DOI:10.5281/zenodo.23511402

RESTORATİF DİŞ TEDAVİSİ ALANINDA GÜNCEL GELİŞMELER VE TEMATİK İNCELEMELER

Editör
Doç. Dr. Elif Esra Özmen Ünüvar

Restoratif Diş Tedavisi Alanında Güncel Gelişmeler ve Tematik İncelemeler

Editör

Doç. Dr. Elif Esra Özmen Ünüvar

İmtiyaz Sahibi
Platanus Publishing®

Editör
Doç. Dr. Elif Esra Özmen Ünüvar

Kapak & Mizanpaj & Sosyal Medya
Platanus Yayın Grubu

Birinci Basım
Ekim, 2026

Yayımcı Sertifika No
45813

ISBN

978-625-91206-0-7

©copyright
Bu kitabın yayım hakkı Platanus Publishing'e aittir. Kaynak gösterilmeden alıntı yapılamaz, izin alınmadan hiçbir yolla çoğaltılamaz.

Adres: Natoyolu Cad. Fahri Korutürk Mah. 157/B, 06480, Mamak, Ankara, Türkiye.

Telefon: +90 312 390 1 118
web: www.platanuspublishing.com
e-mail: platanuskitap@gmail.com



Platanus Publishing®

İÇİNDEKİLER

BÖLÜM 1..... 5

Vital Daimi Dişlerde Derin Çürük Lezyonlarının Minimal İnvaziv Restoratif Yönetimi: Güncel Kanıtlar ve Klinik Yaklaşımlar

Özhan Yağcı

Muhammet Fidan

BÖLÜM 2..... 23

Tek Renkli Renk Uyumlu Restoratif Materyaller: Optik Prensipler, Güncel Teknolojiler ve Klinik Performans

Buse Kesgin

BÖLÜM 3..... 41

Self-Healing Bioactive Composites in Restorative Dentistry

Merve Haberal

BÖLÜM 4..... 59

Quantitative Light-Induced Fluorescence in Caries Detection and Preventive Dentistry: Evidence for Monitoring Enamel Remineralization

Ahmad Bittar

BÖLÜM 1

Vital Daimi Dişlerde Derin Çürük Lezyonlarının Minimal İnvaziv Restoratif Yönetimi: Güncel Kanıtlar ve Klinik Yaklaşımlar

Özhan Yağcı[1]

Muhammet Fidan[2]

[1] Öğr. Gör., Uşak Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi Restoratif Diş Tedavisi A.B.D. 0000-0003-0705-6018

[2] Doç. Dr., Uşak Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi Restoratif Diş Tedavisi A.B.D. 0000-0001-7869-4872

1. Giriş

Derin çürük lezyonlarında klinik kararın en zor yanı, çürük dokusunu uzaklaştırırken pulpayı ve sağlam diş dokusunu ne ölçüde koruyacağımıza karar vermektir. Uzun yıllar boyunca kavitedeki renklenmiş ya da yumuşamış dentinin tamamen uzaklaştırılması gerektiği kabul edilmiştir. Çürük sürecine ilişkin biyolojik bilgilerin artması, adeziv restoratif materyallerin gelişmesi ve klinik çalışmaların sonuçları bu anlayışı değiştirmiştir. Artık kavitenin her bölgesinde aynı sertlikte dentine ulaşılması beklenmemekte; periferik dentin ile pulpa yakınındaki dentin farklı biçimde ele alınmaktadır (Innes et al., 2016; Schwendicke et al., 2016; Hamilton & Ricketts, 2026).

Minimal invaziv tedavide kavitedeki bütün bakterileri mekanik olarak uzaklaştırmaya çalışmak gerekli değildir. Periferde restorasyonun güvenilir biçimde bağlanabileceği sert bir alan hazırlanırken pulpa yakınındaki gereksiz doku kaybından kaçınılır. Ardından kavite sızdırmaz bir restorasyonla kapatılarak geride kalan biyofilmin besin kaynağıyla ilişkisi kesilir. Restorasyon altında kalan mikrobiyal yükün ve çeşitliliğin zamanla azalabildiğini gösteren klinik ve mikrobiyolojik bulgular bu yaklaşımın biyolojik temelini desteklemektedir (Bjørndal et al., 1997; Paddick et al., 2005). Burada söz konusu olan, çürük dentinin gelişigüzel bırakılması değil; lezyonun derinliği, pulpal tanı, dentinin klinik özellikleri ve restorasyonun sızdırmazlığı dikkate alınarak planlanan kontrollü bir işlemdir.

Son yıllarda yayımlanan sistematik derlemeler ve klinik rehberler, derin çürük bulunan vital daimi dişlerde selektif ve basamaklı çürük dokusu uzaklaştırmanın pulpanın açığa çıkma riskini azaltabildiğini bildirmektedir (Dhar et al., 2023; Schwendicke et al., 2021). Buna rağmen selektif ve basamaklı yöntemlerden birinin diğerinden açıkça üstün olduğunu söylemek güçtür. Derin kavitelerde uzun süredir kullanılan kavite linerlarının klinik sonuçları belirgin biçimde iyileştirdiğine ilişkin veriler de kesin değildir (Kosan et al., 2025; Ramezanzade et al., 2026; Schwendicke et al., 2026). Bu bölümde tanı ve olgu seçiminden başlanarak çürük dokusunu uzaklaştırma seçenekleri, selektif yöntemin klinik uygulanışı, kavite linerlarının yeri ve tedavi sonuçlarına ilişkin güncel veriler ele alınmıştır.

