif materyallerin renklerini yaygın olarak kullanılan VITA Lumin renk skalasıyla uyumlu hale getirmiştir. Böylece kompozit rezinlerde renk seçimi kolaylaşmakta, farklı renk skalalarına duyulan gereksinim

azalmakta ve uygulayıcılar arasındaki renk iletişimi daha standart hale gelmektedir.

Resim 1. GC'nin Gaenial kompozitler için hazırladığı renk skalası



Buton Tekniği

Kompozit rezinlerde renk seçiminde kullanılan yöntemlerden biri olan buton yöntemi, literatürde düşük hata oranı ile ilişkilendirilmesi nedeniyle klinik uygulamalarda yaygınlaşmıştır (Korkut, 2018; McLaren et al., 2017). Bu teknikte, kullanılacak kompozit sistemine ait olası renk seçeneklerinden küçük miktarlarda materyal, restore edilecek dişin sağlam yüzeyine veya komşu ya da simetrik diş üzerine ayrı örnekler halinde uygulanır. Diş yüzeyinde bölgesel renk farklılıklarının bulunması durumunda, bu alanlar için farklı kompozit örnekleri ayrı ayrı değerlendirilebilir.

Dentin ve body tonları genellikle dişin orta ya da servikal üçlüsünde, mine tonları ise insizal bölgede değerlendirilir. Mine kompozitinin bir bölümünün insizal kenarı aşacak şekilde yerleştirilmesi, materyalin translüsensi ve optik davranışının daha iyi gözlenmesine yardımcı olur. Kompozit örneklerinin yüzeyleri hafifçe düzleştirilerek yüzey düzensizliklerinden kaynaklanabilecek istenmeyen ışık yansımalarının azaltılması amaçlanır. Ardından örnekler ışıkla polimerize edilir; böylece kompozit rezinin polimerizasyon sonrasında meydana gelebilecek optik ve refraktif değişiklikleri renk değerlendirmesine yansıtılmış olur.

Son renk seçimi, polimerize edilmiş kompozit örneklerinin doğal diş dokusuyla klinik ortamda görsel olarak karşılaştırılmasıyla yapılabileceği gibi, profesyonel dental fotoğrafçılık ekipmanlarıyla elde edilen görüntüler üzerinden de gerçekleştirilebilir (Dietschi et al., 2006; Fahl Jr, 2011).

Resim 2. Orijinal fotoğrafta buton tekniği (a), Siyah beyaz fotoğrafta buton tekniği (b), Kontrastı artırılmış bir fotoğrafta buton tekniği (c)



Kaynak: Ozturk, E., Isikli, K., & Yalcin Cakir, F. (2025). Clinical comparison of different color selection methods with digital photographs using a button technique. Head Face Med, 21(1), 77. https://doi.org/10.1186/s13005-025-00510-z

Sonuç

Diş hekimliğinde doğru renk seçimi, estetik restorasyonların doğal diş dokularıyla uyumunun sağlanmasında temel öneme sahiptir. Görsel değerlendirme klinikte yaygın olarak kullanılmakla birlikte, gözlemciye ve çevresel koşullara bağlı değişkenlik gösterebilmektedir.

Kolorimetre, spektrofotometre, spektroradyometre ve dijital görüntüleme sistemleri renk değerlendirmesinin daha objektif ve tekrarlanabilir şekilde yapılmasına olanak sağlamaktadır. Bununla birlikte cihaz maliyeti, kalibrasyon ve ölçüm koşullarının standardizasyonu gibi sınırlılıklar göz önünde bulundurulmalıdır.

Bu nedenle görsel ve cihaz destekli yöntemlerin uygun koşullarda birlikte kullanılması, renk seçiminin doğruluğunu artırarak daha öngörülebilir estetik sonuçların elde edilmesine katkı sağlayabilir.

Kaynakça

Adeyemi, A. A., Jarad, F. D., Pender, N., & Higham, S. M. (2006). Comparison of quantitative light-induced fluorescence (QLF) and digital imaging applied for the detection and quantification of staining and stain removal on teeth. *J Dent*, *34*(7), 460-466. https://doi.org/10.1016/j.jdent.2005.10.006

Alkhatib, M. N., Holt, R., & Bedi, R. (2005). Age and perception of dental appearance and tooth colour. *Gerodontology*, *22*(1), 32-36. https://doi.org/10.1111/j.1741-2358.2004.00045.x

Anusavice, K. J. (2003). Physical properties of dental materials. *Phillips science of dental materials*, 52-53.

Bahannan, S. A. (2014). Shade matching quality among dental students using visual and instrumental methods. *J Dent*, *42*(1), 48-52. https://doi.org/10.1016/j.jdent.2013.11.001

Bayındır, F., & Wee, A. (2006). Diş rengi seçiminde bilgisayar destekli sistemlerin kullanımı. *Hacettepe Dişhekimliği Fakültesi Derg.(. Clinical Dentistry and Research)*, *30*(3).

Berns, R. S. (2019). *Billmeyer and Saltzman's principles of color technology*. John Wiley & Sons.

Brewer, J. D., Wee, A., & Seghi, R. (2004). Advances in color matching. *Dent Clin North Am*, *48*(2), v, 341-358. https://doi.org/10.1016/j.cden.2004.01.004

Brook, A. H., Smith, R. N., & Lath, D. J. (2007). The clinical measurement of tooth colour and stain. *Int Dent J*, *57*(5), 324-330. https://doi.org/10.1111/j.1875-595x.2007.tb00141.x

Caglar, A., Yamanel, K., Gulsahi, K., Bagis, B., & Ozcan, M. (2010). Could digital imaging be an alternative for digital colorimeters? *Clin Oral Investig*, *14*(6), 713-718. https://doi.org/10.1007/s00784-009-0329-6

Cal, E., Güneri, P., & Kose, T. (2006). Comparison of digital and spectrophotometric measurements of colour shade guides. *Journal of oral rehabilitation*, *33*(3), 221-228.

Cal, E., Sonugelen, M., Guneri, P., Kesercioglu, A., & Kose, T. (2004). Application of a digital technique in evaluating the reliability of shade guides. *J Oral Rehabil*, *31*(5), 483-491. https://doi.org/10.1111/j.1365-2842.2004.01197.x

Chen, H., Huang, J., Dong, X., Qian, J., He, J., Qu, X., & Lu, E. (2012). A systematic review of visual and instrumental measurements for tooth shade matching. *Quintessence Int*, *43*(8), 649-659. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/23034418

Cho, B.-H., Lim, Y.-K., & Lee, Y.-K. (2007). Comparison of the color of natural teeth measured by a colorimeter and Shade Vision System. *Dental Materials*, *23*(10), 1307-1312.

CIE. (1986). official recommendations of the International Commission on Illumination. *Publication CIE No. 15.2*.

Culpepper, W. D. (1970). A comparative study of shade-matching procedures. *J Prosthet Dent*, *24*(2), 166-173. https://doi.org/10.1016/0022-3913(70)90140-x

Della Bona, A., Barrett, A. A., Rosa, V., & Pinzetta, C. (2009). Visual and instrumental agreement in dental shade selection: three distinct observer populations and shade matching protocols. *Dent Mater*, *25*(2), 276-281. https://doi.org/10.1016/j.dental.2008.09.006

Dietschi, D., Ardu, S., & Krejci, I. (2006). A new shading concept based on natural tooth color applied to direct composite restorations. *Quintessence International (Berlin, Germany: 1985)*, *37*(2), 91-102.

Fahl Jr, N. (2011). Step-by-step approaches for anterior direct restorative challenges. *Journal of Cosmetic Dentistry-The OfficialJournal of the AACD*, *26*(4), 42.

Fondriest, J. (2003). Shade matching in restorative dentistry: the science and strategies. *Int J Periodontics Restorative Dent*, *23*(5), 467-479. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/14620121

Gomez-Polo, C., Portillo Munoz, M., Lorenzo Luengo, M. C., Vicente, P., Galindo, P., & Martin Casado, A. M. (2016). Comparison of the CIELab and CIEDE2000 color difference formulas. *J Prosthet Dent*, *115*(1), 65-70. https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2015.07.001

Gómez-Polo, C., Gómez-Polo, M., Martínez Vazquez De Parga, J. A., & Celemin-Viñuela, A. (2015). 3D Master Toothguide according to L*, C*, and h* coordinates. *Color Research & Application*, *40*(5), 518-524.

Guan, Y. H., Lath, D. L., Lilley, T. H., Willmot, D. R., Marlow, I., & Brook, A. H. (2005). The measurement of tooth whiteness by image analysis and spectrophotometry: a comparison. *J Oral Rehabil*, *32*(1), 7-15. https://doi.org/10.1111/j.1365-2842.2004.01340.x

Gürel, G. (2004). Porselen laminat venerler bilim ve sanatı. *Quintessence Yayıncılık Ltd. Şti*, 347-366.

Hammad, I. A., & Stein, R. S. (1991). A qualitative study for the bond and color of ceramometals. Part II. *The Journal of prosthetic dentistry*, *65*(2), 169-179.

Hindle, J. P., & Harrison, A. (2000). Tooth colour analysis by a new optoelectronic system. *Eur J Prosthodont Restor Dent*, *8*(2), 57-61. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/11307400

Horn, D. J., Bulan-Brady, J., & Hicks, M. L. (1998). Sphere spectrophotometer versus human evaluation of tooth shade. *J Endod*, *24*(12), 786-790. https://doi.org/10.1016/S0099-2399(98)80002-2

Hugo, B., Witzel, T., & Klaiber, B. (2005). Comparison of in vivo visual and computer-aided tooth shade determination. *Clin*

Oral Investig, *9*(4), 244-250. https://doi.org/10.1007/s00784-005-0014-3

Hunt, R. W. G. (2005). *The reproduction of colour*. John Wiley & Sons.

Joiner, A. (2004). Tooth colour: a review of the literature. *J Dent*, *32 Suppl 1*, 3-12. https://doi.org/10.1016/j.jdent.2003.10.013

Joiner, A., & Luo, W. (2017). Tooth colour and whiteness: A review. *J Dent*, *67S*, S3-S10. https://doi.org/10.1016/j.jdent.2017.09.006

Karamouzos, A., Papadopoulos, M., Kolokithas, G., & Athanasiou, A. (2007). Precision of in vivo spectrophotometric colour evaluation of natural teeth. *Journal of oral rehabilitation*, *34*(8), 613-621.

Knispel, G. (1991). Factors affecting the process of color matching restorative materials to natural teeth. *Quintessence Int*, *22*(7), 525-531. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/1882045

Korkut, B. (2018). Smile makeover with direct composite veneers: A two-year follow-up report. *Journal of dental research, dental clinics, dental prospects*, *12*(2), 146.

Li, Y. (2003). Tooth color measurement using Chroma Meter: techniques, advantages, and disadvantages. *J Esthet Restor Dent*, *15 Suppl 1*, S33-41. https://doi.org/10.1111/j.1708-8240.2003.tb00316.x

Lim, H. N., Yu, B., & Lee, Y. K. (2010). Spectroradiometric and spectrophotometric translucency of ceramic materials. *J Prosthet Dent*, *104*(4), 239-246. https://doi.org/10.1016/S0022-3913(10)60131-X

Lim, H. N., Yu, B., Lim, J. I., & Lee, Y. K. (2010). Correlations between spectroradiometric and spectrophotometric colors of all-ceramic materials. *Dent Mater*, *26*(11), 1052-1058. https://doi.org/10.1016/j.dental.2010.07.005

Luo, M. R., Cui, G., & Rigg, B. (2001). The development of the CIE 2000 colour-difference formula: CIEDE2000. *Color Research & Application: Endorsed by Inter-Society Color Council, The Colour Group (Great Britain), Canadian Society for Color, Color Science Association of Japan, Dutch Society for the Study of Color, The Swedish Colour Centre Foundation, Colour Society of Australia, Centre Français de la Couleur*, *26*(5), 340-350.

Luo, W., Westland, S., Ellwood, R., Pretty, I., & Cheung, V. (2009). Development of a whiteness index for dentistry. *J Dent*, *37 Suppl 1*, e21-26. https://doi.org/10.1016/j.jdent.2009.05.011

McLaren, E. A., Figueira, J., & Goldstein, R. E. (2017). A technique using calibrated photography and photoshop for accurate shade analysis and communication. *Compend Contin Educ Dent*, *38*(2), 106-113.

McLaren, K. (1987). Colour space, colour scales and colour difference. *Colour physics for industry. Huddersfield: H. Charlesworth & Co Ltd*, *1987*, 97-115.

McPhee, E. R. (1985). Extrinsic coloration of ceramometal restorations. *Dent Clin North Am*, *29*(4), 645-666. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/3908158

O'Brien, W. J., Hemmendinger, H., Boenke, K. M., Linger, J. B., & Groh, C. L. (1997). Color distribution of three regions of extracted human teeth. *Dent Mater*, *13*(3), 179-185. https://doi.org/10.1016/S0109-5641(97)80121-2

Okubo, S. R., Kanawati, A., Richards, M. W., & Childressd, S. (1998). Evaluation of visual and instrument shade matching. *The Journal of prosthetic dentistry*, *80*(6), 642-648.

Olms, C., Klinke, T., Pirek, P., & Hannak, W. B. (2013). Randomized multi-centre study on the effect of training on tooth shade matching. *J Dent*, *41*(12), 1259-1263. https://doi.org/10.1016/j.jdent.2013.09.002

Paolone, G., Orsini, G., Manauta, J., Devoto, W., & Putignano, A. (2014). Composite shade guides and color matching. *Int J Esthet Dent*, *9*(2), 164-182. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/24765625

Paravina, R., & Powers, J. (2004). Color, other appearance attributes. *Esthetic Color Training in Dentistry, 1st ed. China*, 3-47.

Paravina, R. D., Ghinea, R., Herrera, L. J., Bona, A. D., Igiel, C., Linninger, M., Sakai, M., Takahashi, H., Tashkandi, E., & Perez Mdel, M. (2015). Color difference thresholds in dentistry. *J Esthet Restor Dent*, *27 Suppl 1*, S1-9. https://doi.org/10.1111/jerd.12149

Paul, S., Peter, A., Pietrobon, N., & Hammerle, C. H. (2002). Visual and spectrophotometric shade analysis of human teeth. *J Dent Res*, *81*(8), 578-582. https://doi.org/10.1177/154405910208100815

Peskersoy, C., Tetik, A., Ozturk, V. O., & Gokay, N. (2014). Spectrophotometric and computerized evaluation of tooth bleaching employing 10 different home-bleaching procedures: In-vitro study. *Eur J Dent*, *8*(4), 538-545. https://doi.org/10.4103/1305-7456.143639

Powers, J. M., & Sakaguchi, R. L (2006). Craig's restorative dental materials. *Mechanical properties*, 51-96.