2. Derin Çürük Lezyonlarının Tanımı ve Biyolojik Temeli

2.1. Derin ve çok derin çürük lezyonlarının tanımlanması

Lezyonun derinliği, pulpanın açığa çıkma riskinin değerlendirilmesinde ve tedavi yönteminin seçiminde önemlidir. Radyografide dentinin pulpal üçlüsüne veya dörtte birlik bölümüne kadar ilerleyen lezyonlar genel olarak derin çürük lezyonu kabul edilir. Daha güncel sınıflandırmalarda derin ve çok derin lezyonlar ayrıca tanımlanmıştır. Derin lezyonda radyolüsensi dentinin pulpal dörtte birlik bölümüne ulaşır, ancak lezyon ile pulpa arasında seçilebilen bir dentin bandı

vardır. Çok derin lezyonda ise radyolüsensi dentin kalınlığının tamamına yaklaşır ve pulpa üzerinde belirgin bir radyopak dentin bandı izlenmez (Duncan et al., 2019; Demant et al., 2021; Hamilton & Ricketts, 2026).

Çok derin lezyonlarda bakteriyel penetrasyonun ve pulpal inflamasyonun daha ileri olabildiği histolojik olarak gösterilmiştir; bu nedenle pulpa açığa çıkma olasılığı işlem öncesinde göz önünde bulundurulmalıdır (Demant et al., 2021). Radyografik görüntü üzerinden arada kesin olarak dentin bandının bulunduğunu söylemek mümkün değildir. Çekim açısı, görüntü kalitesi, lezyonun bukkal-lingual konumu ve anatomik yapıların üst üste gelmesi değerlendirmeyi etkileyebilir. İki boyutlu görüntüde pulpa üzerinde dentin görülmesi, o bölgede güvenli bir kalınlığın bulunduğunu kesin olarak göstermez. Radyografik bulgular klinik öykü, pulpa duyarlılık testleri ve işlem sırasında karşılaşılan dentinin özellikleriyle birlikte yorumlanmalıdır (Duncan et al., 2019).

Derinlik sınıflaması yalnızca lezyon ile pulpa arasındaki radyografik mesafeyi anlatmaz; aynı zamanda pulpanın karşı karşıya olduğu biyolojik riske ilişkin fikir verir. Aynı derinlikte görünen iki dişin lezyon aktivitesi, pulpa odasının hacmi, hastanın yaşı, dentin sklerozu ve tersiyer dentin oluşumu farklı olabilir. Bu yüzden radyografik derinlik tek başına karar ölçütü değildir; tedavi planının oluşturulmasında kullanılan risk göstergelerinden biridir.

2.2. Çürük dentinin klinik özellikleri

Çürük dentin histolojik olarak dıştaki enfekte tabaka ve içteki çürükten etkilenmiş tabaka şeklinde incelenir. Dış tabakada mineral kaybı ve bakteriyel yük fazladır; kollajen yapı da ileri derecede bozulmuştur. İç tabakada demineralizasyon bulunmasına rağmen kollajen matriksin önemli bir kısmı korunur ve doku uygun koşullarda remineralize olabilir. Ne var ki bu iki tabaka arasında klinikte kolayca görülebilen kesin bir sınır yoktur. Dolayısıyla kavitede nerede durulacağına yalnızca bu histolojik ayrımdan hareketle karar verilemez (Innes et al., 2016; Hamilton & Ricketts, 2026).

Klinikte en kullanışlı ölçüt dentinin sertliğidir. Yumuşak dentin, sert bir aletle bastırıldığında şekil değiştirir ve keskin bir ekskavatörle çok az kuvvet uygulanarak alınabilir. Derimsi dentin belirgin biçimde deforme olmaz, fakat fazla kuvvet gerektirmeden tabaka hâlinde kaldırılabilir ve hafif yapışkan hissedilir. Sıkı dentin el aletine direnç gösterir; uzaklaştırılması için belirli bir basınç gerekir. Sert dentin ise ancak keskin bir alet ya da döner aletle kaldırılabilir. Bu klinik terimler uluslararası uzlaşı metninde tanımlanmış olmakla birlikte değerlendirme yine de bütünüyle nesnel değildir; aynı dentin farklı klinisyenler tarafından sıkı veya derimsi olarak değerlendirilebilir (Innes et al., 2016).

Dentin rengi güvenilir bir bitiş ölçütü değildir. Pulpa yakınındaki çürükten etkilenmiş dentin koyu renkli olsa bile sıkı olabilir ve uzaklaştırılması

gerekmeyebilir. Çürük belirleyici boyalar da yalnızca enfekte dentini boyamaz; pulpa yakınındaki fizyolojik olarak daha az mineralize dentin ve mine-dentin birleşimindeki alanlar da boyanabilir. Boyanan her alanın uzaklaştırılması, kavitenin gereksiz yere genişlemesine ve pulpanın açığa çıkma riskinin artmasına yol açabilir (McComb, 2000). Bu nedenle pulpal duvarda renkten çok dentinin kıvamı, nemi ve el aletine gösterdiği direnç dikkate alınmalıdır (Lim et al., 2023; Hamilton & Ricketts, 2026).