Raoufi, S., & Birkhed, D. (2010). Effect of whitening toothpastes on tooth staining using two different colour-measuring devices--a 12-week clinical trial. *Int Dent J*, *60*(6), 419-423. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/21302741

Samanta, A. K. (2024). Advanced methods and tools for color measuring and matching: for quality check of colored products of textiles and apparel industry. In *Advances in Colorimetry*. IntechOpen.

Schropp, L. (2009). Shade matching assisted by digital photography and computer software. *J Prosthodont*, *18*(3), 235-241. https://doi.org/10.1111/j.1532-849X.2008.00409.x

Seghi, R. R., Hewlett, E., & Kim, J. (1989). Visual and instrumental colorimetric assessments of small color differences on translucent dental porcelain. *Journal of dental research*, *68*(12), 1760-1764.

Seghi, R. R., Johnston, W. M., & O'Brien, W. J. (1986). Spectrophotometric analysis of color differences between porcelain systems. *J Prosthet Dent*, *56*(1), 35-40. https://doi.org/10.1016/0022-3913(86)90279-9

Sengez, G., & Dörter, C. (2019). Estetik diş hekimliğinde renk seçimi. *Selcuk Dental Journal*, *6*(2), 213-220.

Sikri, V. K. (2010). Color: Implications in dentistry. *J Conserv Dent*, *13*(4), 249-255. https://doi.org/10.4103/0972-0707.73381

Sproull, R. C. (2001). Color matching in dentistry. Part I. The three-dimensional nature of color. 1973. *J Prosthet Dent*, *86*(5), 453-457. https://doi.org/10.1067/mpr.2001.119827

Tung, F. F., Goldstein, G. R., Jang, S., & Hittelman, E. (2002). The repeatability of an intraoral dental colorimeter. *J Prosthet Dent*, *88*(6), 585-590. https://doi.org/10.1067/mpr.2002.129803

Watts, A., & Addy, M. (2001). Tooth discolouration and staining: a review of the literature. *British dental journal*, *190*(6), 309.

Wee, A. G. (2006). Description of color, color replication process and esthetics. *Contemporary fixed prosthodontics*, *4*, 712.

Wee, A. G., Lindsey, D. T., Kuo, S., & Johnston, W. M. (2006). Color accuracy of commercial digital cameras for use in dentistry. *Dental Materials*, *22*(6), 553-559.

BÖLÜM 10

ESTETİK RESTORATİF DİŞ HEKİMLİĞİNDE AKILLI MONOKROMATİK KOMPOZİTLER

Yeşim DEMİREL KARADUMAN[1]
Melike BİLCE [2]

Giriş

Estetik beklentilerin giderek arttığı günümüzde, diş hekimliği uygulamalarında doğal diş görünümünün taklit edilmesi ve hastaya en uygun restoratif tedavinin sunulması büyük önem taşımaktadır. (Cocking et al., 2009; Gómez-Polo, Martín-Casado, & Montero, 2023) Bu bağlamda restorasyonların doğal diş dokusu ile hem yapısal hem de optik açıdan uyum göstermesi, hastaların estetik tedavilere yönelik kabulü ve memnuniyeti açısından kritik bir faktör olarak değerlendirilmektedir. Rezin bazlı kompozitler, bu gereksinimleri karşılayabilmeleri nedeniyle restoratif diş hekimliğinde yaygın olarak tercih edilen materyaller arasında yer almaktadır.

[1] Uzm. Dt., Çorlu Ağız ve Diş Sağlığı Merkezi, yesimdemirel1417@gmail.com, 0009-0005-6981-7961
[2] Uzm. Dt., Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi, Restoratif Diş Tedavisi Anabilim Dalı, melikebilce@hotmail.com , 0009-0000-0015-5967

Restoratif materyallerin gelişimi ile, kompozit rezin restorasyonların doğal diş dokusu ile renk uyumu tedavi başarısının temel belirleyicilerinden biri haline gelmiştir. Kompozit rezinlerde renk uyumu; doldurucu oranı ve partikül boyutu, matriks bileşimi, tabakalama tekniği ve polimerizasyon koşulları gibi birçok faktörden etkilenmektedir.(Barutcigil et al., 2018) Bununla birlikte estetik bir restorasyon elde edebilmek için yalnızca renk tonunun değil, aynı zamanda translusensi, opalesans ve floresans gibi optik özelliklerin de doğal diş dokusuna benzer olması gerekmektedir. (Ismail & Paravina, 2022)

Doğal diş görünümünü taklit edebilmek amacıyla, farklı opasite ve renk tonlarına sahip kompozitlerin kullanıldığı çok katmanlı restorasyon teknikleri geliştirilmiştir ve bu tekniklerin başarılı estetik sonuçlar sağladığı bildirilmiştir.(Khashayar et al., 2014; Paravina, Westland, Imai, et al., 2006; Paravina, Westland, Kimura, et al., 2006) Ancak bu yaklaşım, doğru renk seçimi yapılmasını ve ileri düzey teknik beceri gerektirmekte olup klinik çalışma süresinin uzamasına ve tedavi maliyetinin artmasına neden olabilmektedir.(Mikhail, Azer, & Johnston, 2012) Bu nedenle son yıllarda tedavi karmaşıklığını azaltmaya, teknik hassasiyeti düşürmeye ve klinik verimliliği artırmaya yönelik materyal geliştirme çalışmaları ön plana çıkmıştır.

Bu doğrultuda geliştirilen akıllı monokromatik kompozit rezinler, tüm VITA Classical renk skalası ile uyum sağlayabilme potansiyeline sahip çevre diş dokusunun rengini optik olarak taklit edebilen yenilikçi materyaller olarak dikkat çekmektedir. Son yıllarda yapılan çalışmalar, monokromatik kompozitlerin renk seçimi sürecini basitleştirerek klinik uygulamalarda verimliliği artırmakta ve daha estetik sonuçların elde edilmesine katkı sağladığını ortaya koymaktadır. (Kobayashi et al., 2021; Lucena et al., 2021) Bu özellikleri sayesinde söz konusu materyaller, estetik

restoratif diş hekimliğinde geleneksel kompozit sistemlere alternatif olarak dikkat çekmektedir.

Akıllı Monokromatik Kompozit

Akıllı monokromatik kompozitler, son yıllarda estetik restoratif diş hekimliğinde renk uyumu sağlayabilen materyaller arasında giderek daha fazla kabul gören kompozit rezinlerdir. Bu materyaller, "akıllı kromatik teknoloji" olarak adlandırılan özgün bir optik prensibe dayanmaktadır. Bu teknoloji sayesinde materyal, çevresindeki diş dokusunun yapısal rengini algılayarak restorasyonun doğal diş dokusu ile uyumlu bir görünüm sergilemesini sağlayabilmektedir. Bu özellik, büyük ölçüde materyalin içerdiği doldurucu partiküllerin boyutu ile ilişkilidir ve söz konusu partiküller çevredeki diş dokusunun yapısal rengini taklit edebilme kapasitesine sahiptir.(Eliezer et al., 2020)

Akıllı monokromatik kompozitlerde geleneksel kompozit rezinlerden farklı olarak ilave boya veya pigment bulunmamaktadır. Bunun yerine materyalin içerdiği homojen boyutta ve küresel şekilli doldurucu partiküller, ışığın saçılması sonucu kırmızıdan sarıya uzanan yapısal bir renk (structural color) oluşturmakta ve bu sayede çevredeki diş dokusunun rengi ile uyum sağlayabilmektedir. Renk, gözümüze ulaşan ışığın farklı dalga boylarının algılanması ile oluşmaktadır ve doğal diş dokusu genel olarak kırmızı–sarı renk aralığında yer almaktadır. (Eliezer et al., 2020)

Akıllı monokromatik kompozitler tek renkli (single-shade) materyaller olarak geliştirilmiş olup üretici firmaların verilerine göre VITA Classical renk skalasında yer alan 16 farklı diş rengi ile uyum sağlayabilme potansiyeline sahiptir (VITA North America, Yorba Linda, CA). Bununla birlikte bazı sistemlerde translusensinin yüksek olduğu restorasyonlarda dentin rengini temsil etmek amacıyla "Bloker" olarak adlandırılan daha opak bir materyal de

sunulmaktadır. Bu opak materyal özellikle Sınıf IV restorasyonlar gibi translusent alanların bulunduğu durumlarda dentin rengini taklit ederek daha doğal bir estetik sonuç elde edilmesine katkı sağlamaktadır.(Ahmed, Jouhar, & Khurshid, 2022)

Akıllı monokromatik kompozitlerin önemli özelliklerinden biri de klinisyenlerin çok sayıda renk tonu arasında seçim yapmak zorunda kalmasını ortadan kaldırmasıdır. Bu materyaller, estetik ve fonksiyonel restorasyonların daha hızlı ve kolay bir şekilde uygulanmasına olanak tanımaktadır. Ayrıca renk seçimi gereksinimini ortadan kaldırması sayesinde klinik uygulamalarda zaman tasarrufu sağlayabileceği bildirilmektedir. (Eliezer et al., 2020)

Akıllı monokromatik kompozitlerin başlıca özellikleri arasında iyi cilalanabilirlik, yüksek eğilme ve basma dayanımı, kolay manipülasyon ve klinik olarak tatmin edici sonuçlar elde edilmesi sayılabilir. Ayrıca bu materyallerin ortam ışığına karşı dirençli olduğu, kompozit materyalde ve karşıt diş dokusunda minimal aşınma oluşturduğu bildirilmektedir. Akıllı monokromatik kompozitler, klinisyenlerin materyali uygulama sırasında daha kolay görebilmesine olanak tanıyan opak beyaz bir pasta formunda sunulmaktadır. Polimerizasyon öncesinde materyalin çevre diş dokusu ile optik olarak uyum sağlayabildiği ve daha iyi bir marjinal uyum elde edebilmek amacıyla chamfer şeklinde bir kavite sınırının tercih edilmesinin önerildiği bildirilmektedir.(Christensen, 2019)

Posterior dişlerde gerçekleştirilen Sınıf I ve Sınıf II restorasyonlarda, tek bir renk tonu kullanılması genellikle yeterli olmaktadır. Bununla birlikte anterior bölgede yer alan geniş Sınıf III ve Sınıf IV restorasyonlarda, akıllı monokromatik kompozit uygulanmadan önce yaklaşık 0,5 mm kalınlığında ince bir bloklayıcı ajan (bloker) tabakası uygulanabilmektedir. Özellikle diş

renklenmelerinin bulunduğu durumlarda bu materyal kronun iç kısmındaki renk farklılıklarını maskeleyerek daha estetik bir sonuç elde edilmesine katkı sağlamaktadır. Ayrıca bloker kullanımı, renk uyumunu olumsuz etkileyebilecek faktörlerin azaltılmasına da yardımcı olabilmektedir. (Eliezer et al., 2020)

Günümüzde farklı üretici firmalar tarafından geliştirilen çeşitli akıllı monokromatik kompozit sistemleri piyasada bulunmaktadır ve bu materyallerin özellikleri literatürde giderek daha fazla araştırma konusu olmaktadır. Mevcut piyasada bulunan başlıca akıllı monokromatik kompozit materyaller Tablo 1'de özetlenmiştir.

Tablo 1. Piyasada bulunan başlıca akıllı monokromatik kompozit sistemleri (Ercan, Çevikel, & Türkün, 2026; Fidan & Yağci, 2023; Yılmaz, Çinkılıç, & Çinkılıç, 2025)

Kompozit Materyal	**Üretici Firma**	**Ülke**	**Kompozit Tipi**
Omnichroma	Tokuyama Dental	Japonya	Supra-nano küresel dolduruculu kompozit
Vittra APS Unique	FGM Dental	Brezilya	Nano-hibrit kompozit
Zenchroma	President Dental	Almanya	Mikro-hibrit kompozit
Essentia Universal	GC Corporation	Japonya	Mikro-hibrit kompozit
Clearfil Majesty ES-2 Universal	Kuraray Noritake	Japonya	Nano-hibrit kompozit
Charisma Diamond One	Kulzer	Almanya	Nano-hibrit kompozit

Renk Uyum Yeteneği

Anterior dişlerde uygulanan kompozit restorasyonlarda materyalin diş rengi ile uyumlu hale getirilmesi, diş hekimlerinin klinik uygulamalar sırasında sıklıkla karşılaştığı zorlu bir durumdur. Diş renginin oluşumunda altta bulunan dentin dokusunun rengi önemli bir rol oynamaktadır ve bu durum restoratif materyallerin renk uyumunu doğrudan etkileyebilmektedir.(Eimar et al., 2011) Diş hekimliğinde renk eşleştirme sürecini zorlaştıran birçok faktör bulunmaktadır. Kompozit rezinler ile doğal diş dokusu arasındaki renk uyumu; hue (ton), chroma (doygunluk) ve value (parlaklık) gibi kromatik özelliklerin yanı sıra opalesans, translusensi ve floresans, ışığın difüzyonu ve iletimi ile yüzey dokusu gibi çeşitli optik özelliklerden etkilenmektedir.(Arimoto et al., 2010; Lee, 2008) Bu nedenle restoratif materyallerin ideal estetik sonuçlar sağlayabilmesi için yalnızca renk açısından değil, aynı zamanda doğal diş dokusunun tüm kromatik ve optik özelliklerini taklit edebilmesi ve uzun dönem renk stabilitesine sahip olması gerekmektedir.(Yamaguchi et al., 2021)

Son yıllarda kompozit rezin restoratif materyallerin estetik özelliklerini geliştirmek amacıyla çeşitli modifikasyonlar yapılmıştır. Günümüzde geliştirilen tek renkli yapısal renkli universal kompozitler, birçok klinik durumda doğrudan uygulanabilmektedir. Bu materyaller, komşu diş dokusuna bağlı olarak renk değiştirebilme yeteneğine sahip olup restorasyonun estetik görünümünü iyileştirebilmekte ve çok sayıda renk seçimi yöntemine olan gereksinimi azaltabilmektedir.(Kim & Lee, 2009) Ayrıca geleneksel renk belirleme yöntemlerinde kullanılan shade guide sistemlerine olan bağımlılığı da azaltabildiği bildirilmektedir.(Morsy, Gamal, & Riad, 2020; Pereira Sanchez, Powers, & Paravina, 2019) Yapılan çalışmalar, akıllı monokromatik kompozitlerin yapısında pigment veya boya bulunmadığını ve

materyalin renk özelliklerinin tamamen ışığın fiziksel özelliklerine bağlı olduğunu göstermiştir. Bu nedenle bu materyallerin farklı diş renkleri ile yüksek düzeyde renk uyumu sağlayabildiği bildirilmektedir.(Kevin, 2019; Mohamed et al., 2020)

Optik Özellikleri

Kompozit rezinler restoratif diş hekimliğinde yaygın olarak kullanılan materyaller arasında yer almaktadır. Kompozit materyalin diş dokusu ve komşu dentisyon ile optik ve yapısal uyum göstermesi, hastaların estetik restorasyonlara yönelik memnuniyeti ve kabulü açısından önemli bir faktördür. Doğal diş görünümünü taklit edebilmek amacıyla farklı opasite ve renk özelliklerine sahip rezin bazlı kompozitlerin kullanıldığı çok katmanlı restorasyon teknikleri geliştirilmiştir.(García-Godoy, 2000) Bu tekniklerde farklı opasite ve renk özelliklerine sahip kompozitlerin birlikte kullanılmasıyla doğal diş dokusunun fiziksel görünümünün taklit edilmesi amaçlanmaktadır.(Ardu & Krejci, 2006; Dietschi & Fahl Jr, 2016)

Bununla birlikte çok katmanlı restorasyon teknikleri doğru renk seçiminin yapılmasını ve ileri düzey teknik beceri gerektirmekte olup çoğu zaman klinik çalışma süresinin uzamasına ve tedavi maliyetinin artmasına neden olabilmektedir.(Iyer et al., 2021) Bu nedenle tedavi sürecini basitleştirmek ve klinik verimliliği artırmak amacıyla restoratif materyallerde “chameleon effect” veya “blending effect” olarak tanımlanan optik bir fenomen ortaya konmuştur. Bu kavram, restoratif materyalin komşu diş dokusunun rengini taklit edebilme ve çevredeki diş dokusu ile optik olarak bütünleşebilme yeteneğini ifade etmektedir. (Vattanaseangsiri et al., 2022) Bu etki sayesinde restorasyon ile doğal diş dokusu arasındaki sınır daha az fark edilir hale gelmektedir.(Paravina & Powers, 2004) Tek renkli kompozit sistemlerde bu etki çoğunlukla nano veya supra-nano boyuttaki küresel doldurucu partiküllerin oluşturduğu yapısal

renk mekanizması ile açıklanmaktadır. Bu partiküller ışığın belirli dalga boylarında saçılmasına neden olarak kırmızıdan sarıya uzanan renk spektrumunda yapısal bir renk oluşturmakta ve materyalin çevredeki diş dokusunun rengi ile uyum sağlamasına katkıda bulunmaktadır. (AlHamdan et al., 2021; Kobayashi et al., 2021)

Monokromatik kompozitlerin estetik başarısında önemli rol oynayan kavramlardan biri de color adjustment potential (CAP) olarak tanımlanmaktadır. CAP, restoratif materyalin çevresindeki diş dokusunun rengini algılayarak bu renge uyum sağlayabilme kapasitesini ifade etmektedir. Bu özellik sayesinde restoratif materyal ile komşu diş dokusu arasında daha doğal bir renk geçişi sağlanabilmekte ve restorasyonun estetik bütünlüğü artırılabilmektedir. (Ismail & Paravina, 2022) (Kobayashi et al., 2021) CAP mekanizması büyük ölçüde materyalin translusensi düzeyi, ışık saçılma özellikleri ve doldurucu partiküllerin boyutu ile ilişkilidir. Translusent özellikteki materyaller çevre diş dokusundan yansıyan ışığın restorasyon içerisinden geçmesine olanak tanıyarak restorasyon ile doğal diş dokusu arasında daha uyumlu bir renk görünümü oluşturabilmektedir.(Lucena et al., 2021)

Sonuç

Estetik restoratif diş hekimliğinde restorasyonların doğal diş dokusu ile uyumlu bir görünüm sergilemesi, tedavinin başarısı ve hasta memnuniyeti açısından önemli bir kriterdir. Kompozit rezin materyallerin optik özellikleri; translusensi, opalesans, floresans, yüzey dokusu ve renk stabilitesi gibi birçok faktörden etkilenmekte olup bu özelliklerin doğal diş dokusuna benzer olması estetik restorasyonların başarısını doğrudan etkilemektedir. Geleneksel kompozit sistemlerde estetik sonuç elde edebilmek için farklı opasite ve renk tonlarının kullanıldığı çok katmanlı uygulama teknikleri

tercih edilmekteydi. Ancak bu teknikler doğru renk seçimi, ileri klinik beceri ve daha uzun çalışma süresi gerektirebilmektedir.

Son yıllarda geliştirilen akıllı monokromatik kompozitler, tek renkli yapıları ve gelişmiş optik özellikleri sayesinde estetik restoratif uygulamalarda önemli bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. Bu materyaller, structural color, color adjustment potential (CAP) ve blending effect gibi optik mekanizmalar sayesinde çevre diş dokusu ile uyum sağlayabilmekte ve renk seçimi sürecini kolaylaştırarak klinik uygulamaları daha pratik hale getirebilmektedir. Bununla birlikte restorasyon kalınlığı, arka plan rengi ve materyalin mekanik özellikleri gibi faktörler estetik sonuçları ve materyalin uzun dönem klinik performansını etkileyebilmektedir. Bu nedenle akıllı monokromatik kompozitlerin klinik kullanımında materyalin optik ve mekanik özelliklerinin yanı sıra restorasyonun boyutu ve klinik endikasyonunun da dikkatle değerlendirilmesi önem taşımaktadır. Gelecekte yapılacak klinik ve laboratuvar çalışmalarının, akıllı monokromatik kompozitlerin uzun dönem klinik performansını ve estetik başarısını daha kapsamlı şekilde ortaya koyması beklenmektedir.

Anahtar Kelimeler: Akıllı monokromatik kompozitler, tek renkli kompozit rezinler, blending effect, estetik restoratif diş hekimliği, renk uyumu

Kaynakça

Ahmed, M. A., Jouhar, R., & Khurshid, Z. (2022). Smart monochromatic composite: a literature review. *International journal of dentistry*, *2022*(1), 2445394.

AlHamdan, E. M., Bashiri, A., Alnashmi, F., Al-Saleh, S., Al-Shahrani, K., Al-Shahrani, S., Alsharani, A., Alzahrani, K. M., Alqarawi, F. K., & Vohra, F. (2021). Evaluation of smart chromatic technology for a single-shade dental polymer resin: an in vitro study. *Applied Sciences*, *11*(21), 10108.

Ardu, S., & Krejci, I. (2006). Biomimetic direct composite stratification technique for the restoration of anterior teeth. *Quintessence international*, *37*(3).

Arimoto, A., Nakajima, M., Hosaka, K., Nishimura, K., Ikeda, M., Foxton, R. M., & Tagami, J. (2010). Translucency, opalescence and light transmission characteristics of light-cured resin composites. *Dental materials*, *26*(11), 1090-1097.

Barutcigil, Ç., Barutcigil, K., Özarslan, M. M., Dündar, A., & Yilmaz, B. (2018). Color of bulk-fill composite resin restorative materials. *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry*, *30*(2), E3-E8.

Christensen, G. (2019). New, innovative restorative resins appear promising. *Clinical Reports*, *12*(4), 1-3.

Cocking, C., Cevirgen, E., Helling, S., Oswald, M., Corcodel, N., Rammelsberg, P., Reinelt, G., & Hassel, A. (2009). Colour compatibility between teeth and dental shade guides in Quinquagenarians and Septuagenarians. *Journal of oral rehabilitation*, *36*(11), 848-855.

Dietschi, D., & Fahl Jr, N. (2016). Shading concepts and layering techniques to master direct anterior composite restorations: an update. *British dental journal*, *221*(12), 765-771.

Eimar, H., Marelli, B., Nazhat, S. N., Abi Nader, S., Amin, W. M., Torres, J., de Albuquerque Jr, R. F., & Tamimi, F. (2011). The role of enamel crystallography on tooth shade. *Journal of dentistry*, *39*, e3-e10.

Eliezer, R., Devendra, C., Ravi, N., Tangutoori, T., & Yesh, S. (2020). Omnichroma: one composite to rule them all. *Int J Med Sci*, *7*(06), 6-8.

Ercan, E., Çevikel, Ç., & Türkün, M. (2026). Color Matching Ability of Four Different Monochromatic Universal Resin Composites: A Spectrophotometric Analysis. *Journal of Dental Insight*, *1*(1), 48-57.

Fidan, M., & Yağci, Ö. (2023). Do universal adhesive systems affect color coordinates and color change of single-shade resin composites compared with a multi-shade composite? *Dental materials journal*, *42*(6), 886-893.

García-Godoy, F. (2000). Resin-based composites and compomers in primary molars. *Dental Clinics of North America*, *44*(3), 541-570.

Gómez-Polo, C., Martín-Casado, A. M., & Montero, J. (2023). Fifteen ceramic gingival samples: A proposed gingival shade guide. *Journal of dentistry*, *138*, 104648.

Ismail, E. H., & Paravina, R. D. (2022). Color adjustment potential of resin composites: Optical illusion or physical reality, a comprehensive overview. *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry*, *34*(1), 42-54.

Iyer, R. S., Babani, V. R., Yaman, P., & Dennison, J. (2021). Color match using instrumental and visual methods for single, group, and multi-shade composite resins. *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry*, *33*(2), 394-400.

Joiner, A. (2004). Tooth colour: a review of the literature. *Journal of dentistry*, *32*, 3-12.

Kevin, B. (2019). How to match any composite restoration shade: tokuyama's omnichroma uses smart chromatic technology to match a wider range of natural teeth colors. *Dental Products Report*, *53*(3), 36-37.

Khashayar, G., Dozic, A., Kleverlaan, C., Feilzer, A., & Roeters, J. (2014). The influence of varying layer thicknesses on the color predictability of two different composite layering concepts. *Dental materials*, *30*(5), 493-498.

Kim, B.-J., & Lee, Y.-K. (2009). Influence of the shade designation on the color difference between the same shade-designated resin composites by the brand. *Dental materials*, *25*(9), 1148-1154.

Kobayashi, S., Nakajima, M., Furusawa, K., Tichy, A., Hosaka, K., & Tagami, J. (2021). Color adjustment potential of single-shade resin composite to various-shade human teeth: Effect of structural color phenomenon. *Dental materials journal*, *40*(4), 1033-1040.

Lee, Y.-K. (2008). Influence of filler on the difference between the transmitted and reflected colors of experimental resin composites. *Dental materials*, *24*(9), 1243-1247.

Lucena, C., Ruiz-López, J., Pulgar, R., Della Bona, A., & Pérez, M. M. (2021). Optical behavior of one-shaded resin-based composites. *Dental materials*, *37*(5), 840-848.

Mikhail, S. S., Azer, S. S., & Johnston, W. M. (2012). Accuracy of Kubelka–Munk reflectance theory for dental resin composite material. *Dental materials*, *28*(7), 729-735.

Mohamed, M., Afutu, R., Tran, D., Dunn, K., Ghanem, J., Perry, R., & Kugel, G. (2020). Shade-matching capacity of omnichroma in anterior restorations. *J Dent Sci*, *5*(2), 000247.

Morsy, A. S., Gamal, W. M., & Riad, M. (2020). Color matching of a single shade structurally colored universal resin composite with the surrounding hard dental tissues. *Egyptian Dental Journal*, *66*(4-October (Conservative Dentistry and Endodontics)), 2721-2727.

Paravina, R. D., & Powers, J. M. (2004). Esthetic color training in dentistry. *(No Title)*.

Paravina, R. D., Westland, S., Imai, F. H., Kimura, M., & Powers, J. M. (2006). Evaluation of blending effect of composites related to restoration size. *Dental materials*, *22*(4), 299-307.

Paravina, R. D., Westland, S., Kimura, M., Powers, J. M., & Imai, F. H. (2006). Color interaction of dental materials: blending effect of layered composites. *Dental materials*, *22*(10), 903-908.

Pereira Sanchez, N., Powers, J. M., & Paravina, R. D. (2019). Instrumental and visual evaluation of the color adjustment potential of resin composites. *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry*, *31*(5), 465-470.

Vattanaseangsiri, T., Khawpongampai, A., Sittipholvanichkul, P., Jittapiromsak, N., Posritong, S., & Wayakanon, K. (2022). Influence of restorative material translucency on the chameleon effect. *Scientific Reports*, *12*(1), 8871.

Yamaguchi, S., Karaer, O., Lee, C., Sakai, T., & Imazato, S. (2021). Color matching ability of resin composites incorporating supra-nano spherical filler producing structural color. *Dental materials*, *37*(5), e269-e275.

Yılmaz, F., Çinkılıç, M. T., & Çinkılıç, M. E. (2025). Evaluation of color matching of single-shade resin composites with different background shades: an in vitro study. *Scientific Reports*, *15*(1), 38163.

BÖLÜM 11

LAMİNATE VENEERLERDE PREPARASYON TEKNİKLERİ

Nilgün AKGÜL[1]
Melis ALTUN[2]

Giriş

Laminate veneer restorasyonlar, minimal invaziv tedavi anlayışının gelişmesiyle anterior bölgedeki estetik rehabilitasyonlarda önemli bir seçenek haline gelmiştir (Yilmaz et al., 2026). Anterior restorasyonların planlanması; estetik beklentilerin, diş dokusunun korunmasının, adeziv bağlantının, materyalin mekanik ve optik özelliklerinin ve oklüzal koşulların birlikte değerlendirilmesini gerektirir (Edelhoff & Sorensen, 2002).

Laminate veneer uygulamaları, materyal ve adeziv sistemlerdeki ilerlemelerle hız kazanmış ve endikasyonları ile klinik uygulama olanakları genişlemiştir (Calamia, 1983). Günümüzde özellikle seramik laminate veneerler, konservatif diş preparasyonu

[1] Prof. Dr., Pamukkale Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi, Restoratif Diş Tedavisi Anabilim Dalı, Denizli/Türkiye, Orcid: 0000-0002-6732-0485, nakgul@pau.edu.tr
[2] Arş. Gör., Pamukkale Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi, Restoratif Diş Tedavisi Anabilim Dalı, Denizli/Türkiye, Orcid: 0009-0007-1735-7523, maltun@pau.edu.tr

ile yüksek estetik beklentilerin karşılanabilmesi nedeniyle yaygın olarak tercih edilmektedirler (Edelhoff & Sorensen, 2002; Komine et al., 2024).

Bu kitap bölümünde laminate veneerlerde kullanılan başlıca materyaller, endikasyon ve kontrendikasyonlar, preparasyonun biyolojik ve biyomekanik temelleri, fasiyal, insizal, proksimal ve gingival preparasyon tasarımları ile preparasyonun kontrolünde kullanılan geleneksel ve dijital yardımcılar güncel literatür doğrultusunda ele alınmaktadır. Ayrıca preparasyon tasarımının marjinal uyum ve klinik sağkalım üzerindeki etkileri ile vaka bazlı klinik karar verme ilkeleri tartışılmaktadır.