2.3. Pulpa-dentin kompleksinin yanıtı

Pulpa ile dentin, odontoblastlar ve dentin tübülleri aracılığıyla birbirine bağlıdır ve birlikte pulpa-dentin kompleksini oluşturur. Lezyon ilerledikçe bakteriyel ürünler ve asidik uyaranlar dentin tübülleri boyunca pulpaya ulaşır. Pulpa-dentin kompleksi buna tübüler skleroz, tersiyer dentin oluşumu ve inflamatuvar yanıtla karşılık verir. Uyaran şiddetlendikçe inflamasyonun kontrolü zorlaşır. Buna karşılık bakteriyel aktivitenin azaltılması ve kavitenin iyi bir restorasyonla kapatılması, pulpanın savunma ve onarım kapasitesini destekler (Farges et al., 2015; Bjørndal et al., 2019).

Pulpanın bu yanıtı, pulpa yakınındaki bütün yumuşamış dentinin neden her olguda uzaklaştırılmadığını da açıklar. Pulpa üzerindeki dentin yalnızca mekanik bir bariyer değildir; pulpayı operatif travma, ısı ve restoratif işlemlerin kimyasal etkilerinden de korur. Kalan dentinin çok ince olduğu bir bölgede birkaç ek frez ya da ekskavatör hareketi, kaviteyi daha temiz hâle getirirken pulpa açısından daha büyük bir zarar doğurabilir. Derin ve çok derin lezyonlarda pulpal yanıtın aynı olmadığı da gösterilmiştir (Demant et al., 2021). Bu nedenle başarı, kavitede görülen her renkli dokunun kaldırılmasıyla değil, pulpanın canlı tutulması ve lezyonun yeniden aktif hâle gelmeyecek biçimde kapatılmasıyla değerlendirilir (Farges et al., 2015).

3. Klinik ve Radyografik Değerlendirme

3.1. Klinik öykü ve pulpal değerlendirme

Selektif çürük dokusu uzaklaştırma planlanırken önce pulpal ve periapikal durum değerlendirilir. Ağrının spontan başlayıp başlamadığı, uyaran kalktıktan sonra sürüp sürmediği, gece ağrısı, ısırma hassasiyeti, analjezik gereksinimi ve şikâyetlerin zaman içindeki seyri sorgulanır. Uyaranla başlayan ve kısa sürede sona eren ağrı normal pulpa veya geri dönüşümlü pulpitis ile daha uyumludur. Spontan, şiddetli ya da uzun süren ağrı ise daha ileri pulpal inflamasyonu düşündürür (Duncan et al., 2019). Yine de semptomlarla pulpanın histolojik durumu arasında her zaman birebir ilişki bulunmadığı akılda tutulmalıdır (Bjørndal et al., 2019).

Soğuk testi ve elektrikli pulpa testi pulpanın kanlanmasını değil, sinir yanıtını ölçer; dolayısıyla bunlar vitalite değil, duyarlılık testleridir. Sonuçlar komşu ve karşıt dişlerle karşılaştırılarak yorumlanmalıdır. Perküsyon ve palpasyon ise

periapikal dokular hakkında bilgi verir. Fistül, şişlik, patolojik mobilite, belirgin perküsyon hassasiyeti ya da nekrozla uyumlu bulgular varsa yalnızca restoratif tedaviyle yetinilemez. ESE görüş belgesi ile S3 rehberindeki selektif ve basamaklı uzaklaştırma önerileri, öncelikle semptomsuz veya geri dönüşümlü pulpitis belirtileri gösteren vital daimi dişler için geçerlidir (Duncan et al., 2019; Schwendicke et al., 2026).

3.2. Radyografik değerlendirme

Posterior dişlerde uygun açılı bite-wing radyografiler lezyon derinliğinin ve proksimal uzanımın görülmesini kolaylaştırır; gerekli durumlarda periapikal radyografiden de yararlanılır. Lezyonun dentinin hangi bölümüne kadar ilerlediği, pulpa ile arasında belirgin bir dentin bandı bulunup bulunmadığı, pulpa odasının genişliği, mevcut restorasyonlar ve periapikal dokular birlikte incelenir. Pulpa odasındaki daralma veya sklerotik görünüm uzun süredir devam eden bir uyaranı düşündürebilir, ancak tek başına pulpanın sağlıklı olduğunu göstermez (Duncan et al., 2019; Bjørndal et al., 2019).

Radyografide lezyonun pulpaya yakın görünmesi, işlem sırasında mutlaka perforasyon meydana geleceği anlamına gelmez. Benzer şekilde, arada dentin bandı görülmesi de riski bütünüyle ortadan kaldırmaz. Özellikle çok derin lezyonlarda olası perforasyon ihtimali hasta ile önceden konuşulmalı; uygun izolasyon, gerekli materyaller ve pulpa müdahalesi için hazırlık yapılmadan tedaviye başlanmamalıdır.

3.3. Olgu seçimi ve restoratif uygunluk

Bu tedavi; dişin restore edilebilir olduğu, pulpa nekrozu veya apikal periodontitis bulgusu bulunmadığı ve klinik tablonun normal pulpa ya da geri dönüşümlü pulpitis ile uyumlu olduğu olgularda düşünülmelidir. Hastanın tedaviye uyumu, ağız hijyeni ve çürük aktivitesinin yanı sıra izolasyonun sağlanabilirliği, kavite sınırlarına erişim, dişte çatlak bulunması ve kalan dokuların restorasyonu taşıyıp taşıyamayacağı da değerlendirilir. Güvenilir bir koronal sızdırmazlık sağlanamayacaksa pulpa yakınında bırakılan dentinin kontrol altında tutulması güçleşir (Duncan et al., 2019; Dhar et al., 2023).