Laminate Veneerlerin Üretiminde Kullanılan Materyaller

Laminate veneerler, üretim yöntemine göre direkt ve indirekt olarak sınıflandırılabilirler (Fahl Júnior, 1996). Direkt veneerlerde çoğunlukla kompozit rezinler kullanılırken, indirekt veneerlerde farklı seramik sistemlerin yanı sıra indirekt kompozit sistemlerden de yararlanılmaktadır (Fahl Júnior, 1996; Peumans et al., 2000).

İndirekt laminate veneerlerin üretiminde feldspatik seramikler, lösit ile güçlendirilmiş cam seramikler, lityum disilikat, CAD/CAM yöntemi ile üretilen seramikler, kompozit rezinler, rezin-matriks seramikler gibi farklı materyal seçenekleri bulunmaktadır (Bonfante et al., 2023; Erkun et al., 2016; McLaren & Whiteman, 2010).

Feldspatik porselenler ve lösit takviyeli cam seramikler, doğal dişin renk ve translusensisini taklit ederek üstün estetik özellikler sergilerken, düşük mekanik özelliklere sahip olması en büyük dezavantajıdır (Bonfante et al., 2023; Klein et al., 2025).

Lityum disilikat ile üretilen laminate veneerlerde mekanik özellikler feldspatik porselenlere göre çok daha üstündür ve estetik olarak da avantajlıdır (Zhang et al., 2023).

Materyal üretiminde gelişen teknoloji ve oldukça translusent üretilebilmesi sayesinde zirkonya ve türevleri de laminate veneerlerde uygun bir alternatif haline gelmiştir (Zhang & Lawn, 2018).

Direkt kompozit veneerler, seramik restorasyonlara kıyasla daha kolay tamir edilebilme, daha düşük maliyet ve antagonist dişlerde aşınmaya neden olmama gibi avantajlar sunmakla birlikte, uzun dönem renk stabilitesini koruyamaması, yüzey özellikleri ve aşınma dirençlerinin düşük olması açısından dezavantajlara sahip olabilir (Mangani et al., 2007; Wakiaga et al., 2004). İşlemler tek seansta bitirilebilir ve anesteziye gerek duyulmaz (Cangül & Bakır, 2017).

İndirekt kompozit laminate veneerlerin endikasyonları seramik veneerlerin endikasyonlarına büyük ölçüde benzemektedir. İndirekt kompozit laminate veneerlerde, ağız dışında gerçekleştirilen bitim ve polisaj işlemleri, direkt kompozit veneerlerde elde edilen yüzey özelliklerine kıyasla daha kontrollü bir sonuç sağlayabilmektedir (Gomes & Perdigão, 2014; Mangani et al., 2007). Ancak hazırlanırken laboratuvar işlemleri gerektirir ve ilave klinik seanslara ihtiyaç duyulur (Düzyol et al., 2017). Polimerizasyonun ağız dışında tamamlanması nedeniyle simantasyon sırasında oluşan polimerizasyon stresleri daha etkin şekilde absorbe edilebilir (Mangani et al., 2007).

Materyal seçimi; istenen estetik özellikler, restorasyon kalınlığı, diş renginin maskelenme gereksinimi ve mekanik yüklenme gibi faktörlere göre yapılabilmektedir.

Laminate Veneerlerin Endikasyon ve Kontraendikasyonları

Laminate veneerler; tetrasiklin renklenmeleri ve florozisten kaynaklanan bozukluklar, hafif-orta dereceli renk değişiklikleri, diş şekil ve boyut düzensizlikleri, diastemalar, lokalize kırık veya

aşınmalar ve bazı minimal malpozisyonların estetik olarak düzeltilmesinde tercih edilebilir (Strassler, 2007).

Nadir olgularda Class 2 ve Class 3 gibi maloklüzyonlar veya minimal çapraşıklıkların estetik rehabilitasyonunda laminate veneerler kullanılabilse de, restorasyonun fonksiyonel yüklenmesi ve yeterli materyal alanı ayrıntılı olarak değerlendirilmelidir (Tosun & Yanıkoğlu, 2020).

Laminate veneer için kontrendikasyonlar; yaygın çürük aktivitesi, yetersiz koronal diş dokusu, geniş veya başarısız restorasyonlar, kontrolsüz periodontal hastalık ve yetersiz ağız hijyeni gibi durumları içerir (Tantak, 2026). Mine dokusunun yetersiz olduğu ve restorasyonun büyük ölçüde dentine bağlanmasının gerekeceği olgularda uzun dönem adeziv başarı daha az öngörülebilirdir (Alqutaibi et al., 2024). Bruksizm ve diğer parafonksiyonlar, derin overbite, yetersiz overjet, başa baş kapanış ve yetersiz interoklüzal mesafe gibi durumlarda kırık ve debonding riski artabileceğinden oklüzal değerlendirme tedavi planının ayrılmaz bir parçası olmalıdır (Mitthra et al., 2020; Tantak, 2026).

Temel Preparasyon Prensipleri

Laminate veneerlerin uzun dönem başarısında mine dokusunun korunması temel preparasyon prensiplerinden biridir (Öztürk et al., 2013). Preparasyon sırasında dentin ekspozunun artması, özellikle geniş alanlarda, klinik sağkalımı olumsuz etkileyebilmektedir (Etienne et al., 2025). Bazı yazarlar, preparasyonun mümkün olduğunca en iyi adezyon ve en iyi stres dağılımının mine-kompozit-porselen üçlüsünde olduğunu belirtmişlerdir (Pini et al., 2012). Dentin ekspozunun kaçınılmaz olduğu geniş alanlarda ise restoratif materyalin hidroflorik asit kullanılarak yüzey asitlenmesini takiben silanizasyonu ile seramik–rezin siman arasındaki adeziv bağlantının optimize edilmesi ve gerektiğinde immediat dentin sealing gibi yaklaşımlar

değerlendirilmelidir (Gresnigt et al., 2019; Kalavacharla et al., 2015). Yapılan prospektif bir çalışmaya göre, diş preparasyonunu takiben mevcut dentinin %50'sinden fazlasının açığa çıktığı durumlarda immediat şekilde dentin bonding ajan kullanılarak yapılan bir dentin sealing prosedürünün laminate veneerlerin sağkalım oranını anlamlı düzeyde arttırdığı gözlemlenmiştir (Gresnigt et al., 2019). Laminate veneer preparasyonlarda dentin ekspozu ile karşılaşılan durumlarda, silika esaslı seramik veneerlerin hidroflorik asit ile yüzey işlemini takiben silanizasyonu, seramik–rezin siman arasındaki adeziv bağlantının optimize edilmesinde önemli bir rol oynar (Kalavacharla et al., 2015).

2025 tarihli bir sistematik derleme ve meta-analizde mineye bağlanan seramik veneerlerde sağkalım yaklaşık %99 olarak bildirilirken, şiddetli dentin ekspozu bulunan olgularda sağkalımın yaklaşık %91'e gerilediği ve klinik komplikasyonların arttığı gösterilmiştir (Alqutaibi et al., 2024). Ayrıca 672 veneer üzerinde 1–15 yıllık takip içeren klinik çalışmada dentin ekspozu %30'un üzerine çıktığında başarısızlık riskinin arttığı bildirilmiştir (Etienne et al., 2025).

Fasiyal Preparasyon

Laminate veneer restorasyonlar mevcut diş konturunun üzerine konumlandığından, fasiyal preparasyonun doğal diş morfolojisini ve planlanan restoratif konturu izlemesi gerekir (Silva et al., 2020). Literatürde yaklaşık 0,3–1,0 mm arasında değişen değerler bildirilmekle birlikte, bu aralık her hasta için zorunlu bir standart olarak değerlendirilmemelidir (Obradović-Đuričić et al., 2014). Laminate veneerlerde preparasyon tasarlanırken standart bir preparasyon derinliğinin tüm vakalara uygulanması yerine, restoratif hedefe dayalı ve kontrollü bir preparasyon yaklaşımı benimsenmelidir. Free-hand şekilde gereğinden fazla redüksiyon yapılması hem restorasyonun labial konumlanmasına hem de mine

kaybına neden olabilir (Silva et al., 2020). Bu nedenle preparasyon derinliği, anatomik olarak değişkenlik gösteren mine kalınlığı ve planlanan restorasyonun üç boyutlu konturu dikkate alınarak belirlenmelidir.

Servikal bölgede mine kalınlığının azalması nedeniyle aşırı preparasyondan özellikle kaçınılmalıdır (Pahlevan et al., 2014). Bitim çizgisinin mümkün olduğunca supragingival konumlandırılması, temizlenebilirlik ve mikrosızıntı riskinin azaltılması açısından tercih edilebilir; bununla birlikte marjin konumu estetik gereksinim ve mevcut anatomik koşullara göre bireyselleştirilmelidir (Morita et al., 2016). Preparasyon tasarımının marjinal uyum üzerinde de etkisi bulunmaktadır; bu nedenle oluşturulan bitim çizgisi yalnızca periodontal açıdan değil, restorasyonun üretim ve adaptasyon doğruluğu açısından da değerlendirilmelidir (Goujat et al., 2019).

İnsizal Preparasyon

Laminate veneerlerde insizal preparasyon; window, feather-edge, bevel ve insizal overlap gibi farklı tasarımlarda gerçekleştirilebilir (Walls et al., 2002). Tasarım seçimi; mevcut insizal kenarın durumu, anterior rehberliğin korunması veya yeniden oluşturulması, restorasyonun uzatılma gereksinimi, materyal kalınlığı ve oklüzal yüklenme ile birlikte değerlendirilmelidir.

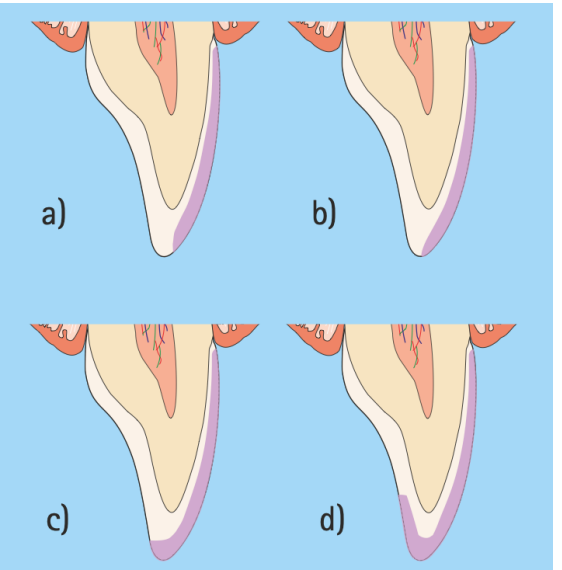
Pencere (window) preparasyonda insizal kenar restorasyon kapsamı dışında bırakılır ve mevcut anterior rehberliğin korunması hedeflenir (Gürbulak & Demircan, 2012; Koyak et al., 2023). Ancak insizal kenarda kalan mine dokusu zayıflar ve kırılmaya elverişli hale gelir (Walls et al., 2002). Bu nedenle insizal kenarın sağlam olduğu dişlerde tercih edilmelidir. Bir diğer dezavantajı ise; uzun dönemde marjin aralığının açılmasına, siman kaçışına bağlı olarak estetiğin bozulmasına, renklenmelere ve porselende chippinge sebep olabilir (Chai et al., 2018; Walls et al., 2002).

Feather-edge tasarımda preparasyon fasiyal yüzey boyunca ilerlerken insizal kenar restorasyon kapsamına alınmaz (Gürbulak & Demircan, 2012). Bu yaklaşımda mevcut anterior rehberlik korunabilir; ancak protrüziv hareket sırasında restorasyonun insizal kenarında makaslama yüklerinin oluşabileceği ve tasarımın fonksiyonel koşullara göre seçilmesi gerektiği bildirilmiştir (Koyak et al., 2023).

Bevel preparasyonda preparasyon insizal kenarı aşacak şekilde sınırlı miktarda palatinal yönde ilerletilir (Walls et al., 2002). Kesim insizal kenarı bir miktar aşarak bukko-palatal yönlü olarak 30-40 derece açılı şekilde devam eder ve bu miktar genellikle 0.5-1 mm'yi aşmaz (Gürbulak & Demircan, 2012; Şencan & Yanıkoğlu, 2023). Bu tasarım, insizal geçişin estetik olarak kontrol edilmesine olanak sağlayabilir; ancak kaldırılan mine miktarı window veya feather-edge tasarımlara göre artar (Koyak et al., 2023). .

İnsizal overlap tasarımında insizal kenar preparasyona dahil edilir ve preparasyon palatinal yüzeye doğru, insizal kenardan yaklaşık 1 mm redüksiyon yapılarak ilerletilip bir bitim çizgisi ile sonlandırılır (Gürbulak & Demircan, 2012). Bu yaklaşım kron boyunun uzatılması gereken olgularda yararlı olabilir ve restorasyon için daha belirgin bir giriş yolu sağlayabilir (Calamia, 1983; Shetty et al., 2011). Butt joint ve chamfer olmak üzere iki tür basamak çeşidi kullanılabilir (Şener & Türker, 2010). Bu tekniğin avantajları arasında restorasyonun simantasyon sırasında rahat yerleştirilmesi ve oklüzal yük dağılımı daha geniş bir yüzeyde sağlandığı için materyaldeki stres birikiminin azalmasıdır (Shetty et al., 2011). İnsizal kenarın preparasyona dahil edilmesiyle anterior rehberlik kaybedilir (Hahn et al., 2000).

Şekil 1. İnsizal preparasyon türleri; window (A), feather (B), bevel (C), insizal overlap (D)



Kaynak:(Walls et al., 2002)

No-prep veya ultrathin veneer yaklaşımında diş dokusundan hiç madde kaldırılmaz veya çok az miktarda madde kaldırılır (Komine et al., 2024). Ancak bu teknikte yüzey preparasyonu yapılmadığı durumlarda asitle pürüzlendirmeye direnç gösteren aprizmatik mine tabakası uzaklaştırılamaz ve böylece adeziv bağlanmanın dayanıklılığı azalır (Shetty et al., 2011). Ayrıca belirgin bir giriş yolu oluşturulamadığından restorasyonun doğru konumlandırılmasını zorlaştırır ve yeterli mekanik stabilite sağlanamaz (Shetty et al., 2011).