Çok derin lezyonlarda restoratif tedavinin sınırları daha dikkatli çizilmelidir. Pulpanın açığa çıkması durumunda izlenecek yol; pulpal tanıya, kanamanın özelliklerine, hekimin deneyimine ve mevcut ekipmana göre değişir. Bu bölüm, açığa çıkmış pulpa olmadan tamamlanan restoratif tedaviyi kapsamaktadır. Pulpa perforasyonu sonrası doğrudan pulpa örtüleme veya pulpotomi gibi vital pulpa tedavileri ayrı bir değerlendirme gerektirir ve selektif çürük dokusu uzaklaştırmanın sıradan bir devamı olarak görülmemelidir.

4. Derin Çürük Lezyonlarında Çürük Dokusunu Uzaklaştırma Yaklaşımları

Çürük dokusunu uzaklaştırma yöntemleri, pulpal ve periferik bölgelerde hedeflenen dentin sertliğine ve işlemin tek ya da iki seansta tamamlanmasına göre tanımlanır. Terminolojinin doğru kullanılması burada önem taşır. "Tam", "kısmi" veya "eksik" çürük temizleme ifadeleri ne kadar dentin bırakıldığını açık biçimde anlatmadığı gibi, selektif yöntemin yetersiz yapılmış bir işlem gibi algılanmasına da neden olabilir. Bu nedenle non-selektif, selektif ve basamaklı çürük dokusu uzaklaştırma terimleri kullanılmaktadır (Innes et al., 2016; Hamilton & Ricketts, 2026; Schwendicke et al., 2026).

4.1. Non-selektif çürük dokusu uzaklaştırma

Non-selektif çürük dokusu uzaklaştırmada kavitenin periferik ve pulpal bölgelerinde sert dentine ulaşılır. Geçmişte "tam çürük temizleme" adıyla uygulanan bu yöntemde, remineralizasyon potansiyeli bulunan demineralize dentin de uzaklaştırılabilir. Lezyon derinleştikçe pulpa yakınında sert dentine ulaşmaya çalışmak, sağlam dokunun kaybına ve pulpa perforasyonuna daha fazla zemin hazırlar.

Uluslararası uzlaşı ve ADA rehberi, ileri derinlikteki lezyonlarda doku koruyucu yaklaşımlara öncelik vermektedir (Schwendicke et al., 2016; Dhar et al., 2023). Burada periferik dentin ile pulpal dentin arasındaki fark gözden kaçırılmamalıdır. Kavitenin çevresinde sert ve temiz bir bağlanma alanı gereklidir; sakınılması gereken, aynı sertlik hedefinin pulpa duvarına da uygulanmasıdır.

4.2. Sıkı dentine kadar selektif çürük dokusu uzaklaştırma

Sıkı dentine kadar selektif çürük dokusu uzaklaştırmada kavitenin periferinde sert dentine ulaşılırken pulpa yakınındaki bölgede sıkı veya derimsi dentinde durulur. Bu yaklaşım, radyografik olarak dentinin iç üçlüsüne ilerleyen ancak pulpal dörtte birlik bölümüne ulaşmayan ve pulpanın açığa çıkma riskinin görece düşük olduğu lezyonlarda uygulanabilir. Pulpa duvarındaki renkli ancak el aletine direnç gösteren dentin yalnızca rengi nedeniyle uzaklaştırılmamalıdır (Innes et al., 2016; Lim et al., 2023). Buna karşılık pulpal dörtte birlik bölüme ulaşan derin lezyonlarda pulpa üzerindeki dentinin daha fazla korunması amacıyla yumuşak dentine kadar selektif uzaklaştırma tercih edilmektedir (Schwendicke et al., 2026).

4.3. Yumuşak dentine kadar selektif çürük dokusu uzaklaştırma

Yumuşak dentine kadar selektif çürük dokusu uzaklaştırmada periferde sert dentin elde edilirken perfore olma riski taşıyan pulpa duvarında bir miktar yumuşak dentin bırakılır. Bu karar yalnızca lezyonun en derin pulpal bölgesi için geçerlidir. Kavite kenarlarında, mine-dentin birleşiminde ve restorasyonun

bağlanacağı yüzeylerde yumuşak dentin bırakılması marjinal sızdırmazlığı tehlikeye atabilir.

İşlem genellikle tek seansta tamamlanır ve restorasyon aynı seansta yerleştirilir. Böylece ikinci seansta kaviteyi yeniden açarken oluşabilecek doku kaybı ve pulpa perforasyonu riski ortadan kalkar. Geride bırakılan dentinin yeniden besin kaynağıyla temas etmemesi için restorasyonun uzun süre sızdırmaz kalması gerekir. ADA rehberi ile güncel klinik çalışmalar, ileri derinlikteki lezyonlarda tek seanslı selektif yaklaşımın uygulanabilir olduğunu göstermektedir (Dhar et al., 2023; Gözetici-Çil et al., 2025). S3 rehberi de semptomsuz veya geri dönüşümlü pulpitis belirtileri bulunan derin çürüklü daimi dişlerde non-selektif uzaklaştırma yerine yumuşak dentine kadar selektif uzaklaştırmayı önermektedir; ancak öneriyi destekleyen kanıtın kesinliği çok düşüktür (Schwendicke et al., 2026).

4.4. Basamaklı çürük dokusu uzaklaştırma

Basamaklı çürük dokusu uzaklaştırma iki seanslı bir yöntemdir. İlk seansta periferde sert dentin hazırlanır, pulpa yakınında yumuşak dentin bırakılır ve kavite dayanıklı bir geçici restorasyonla kapatılır. Bekleme süresinde biyofilm aktivitesinin azalması, kalan dentinin daha kuru ve sert hâle gelmesi ve pulpa-dentin kompleksinin savunma yanıtı vermesi beklenir. Basamaklı ekskavasyon sırasında mikrobiyal yükte azalma ve dentinin klinik olarak daha kuru ve sert hâle gelmesi, ilk klinik-mikrobiyolojik çalışmalarla gösterilmiştir (Bjørndal et al., 1997). İkinci seansta geçici restorasyon kaldırılır, pulpal bölgede sıkı dentine ulaşacak kadar ek uzaklaştırma yapılır ve daimi restorasyona geçilir.

Basamaklı uzaklaştırma, non-selektif yönteme göre pulpanın açığa çıkma riskini azaltabilir. Bu fark, bir ve beş yıllık sonuçları bildirilen randomize çalışmalarda da görülmüştür (Bjørndal et al., 2010, 2017). Öte yandan ikinci seans ek zaman ve maliyet gerektirir; hastanın kontrole gelmemesi, geçici restorasyonun kaybedilmesi ve işlem sırasında perforasyon oluşması gibi sorunlar vardır. Tek seanslı selektif yaklaşım ile basamaklı yöntemi karşılaştıran çalışmalar, genel başarı bakımından tutarlı bir üstünlük göstermemiştir (Labib et al., 2019; Maltz et al., 2018; Ramezanzade et al., 2026). Seçim yapılırken lezyonun derinliği, hastanın uyumu, geçici restorasyonun güvenilirliği ve yeniden girişin gerçekten yarar sağlayıp sağlamayacağı birlikte değerlendirilmelidir.

5. Selektif Çürük Dokusu Uzaklaştırmanın Klinik Uygulaması

5.1. İzolasyon ve kaviteye erişim

Proksimal lezyonlarda matriksin yerleştirilebilmesi ve restorasyonun doğru biçimde yapılabilmesi için yeterli erişim sağlanmalıdır. Buna karşın kavite, geleneksel retansiyon formu oluşturmak amacıyla gereksiz yere

genişletilmemelidir. Kırılma riski taşıyan desteksiz mine uzaklaştırılırken korunabilecek mine ve dentin dokusu bırakılmalıdır.

Rezin kompozit gibi neme duyarlı adeziv materyaller kullanılacaksa rubber dam ile izolasyon tercih edilir. Böylece tükürük ve sulkus sıvısı kontaminasyonu azaltılır, görüş alanı ve çalışma rahatlığı artar. Çok derin lezyonlarda beklenmedik bir pulpa perforasyonu olabileceği için kontrollü ve aseptik çalışma ortamı ayrıca önemlidir. İzolasyondan sonra çürük mine kaldırılır ve dentin lezyonuna doğrudan erişim sağlanır. Döner aletler bol su soğutması altında ve kontrollü kullanılmalıdır (Lim et al., 2023).

5.2. Periferik sızdırmazlık bölgesinin oluşturulması

Selektif uzaklaştırmanın başarısı büyük ölçüde periferik sızdırmazlık bölgesine (peripheral seal zone) bağlıdır. Kavite kenarları, mine-dentin birleşimi ve restorasyonun bağlanacağı periferik dentin sert ve temiz olmalıdır. Bu alanlarda bırakılan yumuşak dentin adeziv bağlanmayı ve marjinal bütünlüğü zayıflatabilir. Pulpa duvarında ise aynı sertliğe ulaşmak gerekmez. Başka bir deyişle, kavitenin periferinde ve pulpal bölümünde aynı bitiş ölçütü kullanılmaz (Schwendicke et al., 2016; Lim et al., 2023).

Periferdeki yumuşak dentin, kavitenin boyutuna uygun büyük çaplı bir çelik rond frezle düşük devirde uzaklaştırılabilir. Büyük çaplı frez, küçük çaplı frezlere kıyasla dentinde kontrolsüz oyuk oluşturma riskini azaltır. Yine de mine-dentin birleşimi gereksiz yere genişletilmemeli ve kalan tüberküllerin mekanik durumu göz önünde bulundurulmalıdır. Fonksiyon altında kırılması beklenen desteksiz mine uzaklaştırılır; yalnızca renk değişikliği gösteren korunabilir mine feda edilmez. Periferdeki amaç bütün renklenmeleri ortadan kaldırmak değil, restorasyon için sağlam bir çevresel doku oluşturmaktır.

5.3. Pulpal bölgede kontrollü uzaklaştırma

Periferdeki işlemler tamamlandıktan sonra pulpa yakınındaki dentine geçilir. Lezyonun derinliğine göre sıkı ya da yumuşak dentinde durulur. Keskin bir ekskavatör dokunun kıvamını hissetmeye ve küçük, kontrollü hareketlerle ilerlemeye olanak verir. Döner aletlerin kullanımında hassasiyet daha azdır; bu nedenle pulpa yönünde kullanıldıklarında gereğinden fazla dentin kaldırılabilir. Pulpal duvardaki bitiş noktasına renge göre değil, dokunun sertliğine ve el aletine gösterdiği dirence göre karar verilmelidir (Hamilton & Ricketts, 2026; Lim et al., 2023).

Pulpa duvarında yumuşak dentin bırakılması, kavitenin diğer bölgelerinde de aynı şekilde davranılacağı anlamına gelmez. Yalnızca perforasyon riski taşıyan en derin bölgede agresif ekskavasyondan kaçınılır. Daimi restorasyon için yeterli alan bırakılmalı, ancak materyale yer açma gerekçesiyle pulpa üzerindeki dentin daha fazla inceltilmemelidir. İşlem sırasında perforasyondan şüphelenilirse bölge dikkatle değerlendirilir ve doğrudan planlanan restoratif aşamaya geçilmez.