Bu yaklaşımla kullanılacak veneerlerin çok ince olması gerektiğinden (0,2-0,3 mm) genellikle feldspatik porselenden üretilirler (Komine et al., 2024). Özellikle belirgin renklenme, protrüzyon veya hacim artışının kabul edilemeyeceği durumlarda no-prep tasarım uygun olmayabilir (Kam Hepdeniz & Temel, 2023).

İnsizal overlap konusunda literatürde birçok çalışma ve sonuç bulunmaktadır (Gonzalez-Martin et al., 2021; Hong et al., 2017; Mihali et al., 2022; Morimoto et al., 2016). 2016 tarihli

sistematik derleme ve meta-analizde insizal kenarı içine alan veneerler için tahmini sağkalım %88, non overlap veneerler için %91 olarak bildirilmiş ve iki tasarım arasında kesin bir üstünlük gösterilememiştir (Morimoto et al., 2016). Buna karşılık daha sonraki bir sistematik derleme ve meta-analizde, non overlap tasarımlar lehine anlamlı bir fark bulunurken, butt-joint ve overlap arasında anlamlı bir fark bulunmamıştır (Hong et al., 2017). Yapılan retrospektif bir çalışmada ise 7 yıllık bir süre zarfında vital dişlerde minimal invaziv preparasyon teknikleri ile uygulanan veneerlerde %91,77'lik genel bir başarı oranı gösterilmiştir (Mihali et al., 2022).

Uzun dönem sistematik derlemelerde laminate veneerlerin genel sağkalımının yüksek olduğu, ancak kırık ve debonding gibi komplikasyonların özellikle ilk yıllarda görülebildiği bildirilmiştir (Gonzalez-Martin et al., 2021; Mihali et al., 2022).

Proksimal Preparasyon

Veneer restorasyonunun proksimal preparasyon yapılırken, preparasyon sınırı mevcut doğal interproksimal temas noktasının labialinde sonlandırılabileceği gibi, preparasyon interproksimal temas bölgesinin yaklaşık %50'sini kapsayacak şekilde genişletilebilir (Bennani et al., 2024). Bu noktada yuvarlatılmış uçlu ve uca doğru konik olarak daralan bir fissür frez ile dişin her iki tarafındaki interproksimal alanlara uzanan bir preparasyon yapılır (Siva & Terzioglu, 2022). İnterproksimal bölgede preparasyon sınırının mevcut kontakt alanının yaklaşık üçte ikisini veya dörtte üçünü kapsayacak şekilde düzenlenmesi önerilmektedir (Gürbulak & Demircan, 2012). Bununla birlikte, diastema, dişlerin pozisyonel düzensizlikleri veya interproksimal bölgelerde siyah üçgen oluşumunun bulunduğu klinik durumlarda, preparasyon sınırlarının kontakt noktasını aşacak şekilde lingual yönde konumlandırılması önerilmektedir (Rouse, 1997).

Gingival Preparasyon

Anterior dişlerin servikal bölgesinde mine kalınlığının azalması nedeniyle gingival preparasyon kontrollü yapılmalıdır (Gürel, 2007). Gingival bitim sınırı supragingival, equigingival ve subgingival şeklinde tasarlanabilir (Mitthra et al., 2020). Kesim esnasında overpreparasyondan kaçınılarak dentin ekspozu engellenmeli ve preparasyon diş eti konturunu taklit edecek şekilde supragingival veya diş eti seviyesinde bitirilmelidir (Koyak et al., 2023). Marjinin bu şekilde konumlandırılması, uygun kontur ve yüzey pürüzlülüğü sağlandığında periodontal bakımın kolaylaştırılması ve diş etinin korunması açısından avantaj sağlayabilir (Gürbulak & Demircan, 2012). Bununla birlikte, marjin konumu yalnızca periodontal gerekçelerle belirlenmemeli; estetik gereksinim, renklenmenin maskelenmesi ve restorasyonun marjinal adaptasyonu da dikkate alınmalıdır (Walls et al., 2002).

Diş renginin maskelenme ve estetik ihtiyacının arttığı durumlarda preparasyon subgingivalde sonlanacak şekilde bitirilebilir (Gürbulak & Demircan, 2012). Subgingival preparasyonun tercih edildiği vakalarda, preparasyon sınırının gingival dokularla uyumlu şekilde düzenlenmesi; teknisyenin papil konturunu ve yüksekliğini daha etkin biçimde korumasına, restorasyonun daha doğal bir çıkış profiline sahip olmasına ve interproksimal bölgelerdeki mevcut boşlukların restorasyonla kapatılmasına katkı sağlayabilir (Mitthra et al., 2020; Walls et al., 2002). Basamak tasarımı; yaklaşık 0,4 mm olacak şekilde feather-edge, chamfer veya diğer modifikasyonlar şeklinde seçilebilir (Gürbulak & Demircan, 2012; Şencan & Yanıkoğlu, 2023).

Preparasyon Gereçleri

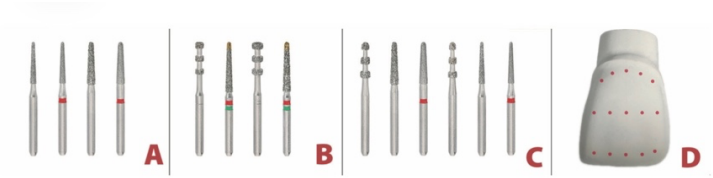
Laminate veneer preparasyonu, küçük miktarlardaki redüksiyon farklılıklarının restorasyon kalınlığı ve mine korunumu üzerinde belirgin sonuçlar doğurabilmesi nedeniyle kontrollü yapılmalıdır (Silva et al., 2020). Hekime preparasyon sürecinde

kolaylık sağlayacak ve kesim miktarının kontrollü şekilde ayarlanmasını sağlayacak ekipmanlar bulunmaktadır. Günümüzde diagnostik mum modeller, silikon indeksler, termoplastik rehberler, kalibre edilmiş frezler ve dijital yazıcılı sistemler, planlanan restoratif konturun klinik preparasyona aktarılmasına yardımcı olabilir (Cho & Nagy, 2015). Aşağıda güncel ekipman seçeneklerinden bahsedilmiştir.

Preparasyon Frezleri

Fasiyal ve insizal redüksiyonu standardize etmek amacıyla kalibre edilmiş frezler, çapı 1 mm'lik elmas rond frezler veya kontrollü redüksiyon sistemleri kullanılabilir. Ancak tek bir frez çapına dayalı mekanik redüksiyon, mevcut diş morfolojisini ve planlanan restoratif konturu dikkate almadığında gereksiz diş dokusu kaybına, final restorasyonun konumunda istenmeyen durumlara ve agresif preparasyona yol açabilir (Ahlers et al., 2023). Bu nedenle frezler, diagnostik planlama ve redüksiyon kontrolü ile birlikte kullanılmalıdır.

Şekil 2. Freehand preparasyon frezleri (A), kalibre edilmiş derinlik rehberlikli frezler (B,C), santral kesici dişlerde preparasyon derinliklerinin kaydedildiği 15 noktayı gösteren preparasyon tasarımı çizimi (D)



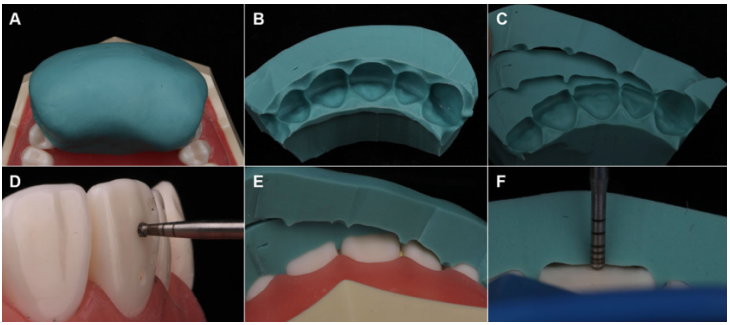
Kaynak:(Ahlers et al., 2023)

Silikon Ölçüler

Silikon indeks, diagnostik wax-up veya mock-up üzerinden hazırlanarak planlanan restorasyon konturunun klinik preparasyona aktarılmasını sağlar (Magne & Belser, 2004). Bu yöntem, free hand

preparasyonlara göre redüksiyonun görsel ve mekânsal olarak kontrol edilmesine yardımcı olabilir; ancak silikonun esnekliği ve çalışma alanını kısmen sınırlaması yöntemin doğruluğunu etkileyebilir (Silva et al., 2020).

Şekil 3. Silikon rehber ile yapılan diş preparasyonu

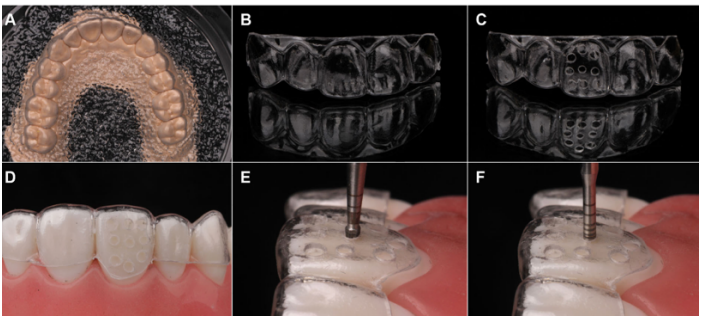


Kaynak:(Gao et al., 2022)

Termoplastik Rehberler

Güncel araştırmalarda, diş preparasyonlarının standardizasyonunu ve kontrolünü desteklemek amacıyla termoplastik kılavuzların kullanımına yer verilmiştir (Oh et al., 2010). Bu kılavuzlar, preparasyon sırasında oluşturulan derinlik yönlendirici çukurcukların (dimple) görsel olarak değerlendirilmesine olanak sağlarken, kılavuz üzerinde önceden oluşturulan delik veya yuvalar aracılığıyla preparasyon derinliğinin objektif biçimde kontrol edilmesini mümkün kılmaktadır (Cherukara et al., 2003). Termoplastik rehber kullanılarak yapılan preparasyonlar ile 3D baskı, otomatik durdurma özellikli 3D baskı kılavuz, silikon indeks, rehberliksiz free hand ve derinlik rehberli frezler ile yapılmış preparasyonları karşılaştırılan bir çalışmada ise termoplastik kılavuz, diğer yöntemlere kıyasla anlamlı düzeyde daha yüksek doğruluk göstermiştir (Djaballah et al., 2026).

Şekil 4. Termoplastik rehber ile simüle edilmiş diş preparasyon tekniği



Kaynak:(Gao et al., 2022)

Dijital 3D-Rehberli Yazıcılar

3 boyutlu baskı teknolojisi ve yapay zekanın diş hekimliğine entegrasyonu, laminate veneerlerin preparasyonundan üretimine, mock-up hazırlanmasından estetik düzenlemelerin planlanmasına kadar birçok alanda klinisyenin işini kolaylaştırmaktadır (Coachman et al., 2020; Silva et al., 2020). Üç boyutlu baskı teknolojisiyle hazırlanan rijit redüksiyon rehberleri, planlanan restoratif kontura göre kontrollü preparasyon yapılmasına olanak tanır ve silikon indekslere göre çok daha rijit bir yapıdadır (Silva et al., 2020). Güncel teknik raporlar, bu rehberlerin özellikle ultrathin veneerlerde gerekli restorasyon alanının oluşturulması ve aşırı redüksiyonun önlenmesi amacıyla kullanılabileceğini göstermektedir (Yousry et al., 2024).

Üç boyutlu basılmış redüksiyon rehberlerinin kullanıldığı klinik raporlarda, planlanan restoratif alanın kontrollü biçimde oluşturulması ve mine korunumu hedeflenmiştir (Sartori et al., 2024). Bununla birlikte, dijital rehberlerin tasarım özellikleri ve üretim doğruluğu değişebildiğinden, bu sistemler klinik muayene ve oklüzal değerlendirmenin yerine geçen değil, bunları destekleyen araçlar olarak kullanılmalıdır.

Şekil 5. 3D baskı kılavuzlar ve özel First Fit aeratör



Kaynak:(Silva et al., 2020)

Şekil 6. Ağız içerisine yerleştirilen 3D baskı kılavuz



Kaynak:(Silva et al., 2020)

Klinik Sağkalım ve Preparasyon Tasarımının Önemi

Laminate veneerlerin klinik sağkalımı genel olarak yüksek olmakla birlikte, başarısızlıkların dağılımı preparasyon tasarımı, diş morfolojisi, materyal ve oklüzal koşullara göre değişebilmektedir (AlJazairy, 2021; Komine et al., 2024). 25 klinik çalışmayı ve 6500 laminate veneer restorasyonu içeren sistematik derlemede 10 yıllık tahmini kümülatif sağkalım %95,5 olarak bildirilmiş; kırık ve debonding en sık karşılaşılan başarısızlık nedenleri arasında yer almıştır (Alenezi et al., 2021). Non overlap preparasyonla uygulanan

laminate veneerler, overlap preparasyonla üretilenlere kıyasla daha yüksek başarısızlık oranı göstermiştir (Alenezi et al., 2021).Daha güncel bir sistematik derleme ve meta-analizde feldspatik seramik, lösit ile güçlendirilmiş cam seramik, lityum disilikat ve zirkonya veneerlerin uzun dönem sağkalım oranlarının yüksek olduğu, ancak komplikasyon profillerinin materyale göre değişebildiği gösterilmiştir (Klein et al., 2025).

Preparasyon tasarımının klinik performans üzerindeki etkisi tek başına değerlendirilmemelidir. Örneğin insizal overlap ile non overlap tasarımları karşılaştıran sistematik derlemelerde sonuçların kullanılan istatistiksel yönteme göre değişebildiği bildirilmiş ve preparasyon tasarımının materyal, dişin vitalitesi ve oklüzal koşullar gibi değişkenlerle birlikte değerlendirilmesi gerektiği vurgulanmıştır (Morimoto et al., 2016). Bu nedenle klinisyen, preparasyon tipini yalnızca teorik bir sınıflandırmaya göre değil, restoratif hedef ve fonksiyonel gereksinimlere göre seçmelidir.