5.4. Daimi restorasyonun yerleştirilmesi

Selektif uzaklaştırmada uzun dönemli başarının en önemli belirleyicilerinden biri koronal sızdırmazlıktır. Beş yıllık klinik veriler, pulpa yakınında dentin bırakılmasının restorasyonun sağkalımını tek başına olumsuz etkilemediğini; tek seanslı selektif ve basamaklı yöntemlerden sonra benzer restoratif sonuçlar alınabildiğini göstermektedir (Jardim et al., 2020). Benzer bulgular kompozit restorasyonların 18 aylık değerlendirmesinde de bildirilmiştir (Recchi et al., 2024). Restoratif materyal; kavitenin büyüklüğü, kalan dokular, oklüzal yük, izolasyon koşulları ve klinisyenin deneyimine göre seçilmelidir. Rezin kompozit kullanıldığında üreticinin önerdiği adeziv protokol dikkatle uygulanmalı; kontaminasyon, yetersiz solvent uzaklaştırılması, eksik polimerizasyon ve hatalı matriks adaptasyonundan kaçınılmalıdır.

Proksimal kavitelerde uygun matriks ve kama kullanımı servikal marjinin adaptasyonunu, kontaktın ve proksimal konturun yeniden oluşturulmasını kolaylaştırır. Kompozit, kullanılan materyalin izin verdiği polimerizasyon derinliğine uygun kalınlıkta yerleştirilmelidir. Geleneksel kompozitlerde tabakalama yapılabilir; bulk-fill materyallerde ise üreticinin bildirdiği tabaka kalınlığı aşılmamalıdır. Son aşamada marjinal fazlalıklar uzaklaştırılır; kontakt alanı, oklüzal ilişkiler ve yüzey bütünlüğü kontrol edilir.

6. Kavite Linerları: Rutin Kullanım Gerekli mi?

6.1. Kullanım gerekçesi ve materyaller

Kavite linerları uzun yıllardır derin restorasyonlarda pulpayı termal, kimyasal ve mekanik uyaranlardan korumak, postoperatif hassasiyeti azaltmak ve tersiyer dentin oluşumunu desteklemek amacıyla kullanılmaktadır. Kalsiyum hidroksit, cam iyonomer siman, rezin modifiye cam iyonomer siman, hidrolik kalsiyum silikat simanları ve rezin içeren kalsiyum silikat esaslı materyaller bu grupta yer alır. Bununla birlikte farklı liner materyallerini karşılaştıran klinik çalışmalarda tedavi başarısının her zaman kullanılan materyale bağlı olmadığı bildirilmiştir (Petrou et al., 2014). Bir materyalin laboratuvar ortamındaki biyolojik özellikleri, klinikte mutlaka daha başarılı olacağı anlamına gelmez.

Pulpanın perfore olmadığı bir kavitede liner uygulamak ile perfore pulpayı tedavi etmek aynı işlem değildir. Selektif uzaklaştırmada liner, korunmuş dentin bariyeri üzerine ince bir tabaka hâlinde yerleştirilir. Pulpanın perfore olması sonrası kullanılan doğrudan pulpa örtüleme veya pulpotomi materyallerinin ise farklı endikasyonları vardır. Her iki durumun “pulpa koruma” adı altında bir arada değerlendirilmesi, liner kullanımına ilişkin sonuçların yanlış yorumlanmasına neden olabilir.

6.2. Güncel kanıtların değerlendirilmesi

Kosan ve arkadaşlarının sistematik derlemesine 12 çalışma ve toplam 1184 diş dahil edilmiştir. Liner kullanılan restorasyonlarla liner kullanılmayan restorasyonlar arasında tedavi başarısızlığı, pulpa canlılığı, postoperatif hassasiyet, sekonder çürük ve restorasyonun uzun ömürlülüğü bakımından tutarlı bir fark bulunmamıştır. Çalışmalarda diş sağkalımı %94–100, restorasyon başarısızlığı ise %0–6 arasında bildirilmiştir. Çalışma protokollerindeki farklılıklar, küçük örneklemler ve sınırlı takip süreleri nedeniyle kanıt kesinliği çoğu sonuç için düşük, postoperatif hassasiyet için çok düşük düzeydedir (Kosan et al., 2025).

Aynı sistematik derlemeyi esas alan S3 rehberi, semptomsuz veya geri dönüşümlü pulpitis belirtileri bulunan derin çürüklü vital daimi dişlerde linerın rutin olarak uygulanmamasını önermektedir. Bu öneri, linerın hiçbir durumda kullanılamayacağı anlamına gelmez. Beş yıllık bir randomize çalışmada yumuşak dentine kadar selektif uzaklaştırılan dişlerde kalsiyum silikat uygulanarak veya uygulanmadan yüksek başarı oranları bildirilmiş; kalsiyum silikatın özellikle daha derin kavitelerde dentin köprüsü oluşumunu destekleyebildiği görülmüştür (Gözetici-Çil et al., 2025). Bununla birlikte mevcut bulgular, linerın her olguda ek klinik yarar sağladığını göstermemektedir. Kalan dentinin çok ince olduğu düşünülen seçilmiş durumlarda klinisyen liner kullanmayı tercih edebilir; ancak kalan dentin kalınlığı klinikte güvenilir biçimde ölçülemediğinden kesin bir kalınlık sınırı vermek mümkün değildir (Kosan et al., 2025; Schwendicke et al., 2026).

Liner, iyi yapılmamış bir adeziv işlemi veya yetersiz marjinal sızdırmazlığı telafi edemez. Düşük dayanımlı bir materyalin geniş alana yerleştirilmesi restorasyon altında zayıf bir tabaka oluşturabilir ve adeziv bağlanma alanını azaltabilir. Kullanılmasına karar verilirse liner yalnızca pulpa yakınındaki sınırlı bölgeye ve üreticinin önerdiği kalınlıkta uygulanmalı, periferik mine ve dentin bağlanma için açık bırakılmalıdır. Doku koruması, izolasyon, doğru materyal seçimi ve marjinal adaptasyon klinik başarı açısından liner kullanımından daha belirleyicidir.

7. Tedavi Yaklaşımlarının Klinik Sonuçları ve Güncel Kanıtlar

7.1. Pulpa perforasyonu ve tedavi başarısı

Ramezanzade ve arkadaşlarının sistematik derleme ve ağ meta-analizinde selektif, basamaklı ve non-selektif çürük dokusu uzaklaştırma yöntemleri karşılaştırılmıştır. Taranan 819 kaydın 19'u derlemeye alınmıştır. Çalışmaların yarıdan fazlasında yüksek yanlılık riski saptanmış, sonuçların çoğu için kanıt kesinliği düşük ya da çok düşük bulunmuştur. Ağ meta-analizinde başarı sıralamasında basamaklı yöntem ilk sırada yer almış (NSE referans alındığında RR=1,11; %95 GA: 1,00–1,23), onu selektif yöntem izlemiştir (RR=1,06; %95

GA: 0,97–1,16). Ancak gruplar arasındaki fark istatistiksel olarak anlamlı değildir (Ramezanzade et al., 2026).

Daha belirgin görünen bulgu, selektif ve basamaklı uzaklaştırmada pulpa perforasyonunun non-selektif uzaklaştırmaya göre daha az olmasıdır. Basamaklı yöntemin non-selektif uzaklaştırmayla karşılaştırıldığı randomize çalışmada bu üstünlük bir ve beş yıllık takiplerde korunmuştur (Bjørndal et al., 2010, 2017). Tek seanslı selektif uzaklaştırmanın basamaklı yöntemle karşılaştırıldığı çok merkezli çalışmada ise beş yılda pulpa canlılığının korunması selektif grupta %80, basamaklı grupta %56 olarak bildirilmiştir (Maltz et al., 2018). S3 rehberi de bu iki koruyucu yöntemin non-selektif uzaklaştırmaya tercih edilmesini önermekte, ancak selektif ve basamaklı yöntemler arasında kesin bir üstünlük bildirmemektedir (Schwendicke et al., 2026).

Dolayısıyla her derin lezyon için tek bir yöntem önermek doğru olmaz. Radyografide dentinin iç üçlüsüne ulaşan ancak pulpal dörtte birlik bölüme ilerlemeyen lezyonlarda tek seanslı selektif uzaklaştırma daha uygun olabilir. İç dörtte birlik bölüme ulaşan lezyonlarda hem selektif hem de basamaklı yöntem değerlendirilebilir. Çok derin lezyonlar için kanıt daha sınırlıdır ve perforasyon riski daha yüksektir (Duncan et al., 2019; Dhar et al., 2023). Karar verirken hastanın ikinci seansa gelip gelemeyeceği, geçici restorasyonun güvenilirliği, maliyet ve hekimin olası bir pulpa perforasyonunu yönetme koşulları göz önünde bulundurulmalıdır.

7.2. Pulpa canlılığı, semptomlar ve restoratif sonuçlar

Tedavinin başarılı sayılması için işlem sırasında pulpanın açığa çıkmaması tek başına yeterli değildir. Takipte pulpa canlılığının korunması, spontan ağrı ve apikal patoloji gelişmemesi, restorasyonun işlevini sürdürmesi, yeniden restoratif veya endodontik tedavi gerekmemesi ve dişin ağızda kalması birlikte değerlendirilmelidir. Uzun dönemli klinik çalışmalarda başarı; duyarlılık testine pozitif yanıt, perküsyonda ağrı olmaması, spontan ağrı ve periapikal lezyon bulunmaması gibi birleşik ölçütlerle tanımlanmıştır (Bjørndal et al., 2017; Maltz et al., 2018). Ancak derlemelere alınan bütün çalışmalarda aynı ölçütler kullanılmadığından yöntemlerin doğrudan karşılaştırılması güçleşmektedir.

Selektif uzaklaştırma pulpa yakınındaki dentinin korunmasını sağlar. Kavite sızdırmaz biçimde kapatıldığında, geride kalan mikrobiyotanın ağız ortamından besin alamaması mikrobiyal yükü ve çeşitliliği azaltır (Paddick et al., 2005). Ancak restorasyonun sızdırmazlığı bozulduğunda geride bırakılan doku yeniden ağız ortamıyla ilişki kurabilir ve lezyon aktif hâle gelebilir. Bu nedenle marjinal kırık, retansiyon kaybı veya sekonder çürük yalnızca restorasyonla ilgili sorunlar değildir; pulpal prognozu da etkiler. Marjinal sorunların erken fark edilip yönetilmesi, tedavinin uzun dönemli başarısı açısından önemlidir.