Marjinal ve İnternal Uyum

Marjinal bütünlük ve internal adaptasyon, laminate veneerlerin uzun dönem klinik performansında önemli parametrelerdir (Baig et al., 2024). Sistematik derleme ve meta-analizde 21 çalışmanın sonuçları incelenmiş ve preparasyon tasarımının marjinal uyum üzerinde etkili olabileceği gösterilmiştir (Baig et al., 2024). Aynı çalışmada, preslenmiş ve frezelenmiş porselen veneerler arasında marjinal gap arasında anlamlı bir fark bulunmazken, internal gap açısından frezelenmiş porselen veneerler anlamlı olarak daha dezavantajlı bulunmuştur (Baig et al., 2024). Buna ek olarak butt-joint tasarımın belirli koşullarda palatinal chamfer tasarıma göre daha düşük marjinal gap oluşumu ile ilişkili olduğu bildirilmiştir (Baig et al., 2024). Bu bulgular, preparasyon tekniği seçilirken değerlendirmelerin yalnızca diş dokusu kaybı

açısından değil, marjinal adaptasyonu açısından da değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

Preparasyon tasarımındaki modifikasyonların marjinal kenar uyumu üzerindeki etkisi de araştırılmıştır (Bennani et al., 2024). Bennani ve arkadaşlarının çalışmasında feather-edge, shoulder ve kanatlı shoulder tasarımları karşılaştırılmış; kanatlı shoulder tasarımının belirli ölçüm bölgelerinde daha düşük mutlak marjinal uyumsuzluk ile ilişkili olduğu bildirilmiştir (Bennani et al., 2024). Bununla birlikte bu bulgular in vitro olduğundan, doğrudan uzun dönem klinik üstünlük şeklinde yorumlanmamalıdır (Bennani et al., 2024).

Klinik Karar Verme ve Preparasyon Tasarımının Bireyselleştirilmesi

Preparasyon tasarımının belirlenmesinde ilk adım, restoratif hedefin ve mevcut diş dokusunun birlikte değerlendirilmesidir. Diagnostik wax-up ve mock-up aracılığıyla planlanan diş formu, insizal uzunluk, fasiyal kontur ve proksimal ilişkiler önceden değerlendirilmeli; daha sonra bu plan kontrollü bir redüksiyon rehberi ile klinik preparasyona aktarılmalıdır (Sartori et al., 2024; Silva et al., 2020). Böylece yalnızca belirli bir preparasyon derinliğine ulaşmak yerine, gerekli restoratif alanın minimum diş dokusu kaybıyla oluşturulması hedeflenebilir.

Renklenmenin derecesi, dişin konumu, mevcut mine kalınlığı, oklüzal ilişki, anterior rehberlik ve planlanan kron boyu değişikliği preparasyon kararını doğrudan etkiler. Örneğin yalnızca hafif renk değişikliği ve kontur düzeltmesinin amaçlandığı, yeterli mine bulunan olgularda minimal veya no-prep yaklaşımlar değerlendirilebilirken; belirgin renklenmenin maskelenmesi veya diş formunun önemli ölçüde değiştirilmesi gereken olgularda daha fazla alan gerekebilir. Ancak artan preparasyon derinliği ile dentin ekspozu arasındaki ilişki nedeniyle, estetik hedefin daha fazla diş

dokusu kaldırılarak değil, öncelikle restoratif materyalin optik özelliklerinden yararlanılarak karşılanması tercih edilmelidir (Etienne et al., 2025).

Kaynakça

Ahlers, M. O., Cachovan, G., Jakstat, H. A., Edelhoff, D., Roehl, J. C., & Platzer, U. (2023). Freehand vs. depth-gauge rotary instruments for veneer preparation: A controlled randomized simulator study. *Journal of Prosthodontic Research*, *68*(3), 407-414.

Alenezi, A., Alsweed, M., Alsidrani, S., & Chrcanovic, B. R. (2021). Long-Term Survival and Complication Rates of Porcelain Laminate Veneers in Clinical Studies: A Systematic Review. *J Clin Med*, *10*(5). https://doi.org/10.3390/jcm10051074

AlJazairy, Y. H. (2021). Survival Rates for Porcelain Laminate Veneers: A Systematic Review. *Eur J Dent*, *15*(2), 360-368. https://doi.org/10.1055/s-0040-1715914

Alqutaibi, A. Y., Saker, S., Alghauli, M. A., Algabri, R. S., & AbdElaziz, M. H. (2024). Clinical survival and complication rate of ceramic veneers bonded to different substrates: A systematic review and meta-analysis. *The Journal of prosthetic dentistry*.

Baig, M. R., Qasim, S. S. B., & Baskaradoss, J. K. (2024). Marginal and internal fit of porcelain laminate veneers: A systematic review and meta-analysis. *The Journal of prosthetic dentistry*, *131*(1), 13-24.

Bennani, V., Aarts, J. M., & Senthilkumar, A. (2024). Effect of a modified laminate veneer preparation design on absolute margin discrepancy and marginal overhang. *The Journal of prosthetic dentistry*, *131*(2), 252. e251-252. e258.

Bonfante, E. A., Calamita, M., & Bergamo, E. T. (2023). Indirect restorative systems—A narrative review. *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry*, *35*(1), 84-104.

Calamia, J. R. (1983). Etched porcelain facial veneers: a new treatment modality based on scientific and clinical evidence. *N Y J Dent*, *53*(6), 255-259.

Cangül, S., & Bakır, E. P. (2017). Dört farklı laminate veneer restorasyon materyalinin bağlanma direncinin değerlendirilmesi. *7tepe Klinik Dergisi*, *14*(2), 19-24.

Chai, S. Y., Bennani, V., Aarts, J. M., & Lyons, K. (2018). Incisal preparation design for ceramic veneers: A critical review. *The Journal of the American Dental Association*, *149*(1), 25-37.

Cherukara, G. P., Seymour, K. G., Zou, L., & Samarawickrama, D. Y. (2003). Geographic distribution of porcelain veneer preparation depth with various clinical techniques. *J Prosthet Dent*, *89*(6), 544-550. https://doi.org/10.1016/s0022-3913(03)00215-4

Cho, S.-H., & Nagy, W. W. (2015). Labial reduction guide for laminate veneer preparation. *The Journal of prosthetic dentistry*, *114*(4), 490-492.

Coachman, C., Georg, R., Bohner, L., Rigo, L. C., & Sesma, N. (2020). Chairside 3D digital design and trial restoration workflow. *J Prosthet Dent*, *124*(5), 514-520. https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2019.10.015

Djaballah, W., Katamish, H., & Badran, A. S. (2026). Comparison Between Different Techniques For A Reliable Amount Of Tooth Reduction In Laminate Veneer Preparation: An In Vitro Study. *Egyptian Dental Journal*, *72*(2), 1689-1699.

Düzyol, M., Düzyol, E., Akgül, N., & Seven, N. (2017). Rezin esaslı anterior lamina venerler ve güncel yapım yöntemleri. *ADO Klinik Bilimler Dergisi*, *8*(1), 1575-1582.

Edelhoff, D., & Sorensen, J. A. (2002). Tooth structure removal associated with various preparation designs for anterior teeth. *The*

Journal of Prosthetic Dentistry, *87*(5), 503-509. https://doi.org/10.1067/mpr.2002.124094

Erkun, H. F., Güngör, M. B., & Yılmaz, H. (2016). Porselen laminate veneerler. *Atatürk Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi Dergisi*, 170-183.

Etienne, O., Wang, C. J., Bourgi, R., Watzki, D., & Roman, T. (2025). Survival of Ceramic Veneers: Impact of Dentin Exposure and Tooth Vitality After 1 to 15 Years of Follow-Up. *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry*, *37*(12), 2519-2532.

Fahl Júnior, N. (1996). The direct/indirect composite resin veneers: a case report. *Pract Periodontics Aesthet Dent*, *8*(7), 627-638; quiz 640.

Gao, J., He, J., Fan, L., Lu, J., Xie, C., & Yu, H. (2022). Accuracy of Reduction Depths of Tooth Preparation for Porcelain Laminate Veneers Assisted by Different Tooth Preparation Guides: An In Vitro Study. *J Prosthodont*, *31*(7), 593-600. https://doi.org/10.1111/jopr.13456

Gomes, G., & Perdigão, J. (2014). Prefabricated composite resin veneers--a clinical review. *J Esthet Restor Dent*, *26*(5), 302-313. https://doi.org/10.1111/jerd.12114

Gonzalez-Martin, O., Avila-Ortiz, G., Torres-Muñoz, A., Del Solar, D., & Veltri, M. (2021). Ultrathin Ceramic Veneers in the Aesthetic Zone: A 36-month Retrospective Case Series. *Int J Prosthodont*, *34*(5), 567–577. https://doi.org/10.11607/ijp.7170

Goujat, A., Abouelleil, H., Colon, P., Jeannin, C., Pradelle, N., Seux, D., & Grosgogeat, B. (2019). Marginal and internal fit of CAD-CAM inlay/onlay restorations: A systematic review of in vitro studies. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, *121*(4), 590-597. e593.

Gresnigt, M. M., Cune, M. S., Schuitemaker, J., van der Made, S. A., Meisberger, E. W., Magne, P., & Özcan, M. (2019). Performance of ceramic laminate veneers with immediate dentine sealing: An 11 year prospective clinical trial. *Dental Materials*, *35*(7), 1042-1052.

Gürbulak, A. G., & Demircan, A. (2012). Geçmişten Günümüze Porselen Laminate Veneerlerde Preparasyon Teknikleri: Bir Literatür Değerlendirmesi. *Sağlık Bilimleri Dergisi*, *21*(2), 136-142.

Gürel, G. (2007). Predictable and precise tooth preparation techniques for porcelain laminate veneers in complex cases. *Int Dent SA*, *9*(1), 30-40.

Hahn, P., Gustav, M., & Hellwig, E. (2000). An in vitro assessment of the strength of porcelain veneers dependent on tooth preparation. *J Oral Rehabil*, *27*(12), 1024-1029. https://doi.org/10.1046/j.1365-2842.2000.00640.x

Hong, N., Yang, H., Li, J., Wu, S., & Li, Y. (2017). Effect of Preparation Designs on the Prognosis of Porcelain Laminate Veneers: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Oper Dent*, *42*(6), E197-e213. https://doi.org/10.2341/16-390-l

Kalavacharla, V. K., Lawson, N. C., Ramp, L. C., & Burgess, J. O. (2015). Influence of Etching Protocol and Silane Treatment with a Universal Adhesive on Lithium Disilicate Bond Strength. *Oper Dent*, *40*(4), 372-378. https://doi.org/10.2341/14-116-l

Kam Hepdeniz, O., & Temel, U. B. (2023). Clinical survival of No-prep indirect composite laminate veneers: a 7-year prospective case series study. *BMC Oral Health*, *23*(1), 257.

Klein, P., Spitznagel, F. A., Zembic, A., Prott, L. S., Pieralli, S., Bongaerts, B., Metzendorf, M. I., Langner, R., & Gierthmuehlen, P. C. (2025). Survival and complication rates of feldspathic, leucite-reinforced, lithium disilicate and zirconia ceramic laminate veneers:

A systematic review and meta-analysis. *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry*, *37*(3), 601-619.

Komine, F., Furuchi, M., Honda, J., Kubochi, K., & Takata, H. (2024). Clinical performance of laminate veneers: A review of the literature. *Journal of prosthodontic research*, *68*(3), 368-379.

Koyak, A. F., Karakuş, S. T., Şimşek, A. T., & Yıldırım, B. (2023). PORSELEN LAMİNATE VENEER RESTORASYONLARDA HAZIRLIK AŞAMALARI. *Journal of Dental Faculty of Usak University*, *2*(2), 41-46.

Magne, P., & Belser, U. C. (2004). Novel porcelain laminate preparation approach driven by a diagnostic mock-up. *J Esthet Restor Dent*, *16*(1), 7-16; discussion 17-18. https://doi.org/10.1111/j.1708-8240.2004.tb00444.x

Mangani, F., Cerutti, A., Putignano, A., Bollero, R., & Madini, L. (2007). Clinical approach to anterior adhesive restorations using resin composite veneers. *Eur J Esthet Dent*, *2*(2), 188-209.

McLaren, E. A., & Whiteman, Y. Y. (2010). Ceramics: rationale for material selection. *Compend Contin Educ Dent*, *31*(9), 666-668, 670, 672 passim; quiz 680, 700.

Mihali, S. G., Lolos, D., Popa, G., Tudor, A., & Bratu, D. C. (2022). Retrospective Long-Term Clinical Outcome of Feldspathic Ceramic Veneers. *Materials (Basel)*, *15*(6). https://doi.org/10.3390/ma15062150

Mitthra, S., Anuradha, B., Pia, J. C., & Subbiya, A. (2020). A detailed overview on veneers–diagnostic and clinical considerations. *Challenges in Diseases and Health Research-Book Publication International*, *3*(2), 20-34.

Morimoto, S., Albanesi, R. B., Sesma, N., Agra, C. M., & Braga, M. M. (2016). Main clinical outcomes of feldspathic porcelain and

glass-ceramic laminate veneers: A systematic review and meta-analysis of survival and complication rates. *International Journal of Prosthodontics*, *29*(1).

Morita, R., Hayashida, M., Pupo, Y., Berger, G., Reggiani, R., & Betiol, E. (2016). Minimally invasive laminate veneers: clinical aspects in treatment planning and cementation procedures. *Case reports in dentistry*, *2016*(1), 1839793.

Obradović-Đuričić, K., Medić, V., Dodić, S., Đurišić, S., Jokić, B., & Kuzmanović, J. (2014). Porcelain veneers: preparation design: a retrospective review. *Hemijska industrija*, *68*(2), 179-192.

Oh, W. S., Saglik, B., & May, K. B. (2010). Tooth reduction guide using silicone registration material along with vacuum-formed thermoplastic matrix. *J Prosthodont*, *19*(1), 81-83. https://doi.org/10.1111/j.1532-849X.2009.00506.x

Öztürk, E., Bolay, Ş., Hickel, R., & Ilie, N. (2013). Shear bond strength of porcelain laminate veneers to enamel, dentine and enamel-dentine complex bonded with different adhesive luting systems. *J Dent*, *41*(2), 97-105. https://doi.org/10.1016/j.jdent.2012.04.005

Pahlevan, A., Mirzaee, M., Yassine, E., Omrany, L. R., Tabatabaee, M. H., Kermanshah, H., Arami, S., & Abbasi, M. (2014). Enamel thickness after preparation of tooth for porcelain laminate. *Journal of Dentistry (Tehran, Iran)*, *11*(4), 428.

Peumans, M., Van Meerbeek, B., Lambrechts, P., & Vanherle, G. (2000). Porcelain veneers: a review of the literature. *Journal of Dentistry*, *28*(3), 163-177.

Pini, N. P., Aguiar, F. H. B., Lima, D. A. N. L., Lovadino, J. R., Terada, R. S. S., & Pascotto, R. C. (2012). Advances in dental

veneers: materials, applications, and techniques. *Clinical, cosmetic and investigational dentistry*, 9-16.

Rouse, J. S. (1997). Full veneer versus traditional veneer preparation: a discussion of interproximal extension. *J Prosthet Dent*, *78*(6), 545-549. https://doi.org/10.1016/s0022-3913(97)70003-9

Sartori, N., Ghishan, T., O'Neill, E., Hosney, S., & Zoidis, P. (2024). Digitally designed and additively manufactured tooth reduction guides for porcelain laminate veneer preparations: A clinical report. *J Prosthet Dent*, *131*(5), 768-773. https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2022.10.015

Shetty, A., Kaiwar, A., Shubhashini, N., Ashwini, P., Naveen, D., Adarsha, M., Shetty, M., & Meena, N. (2011). Survival rates of porcelain laminate restoration based on different incisal preparation designs: An analysis. *J Conserv Dent*, *14*(1), 10-15. https://doi.org/10.4103/0972-0707.80723

Silva, B. P. d., Stanley, K., & Gardee, J. (2020). Laminate veneers: Preplanning and treatment using digital guided tooth preparation. *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry*, *32*(2), 150-160.

Siva, E., & Terzioglu, H. (2022). Laminate Veneerler. *Selcuk Dental Journal*, *9*(3), 952-958.

Strassler, H. E. (2007). Minimally invasive porcelain veneers: indications for a conservative esthetic dentistry treatment modality. *Gen Dent*, *55*(7), 686-694; quiz 695-686, 712.

Şencan, B. B., & Yanıkoğlu, N. D. (2023). Factors that affect the success of laminate veneer restorations. *Current Research in Dental Sciences*, *33*(1), 58-65.

Şener, I., & Türker, Ş. (2010). Lamina veneer restorasyonların preparasyon tipleri ve yapım teknikleri. *Dicle Dişhekimliği Dergisi*, *11*, 51-56.

Tantak, N. (2026). Dental laminate veneers: Contemporary concepts, materials, clinical protocols, and long-term outcomes–a narrative review. *Archives of Dental Research*, *16*(1), 17-21.

Tosun, B., & Yanıkoğlu, N. (2020). CLASS 2 MALOKLUZYONUN LAMİNATE VE TAM SERAMİK RESTORASYONLAR İLE ESTETİK REHABİLİTASYONU: VAKA SUNUMU. *Atatürk Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi Dergisi*, *30*(3), 476-480.

Wakiaga, J., Brunton, P., Silikas, N., & Glenny, A. M. (2004). Direct versus indirect veneer restorations for intrinsic dental stains. *Cochrane Database Syst Rev*(1), Cd004347. https://doi.org/10.1002/14651858.CD004347.pub2

Walls, A., Steele, J., & Wassell, R. (2002). Crowns and other extra-coronal restorations: porcelain laminate veneers. *British dental journal*, *193*(2), 73-82.

Yilmaz, S., Demirkol, N., Eyüboğlu, T. F., & Özcan, M. (2026). Clinical Performance Comparison of Prepless and Minimally Invasive Ceramic Laminate Veneer Restorations: A Prospective Clinical Study. *J Esthet Restor Dent*, *38*(4), 725-732. https://doi.org/10.1111/jerd.70077

Yousry, M., Hammad, I., El Halawani, M., & Aboushelib, M. (2024). Preparation of ultrathin translucent zirconia laminate veneers using 3D printing reduction guides. *J Prosthet Dent*, *131*(4), 548-553. https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2024.01.040

Zhang, Y., & Lawn, B. R. (2018). Novel zirconia materials in dentistry. *Journal of dental research*, *97*(2), 140-147.

Zhang, Y., Vardhaman, S., Rodrigues, C., & Lawn, B. (2023). A critical review of dental lithia-based glass–ceramics. *Journal of dental research*, *102*(3), 245-253.

BÖLÜM 12

REPAIR VERSUS REPLACEMENT OF COMPOSITE RESTORATIONS

AHMAD BITTAR[1]

Introduction

A localized defect in a composite restoration does not necessarily justify removing the entire restoration. The relevant clinical question is whether the defect can be corrected while preserving a serviceable restoration and maintaining the prognosis of the tooth. Repair offers this possibility through selective intervention, whereas replacement removes the existing restoration and creates a new restorative interface. The FDI World Dental Federation recommends assessing repair on an individual basis and identifying the cause of deterioration before selecting an intervention (FDI World Dental Federation, 2019).

The biological rationale for repair is persuasive, but the comparative clinical evidence requires a more qualified interpretation. A systematic review found no statistically significant difference in failure risk between repaired and replaced direct restorations, while rating the certainty of evidence as very low (Mendes et al., 2022). Therefore, repair should be considered a treatment option for appropriately selected defects, without

[1] Assistant Professor, DDS, PhD, İstinye University, Faculty of Dentistry, Department of Restorative Dentistry, Istanbul, Türkiye.
ORCID: 0009-0009-3305-5298

assuming that all repairs perform as well as all replacements. Lesion diagnosis, the condition of the remaining restoration, access for adhesive treatment, and patient priorities determine whether the conservative option is also the appropriate one.

This chapter critically examines the decision to repair or replace direct composite restorations in permanent teeth. It distinguishes restoration quality from caries diagnosis, evaluates the clinical evidence, and discusses the implications of laboratory research for repair procedures. Its central proposition is that treatment should address the defect and its cause with the least extensive intervention capable of achieving an acceptable clinical result.

Scope and interpretation of the evidence

This is a critical narrative review. Targeted literature searches were conducted through Europe PMC on September 19, 2026, using combinations of composite restoration, repair, replacement, clinical survival, secondary caries, and repair bond strength. Relevant clinical studies, evidence syntheses, and FDI guidance were selected for their contribution to the clinical decision. Bibliographic details were checked against indexed records and DOI metadata. The search was not designed as a systematic review, and no claim of exhaustive retrieval or independent formal risk-of-bias assessment is made.

Clinical outcomes and laboratory bond-strength findings are considered separately. A laboratory comparison can inform the selection of a surface treatment, but it cannot establish the clinical survival of a repaired restoration. Similarly, a review that summarizes earlier trials does not provide an additional independent patient cohort. The umbrella review by Fernández and colleagues brings together clinical, laboratory, and implementation evidence, but its conclusions remain dependent on the quality and scope of the underlying studies (Fernández et al., 2025).

Defining the intervention

Management encompasses more than a binary choice between repair and replacement. Reviewing involves monitoring an acceptable or uncertain finding. Refurbishment improves the existing surface or contour without adding restorative material. Resealing addresses suitable superficial defects with an adhesive or sealant. Repair adds restorative material after localized preparation or conditioning while retaining a sufficient part of the existing restoration. Replacement removes the restoration when a localized intervention is not reasonable (Hickel et al., 2023). These distinctions matter because a polished overhang and a reconstructed proximal box involve different substrates, technical demands, and potential failure mechanisms.

The intervention should be described precisely in clinical records and research reports. A study that groups polishing, sealing, and additive repair together evaluates a broader maintenance strategy than a study restricted to adhesive composite repair. This issue is particularly relevant to the National Dental Practice-Based Research Network cohort, in which the repair category included some refurbishment and sealing procedures (Gordan et al., 2015). Its findings are clinically informative, but they should not be interpreted as a comparison of one standardized composite repair protocol against replacement.

Diagnosing the defect before choosing treatment

Assessment should establish what has failed, where the defect is located, and whether the remaining restoration is serviceable. Cleaning, brief drying, visual examination, and appropriate functional assessment provide the basis for evaluating the restoration. The revised FDI criteria distinguish functional, biological, and aesthetic properties. Their management categories associate repairable unacceptable defects with score 4 and defects

requiring replacement with score 5, while allowing clinical judgment and monitoring where appropriate (Hickel et al., 2023). The scoring system supports documentation; it does not remove the need to consider the whole tooth and patient.

Marginal staining, a detectable gap, and a caries lesion are different findings. Discoloration alone should not be treated as proof of active caries. Examination should consider evidence of demineralization, cavitation, lesion activity, accessibility for cleaning, and radiographic findings when indicated. The review informing the ORCA/EFCD consensus process emphasized the limited validation of secondary-caries detection methods and the possibility of over-detection leading to invasive treatment (Askar et al., 2020). A replacement decision based only on a dark margin risks confusing restoration appearance with disease.

The consequences of the diagnostic framework were illustrated by Signori and colleagues, who assessed 718 restorations in 185 patients. Their adapted FDI-based approach, incorporating marginal staining and adaptation, produced more replacement indications than a caries-focused CARS approach (Signori et al., 2022). This study evaluated treatment indications rather than the long-term consequences of those decisions. It also preceded the revised FDI criteria, so it should not be interpreted as a direct evaluation of the 2023 version. Its practical contribution is to show that intervention thresholds depend partly on how the diagnostic criteria are applied.

Symptoms and structural findings require a separate assessment. Pain, a suspected tooth fracture, extensive loss of support, or pulpal disease may change the treatment objective beyond correcting the composite. Conversely, an asymptomatic localized chip may be suitable for repair if the residual restoration is stable and the defect is accessible. The decision should integrate the restored tooth's prognosis, caries risk, previous failures, and the

feasibility of maintaining the treated area (FDI World Dental Federation, 2019). Table 1 summarizes a proposed clinical synthesis of these considerations.

Table 1. Findings that inform the extent of intervention

Finding	**Possible approach**	**Condition for that approach**
Superficial stain or roughness	Review or refurbish	Establish that there is no separate biological or functional problem.
Small accessible chip	Localized repair	Retained material is serviceable; access and conditioning are feasible.
Localized caries at a margin	Caries management with repair when appropriate	Assess activity, extent, access, and the remaining restoration.
Proximal contact or contour defect	Repair if reconstruction is feasible	Access, matrix placement, and verification of the result are possible.
Generalized deterioration or loss of retention	Replacement	A localized intervention cannot restore acceptable function.
Pain or suspected tooth fracture	Further tooth and pulpal assessment	Determine the diagnosis before selecting a restorative intervention.

Source: Author synthesis informed by FDI guidance, diagnostic evidence, and repair principles (Askar et al., 2020; FDI World Dental Federation, 2019; Hickel et al., 2023; Loomans & Özcan, 2016). This is a clinical framework, not a validated prediction rule.

Clinical evidence for repair and replacement

The ten-year clinical trial by Fernández and colleagues enrolled 28 patients with 50 composite restorations, allocating 25 restorations to repair and 25 to replacement. Eligibility depended on localized defects judged suitable for either treatment. The groups showed similar behavior for the reported clinical parameters over follow-up (Fernández et al., 2015). The selection criterion is essential: the study supports considering repair when the residual

restoration is clinically serviceable, rather than extending repair to defects that require complete replacement.

Estay and colleagues reported a twelve-year study involving 34 patients and 167 restorations, including both amalgam and composite. The initial composite subgroups contained 15 repaired and 22 replaced restorations. Most assessed parameters behaved similarly across groups, although surface roughness favored replaced composite restorations (Estay et al., 2018). The long follow-up is valuable, but the small composite subgroups limit precision. A favorable result in selected cases does not establish a universal repair indication, and the absence of statistical significance in a small study does not demonstrate equivalence.

Practice-based evidence provides a less controlled but broader view. In the prospective cohort reported by Gordan and colleagues, 195 dentists recorded 5,889 restorations. Additional treatment within twelve months occurred in 7% of repaired restorations and 5% of replaced restorations. The adjusted odds ratio was 1.6, with a 95% confidence interval of 1.2 to 2.1. Among restorations requiring further treatment, those initially repaired were less likely to receive an aggressive intervention (Gordan et al., 2015). These findings support discussing both the possibility of another maintenance procedure and the extent of that procedure. Treatment was not randomized, materials were mixed, and the repair category was broader than additive composite repair.

A retrospective analysis by Kanzow and Wiegand included 8,542 initial composite restorations in 3,239 patients. It distinguished intervention-free success from survival definitions that allowed one or more repairs, and it also compared repaired with replacement restorations (Kanzow & Wiegand, 2020). The study demonstrates how allowing repair within the definition of survival changes the apparent longevity of an existing restoration. Its observational design remains vulnerable to differences in the defects

selected for repair and replacement, even when statistical adjustment is applied.

Evidence is also available for anterior restorations. In a retrospective practice-based study of 634 restorations, van de Sande and colleagues evaluated Class III, Class IV, and veneer restorations with follow-up extending to fifteen years. Allowing repair as continued survival improved the reported survival estimates (van de Sande et al., 2019). These results support the feasibility of maintaining anterior composites through repair, but they do not identify a single optimal technique or establish equivalent outcomes for all anterior defects. Evidence from Class III restorations should not automatically be transferred to extensive veneers or repeatedly fractured incisal reconstructions.

Mendes and colleagues included three studies in their systematic review and meta-analysis of repaired versus replaced defective direct restorations. The pooled relative risk of failure was 1.21, with a 95% confidence interval of 0.51 to 2.83. Risk of bias was high and certainty of evidence was very low (Mendes et al., 2022). The confidence interval permits clinically meaningful differences in either direction. Accordingly, the defensible conclusion is that the available studies did not establish a difference, while substantial uncertainty remains. Table 2 contrasts selected sources and their principal interpretive limitations.

Table 2. Selected clinical evidence and limits of interpretation

Evidence source	Contribution	Main limitation
Ten-year trial (Fernández et al., 2015)	Randomized comparison of 50 composite restorations.	Small sample of defects already judged suitable for either intervention.
Twelve-year study (Estay et al., 2018)	Long-term observations including repaired and replaced composite.	Mixed materials; small composite treatment subgroups.

Evidence source	Contribution	Main limitation
Practice-based cohort (Gordan et al., 2015)	Retreatment and its extent assessed after 12 months.	Nonrandomized treatment; mixed materials and broad repair definition.
Composite cohort (Kanzow & Wiegand, 2020)	Compares outcomes under different maintenance and survival definitions.	Retrospective data and selection of treatment by clinicians.
Clinical meta-analysis (Mendes et al., 2022)	Synthesizes failure risk across three studies.	Very low certainty; imprecise estimate does not establish equivalence.

Source: Author synthesis of the studies cited in the first column. These are selected sources, not an exhaustive inventory of eligible studies.

Understanding success and survival

Intervention-free success, restoration survival with maintenance, and tooth survival answer different questions. If a localized repair is counted as failure, the original restoration's success ends at that intervention. If repair is permitted within the definition of survival, the same restoration can remain in service. Casagrande and colleagues demonstrated the effect of these alternative definitions in records of 59,722 posterior restorations from general dental practices (Casagrande et al., 2017). The endpoint must therefore be stated before comparing longevity estimates across studies.

An increase in survival under a definition that permits repair does not, by itself, prove that repair produces a biological advantage over replacement. Part of the increase follows from how the endpoint is defined. Clinically meaningful comparisons should also consider the amount of intervention, symptoms, tooth retention, endodontic treatment, patient burden, and cumulative cost. Conversely, counting a small polish or localized repair as equivalent to complete replacement can obscure a useful difference in treatment burden. The distinction is supported by the different outcome levels examined in

the composite cohort of Kanzow and Wiegand (Kanzow & Wiegand, 2020).

Selection and follow-up can further influence the comparison. Clinicians may choose repair for a small accessible defect and replacement for a more extensive lesion. A favorable observational result may therefore reflect baseline prognosis as well as treatment. Multiple restorations within one patient also create correlated observations. Future comparisons should account for clustering, report losses to follow-up, and distinguish repair-interface failures from new defects elsewhere. Long-term follow-up reports from related research programs should not be assumed to represent independent samples without checking their recruitment and participant flow.

Selecting a repairable case

A repair is most plausible when the defect can be accessed, the cause can be addressed, and sufficient clinically acceptable restoration remains. The proposed decision sequence is to identify the pathology or functional problem, assess the residual restoration and tooth, and determine whether a localized intervention can restore acceptable function and maintainability. This synthesis follows the case-based approach of FDI guidance and the procedural framework described by Loomans and Özcan (FDI World Dental Federation, 2019; Loomans & Özcan, 2016). The amount of material removed should follow the defect, rather than a predetermined geometric cavity design.

For a posterior restoration, a localized marginal fracture may permit repair if isolation and reconstruction of the margin are feasible. A proximal defect requires additional consideration of access, matrix placement, contact, and contour. A defect that appears small on the occlusal surface may be less suitable for repair if the compromised area extends beneath inaccessible or unsupported

material. When generalized breakdown, loss of retention, or extensive deterioration prevents a reasonable localized correction, replacement becomes the appropriate category of intervention (Hickel et al., 2023).

In anterior teeth, the aesthetic endpoint deserves explicit discussion. A small addition may preserve most of a restoration while leaving some difference in shade or translucency. Repair is useful only if the expected result is acceptable to the patient and technically achievable. The long-term anterior cohort supports repair as a maintenance option, but does not justify promising an invisible interface or a fixed service life (van de Sande et al., 2019). Repeated incisal fracture also requires reconsideration of loading and restoration design rather than simply repeating the same addition.

Patient preferences should be elicited after explaining the extent of each proposed procedure and the uncertainty in comparative outcomes. A patient may accept the possibility of future localized maintenance in exchange for retaining more existing structure. Another may prioritize a broader aesthetic correction. Preference does not eliminate the requirement for a technically adequate result. The agreed plan should identify the reason for intervention and the conditions under which the procedure may need to be extended.

Adhesive principles and surface conditioning

Repair creates an interface between aged restorative material and newly placed composite, often alongside exposed enamel or dentin. These substrates should be identified and conditioned deliberately. The objective is to establish adhesion to a clean, appropriately prepared surface while preserving sound, serviceable tissue and material. Mechanical surface preparation and chemical conditioning are complementary components of published repair

protocols (Loomans & Özcan, 2016). Their application depends on the restorative substrate and the selected adhesive system.

The scoping review by Neto and colleagues included 76 laboratory studies. It identified heterogeneous mechanical and chemical protocols and reported improved repair bond strength when these approaches were combined under the evaluated aging conditions (Neto et al., 2024). This finding supports a combined conditioning strategy, but laboratory heterogeneity prevents translating one bond-strength ranking into a universal clinical protocol. Substrate composition, aging, test geometry, adhesive selection, and post-repair storage all affect what a particular experiment can establish.

Silane illustrates the need to distinguish a general rationale from a material-specific result. A systematic review of 19 laboratory studies reported higher repair bond strength when silane was added before adhesive application, with substantial heterogeneity and medium-to-high risk of bias (Mendes et al., 2020). In contrast, the experiments by Ugurlu and colleagues did not find an additional silane benefit under their tested combinations of composites and adhesives (Ugurlu et al., 2022, 2023). These results do not justify either omitting silane universally or declaring it indispensable for every repair. The conditioning sequence should follow the documented requirements of the chosen material system.

In the 2023 experiment by Ugurlu and colleagues, adhesive photo-polymerization influenced the maintenance of repair bond strength after aging (Ugurlu et al., 2023). This observation emphasizes that application and curing steps are part of the intervention, rather than incidental details. Nevertheless, a laboratory bond-strength result cannot be converted into an expected number of years of clinical service. Clinical survival also depends on the defect, loading, patient risk, and the integrity of the remaining restoration.

Performing and documenting the repair

Before preparation, record the defect, relevant symptoms, treatment objective, and the condition of the surrounding restoration. Where feasible, photographs help distinguish the original defect from later changes. Establish access and moisture control sufficient for the chosen adhesive procedure. Remove loose or fractured material and prepare the defective area conservatively, reassessing the remaining restoration as access improves. If the defect proves more extensive than anticipated, the treatment plan should be reconsidered rather than retaining compromised material simply to preserve the label of repair.

Clean and condition the retained composite using a protocol appropriate to its substrate. Published approaches include diamond-bur roughening and airborne-particle abrasion followed by chemical conditioning and adhesive application (Loomans & Özcan, 2016). Laboratory work with aged bulk-fill and nanohybrid composites reinforces the relevance of mechanical treatment, while also demonstrating that the effect of aging is material- and protocol-dependent (Ugurlu et al., 2022). Particle size, pressure, exposure time, and other settings should follow the selected system's instructions; no universal numeric settings are prescribed here.

Exposed enamel and dentin require their own adhesive treatment. A repaired area can contain more than one substrate, so a step that conditions the retained composite should not be assumed to condition adjacent tooth tissue adequately. Apply any required primer and adhesive in the specified sequence, including solvent evaporation and curing where indicated (Loomans & Özcan, 2016). Avoid treating all products marketed as universal adhesives as interchangeable repair systems. Record the actual products and protocol so that subsequent evaluation can relate the outcome to the procedure performed.

Place the repair composite with attention to adaptation, contour, and the curing requirements of the material. Proximal repairs must permit reconstruction and verification of the contact and marginal contour. Finish and polish the interface, then reassess function and the treated margin (Loomans & Özcan, 2016). Any residual defect that prevents the agreed objective from being achieved should be documented and addressed. Baseline documentation should describe the completed repair, rather than merely recording that a composite restoration was placed.

Follow-up and treatment burden

Follow-up should evaluate both the repair interface and the rest of the restoration. A new lesion or fracture elsewhere should be distinguished from failure at the repaired site. Record symptoms, marginal changes, caries findings, surface condition, contact, and function as relevant to the original defect. The revised FDI framework supports consistent assessment and risk-related monitoring (Hickel et al., 2023). A single fixed recall interval cannot be derived from the repair-versus-replacement studies reviewed here; timing should reflect the patient's risk and the clinical finding being monitored.

Repair should not be presented as invariably cheaper over the long term. Kanzow and colleagues retrospectively compared 616 repairs with 264 replacements from a German university setting. Although replacements had higher initial treatment costs, median annualized costs did not differ significantly: €47.58 for repair and €50.64 for replacement (Kanzow et al., 2021). These figures reflect the study's payer perspective and treatment setting, and should not be transferred directly to another country's fee structure. They show why a lower initial fee and lower cumulative cost are separate claims.

For shared decision-making, the immediate procedure should therefore be discussed alongside the possibility of further treatment. The patient needs to understand what structure will be retained, the intended functional or aesthetic result, and which findings would trigger reassessment. An honest discussion can support repair without promising that it will be permanent or that it will prevent every subsequent intervention.

Priorities for future clinical research

The most useful trials would recruit defects considered suitable for either repair or replacement and document that eligibility before allocation. Studies should stratify or adjust for defect type, location, restoration size, and relevant patient risk. Standardized treatment descriptions should separate refurbishment, resealing, and additive repair. Outcomes should include intervention-free success, survival with maintenance, tooth-related complications, and patient-reported burden, with assessment of time and cumulative cost.

A noninferiority conclusion requires a justified margin, an appropriate sample size, and an analysis designed for that question. It cannot be inferred from a nonsignificant superiority test. The imprecision and very low certainty identified in the clinical meta-analysis show why larger, well-reported comparisons remain necessary (Mendes et al., 2022). Laboratory studies should continue to clarify substrate-specific adhesion, while clinical research tests whether those technical differences change outcomes that matter to patients.

Conclusion

Repair is a reasonable option for a localized defect when the retained composite and tooth remain serviceable, the cause of deterioration can be addressed, and an adequate adhesive procedure is feasible. Clinical studies support its use in selected situations, but do not establish universal equivalence to replacement. Replacement

remains appropriate when the defect cannot be corrected adequately by a localized intervention.

The decision should begin with diagnosis, distinguish caries from marginal appearance, and evaluate the prognosis of the restored tooth. The treatment record should identify the precise intervention and its outcome. A conservative approach is justified by achieving acceptable function and maintainability with limited intervention, supported by continued assessment of both the repair and the remaining restoration.

References

Askar, H., Krois, J., Göstemeyer, G., Bottenberg, P., Zero, D., Banerjee, A., & Schwendicke, F. (2020). Secondary caries: What is it, and how it can be controlled, detected, and managed? *Clinical Oral Investigations, 24*(5), 1869–1876. https://doi.org/10.1007/s00784-020-03268-7

Casagrande, L., Laske, M., Bronkhorst, E. M., Huysmans, M. C. D. N. J. M., & Opdam, N. J. M. (2017). Repair may increase survival of direct posterior restorations - A practice based study. *Journal of Dentistry, 64*, 30–36. https://doi.org/10.1016/j.jdent.2017.06.002

Estay, J., Martín, J., Viera, V., Valdivieso, J., Bersezio, C., Vildosola, P., Mjor, I. A., Andrade, M. F., Moraes, R. R., Moncada, G., Gordan, V. V., & Fernández, E. (2018). 12 years of repair of amalgam and composite resins: A clinical study. *Operative Dentistry, 43*(1), 12–21. https://doi.org/10.2341/16-313-c

FDI World Dental Federation. (2019). *Repair of restorations*. https://www.fdiworlddental.org/repair-restorations

Fernández, E., Martín, J., Angel, P., Caviedes, R., Díaz, L., & Bersezio, C. (2025). Repair of resin composite restorations: An umbrella review of systematic reviews. *Operative Dentistry, 50*(5), 477–490. https://doi.org/10.2341/25-072-lit

Fernández, E., Martín, J., Vildósola, P., Oliveira Junior, O. B., Gordan, V., Mjor, I., Bersezio, C., Estay, J., de Andrade, M. F., & Moncada, G. (2015). Can repair increase the longevity of composite resins? Results of a 10-year clinical trial. *Journal of Dentistry, 43*(2), 279–286. https://doi.org/10.1016/j.jdent.2014.05.015

Gordan, V. V., Riley, J. L., III, Rindal, D. B., Qvist, V., Fellows, J. L., Dilbone, D. A., Brotman, S. G., Gilbert, G. H., & National Dental Practice-Based Research Network Collaborative Group. (2015). Repair or replacement of restorations: A prospective cohort study by dentists in The National Dental Practice-Based Research Network. *The Journal of the American Dental Association, 146*(12), 895–903. https://doi.org/10.1016/j.adaj.2015.05.017

Hickel, R., Mesinger, S., Opdam, N., Loomans, B., Frankenberger, R., Cadenaro, M., Burgess, J., Peschke, A., Heintze, S. D., & Kühnisch, J. (2023). Revised FDI criteria for evaluating direct and indirect dental restorations - Recommendations for its clinical use, interpretation, and reporting. *Clinical Oral Investigations, 27*(6), 2573–2592. https://doi.org/10.1007/s00784-022-04814-1

Kanzow, P., Krois, J., Wiegand, A., & Schwendicke, F. (2021). Long-term treatment costs and cost-effectiveness of restoration repair versus replacement. *Dental Materials, 37*(6), e375–e381. https://doi.org/10.1016/j.dental.2021.02.008

Kanzow, P., & Wiegand, A. (2020). Retrospective analysis on the repair vs. replacement of composite restorations. *Dental Materials, 36*(1), 108–118. https://doi.org/10.1016/j.dental.2019.11.001

Loomans, B. A. C., & Özcan, M. (2016). Intraoral repair of direct and indirect restorations: Procedures and guidelines. *Operative Dentistry, 41*(Suppl. 7), S68–S78. https://doi.org/10.2341/15-269-lit

Mendes, L. T., Loomans, B. A. C., Opdam, N. J. M., Silva, C. L. D., Casagrande, L., & Lenzi, T. L. (2020). Silane coupling agents are beneficial for resin composite repair: A systematic review and meta-analysis of in vitro studies. *The Journal of Adhesive Dentistry, 22*(5), 443–453. https://doi.org/10.3290/j.jad.a45175

Mendes, L. T., Pedrotti, D., Casagrande, L., & Lenzi, T. L. (2022). Risk of failure of repaired versus replaced defective direct restorations in permanent teeth: A systematic review and meta-analysis. *Clinical Oral Investigations, 26*(7), 4917–4927. https://doi.org/10.1007/s00784-022-04459-0

Neto, H. N. M., Leite, J. V. C., de Medeiros, J. M., e Silva Campos, D., de Araújo Ferreira Muniz, I., De Andrade, A. K. M., Duarte, R. M., De Souza, G. M., & Lima, R. B. W. (2024). Scoping review: Effect of surface treatments on bond strength of resin composite repair. *Journal of Dentistry, 140*, Article 104737. https://doi.org/10.1016/j.jdent.2023.104737

Signori, C., CaCIA collaborative group, Uehara, J. L. S., Romero, V. H. D., Moro, B. L. P., Braga, M. M., Mendes, F. M., & Cenci, M. S. (2022). Comparison of two clinical approaches based on visual criteria for secondary caries assessments and treatment decisions in permanent posterior teeth. *BMC Oral Health, 22*(1), Article 77. https://doi.org/10.1186/s12903-022-02112-6

Ugurlu, M., Al-Haj Husain, N., & Özcan, M. (2022). Repair of bulk-fill and nanohybrid resin composites: Effect of surface conditioning, adhesive promoters, and long-term aging. *Materials, 15*(13), Article 4688. https://doi.org/10.3390/ma15134688

Ugurlu, M., Al-Haj Husain, N., & Özcan, M. (2023). Immediate and late repair of microhybrid resin composites: Effect of silane coupling agent, universal adhesives and photo polymerization. *The European Journal of Prosthodontics and Restorative Dentistry, 31*(2), 116–125. https://doi.org/10.1922/ejprd_2427ugurlu10

van de Sande, F. H., Moraes, R. R., Elias, R. V., Montagner, A. F., Rodolpho, P. A., Demarco, F. F., & Cenci, M. S. (2019). Is composite repair suitable for anterior restorations? A long-term practice-based clinical study. *Clinical Oral Investigations, 23*(6), 2795–2803. https://doi.org/10.1007/s00784-018-2722-5


BİDGE