Uzun ve kısa dönemli klinik çalışmalar genel olarak selektif yaklaşım lehine güven verici sonuçlar sunmaktadır. Beş yıllık bir çalışmada selektif ve basamaklı uzaklaştırma sonrasında restorasyon sağkalımı sırasıyla %79 ve %76 bulunmuştur (Jardim et al., 2020). Yumuşak dentine kadar selektif uzaklaştırmayı değerlendiren başka bir beş yıllık çalışmada başarı %94,1–100 arasında bildirilmiştir (Gözetici-Çil et al., 2025). Kompozit restorasyonların 18 aylık değerlendirmesinde de selektif ve basamaklı gruplar arasında anlamlı fark görülmemiştir (Recchi et al., 2024). Yakın tarihli başka bir randomize çalışmada selektif uzaklaştırma, pulpa duyarlılığı ve restorasyon kalitesi bakımından 18 aya kadar etkili bulunmuştur (Barros et al., 2025). Bununla birlikte örneklem büyüklükleri, takip kayıpları ve olgu tanımlarındaki farklılıklar nedeniyle bu sonuçlar her klinik durum için aynı başarıyı garanti etmez.

7.3. Kanıtların sınırlılıkları

Literatürün değerlendirilmesini güçleştiren başlıca sorun, lezyon derinliğinin ve operatif bitiş noktalarının çalışmalarda aynı biçimde tanımlanmamasıdır. "Kısmi", "eksik", "selektif" ve "indirekt pulpa örtüleme" gibi terimler, geride farklı miktarlarda dentin bırakılan işlemler için kullanılmıştır. Uluslararası araştırmalarda yumuşak, derimsi, sıkı ve sert dentin ile selektif, basamaklı ve non-selektif uzaklaştırma terimlerinin tanımlanmasının temel nedeni bu karışıklığı azaltmaktır (Innes et al., 2016). Bazı araştırmalarda yumuşak ve sıkı dentin ayrımı yapılmamış, pulpa canlılığı ve başarısızlık ölçütleri de standart biçimde raporlanmamıştır. Bu yüzden farklı çalışmaların aynı işlemi değerlendirdiğini varsaymak her zaman mümkün değildir.

Küçük örneklemler, takip kayıpları, kısa değerlendirme süreleri ve yanlılık riski de sonuçların kesinliğini azaltmaktadır. Cochrane derlemesinde konservatif çürük dokusu uzaklaştırma yaklaşımlarının olası yararları bildirilmekle birlikte, çalışmalar arasındaki farklılıklar ve kanıt kesinliğinin düşüklüğü vurgulanmıştır (Schwendicke et al., 2021). Ramezanzade ve arkadaşlarının derlemesinde çalışmaların yarıdan fazlası yüksek yanlılık riski taşımış; S3 rehberinde birçok sonuç için kanıt düzeyi düşük veya çok düşük bulunmuştur (Ramezanzade et al., 2026; Schwendicke et al., 2026). Dolayısıyla yöntemler arasında bildirilen küçük farklar kesin üstünlük olarak yorumlanmamalıdır. Özellikle çok derin lezyonlar, olgunlaşmamış daimi dişler ve uzun dönemli diş sağkalımı için daha standart klinik çalışmalara ihtiyaç vardır.

8. Klinik Takip ve Başarı Kriterleri

Restorasyon tamamlandıktan sonra başlangıçtaki pulpal tanı, radyografik derinlik, uygulanan uzaklaştırma yöntemi, pulpal bölgede hangi sertlikte dentinde durulduğu ve liner kullanılıp kullanılmadığı hasta kaydına yazılmalıdır. Bu kayıtlar daha sonra semptom geliştiğinde veya restorasyonun yenilenmesi gerektiğinde yol gösterir. "Kavitede çürük bırakıldı" biçimindeki belirsiz bir

ifade yerine, selektif yöntemin planlı olarak uygulandığı ve periferde sert dentin elde edildiği açıkça belirtilmelidir.

Kontrollerde spontan ağrı, uzamış termal hassasiyet, çiğneme ağrısı ve şişlik sorgulanır. Gerektiğinde pulpa duyarlılık testleri tekrarlanır ve başlangıç bulguları ile kontrol dişleriyle karşılaştırılır; perküsyon ve palpasyon değerlendirmesi yapılır. Radyografiler lezyon bölgesini ve periapikal dokuları izlemeye yardımcı olur. Pulpa yakınında bırakılan dentinin radyografide tamamen kaybolması beklenmez; renkli veya radyolüsent görünümün sürmesi tek başına başarısızlık kabul edilmez. Klinik ve radyografik bulguların birlikte değerlendirilmesi gerekir (Duncan et al., 2019; Bjørndal et al., 2019).

Takip sırasında restorasyonun marjinal bütünlüğü, kontaktı, yüzey özellikleri, kırık ve retansiyon kaybı da kontrol edilmelidir. Diş asemptomatik, klinik ve radyografik bulgular stabil, restorasyon işlevsel ise pulpa yakınında dentin bırakılmış olması kaviteyi yeniden açmak için bir gerekçe değildir. Yeni başlayan spontan ağrı, uzamış duyarlılık, perküsyon hassasiyeti, apikal değişiklik veya sızdırmazlık kaybı varsa pulpal tanı ve tedavi planı yeniden gözden geçirilir.

Kontrol aralığı hastanın ve dişin riskine göre belirlenir. Başlangıçtaki lezyon derinliği, pulpal bulgular, çürük riski, restorasyonun büyüklüğü ve ağız hijyeni bu kararı etkiler. Takip yalnızca tedavi edilen dişle sınırlı tutulmamalı; fermente olabilen karbonhidratların tüketim sıklığı, plak kontrolü, florür maruziyeti ve yeni lezyon gelişimi de değerlendirilmelidir. Restorasyon mevcut lezyonu kontrol altına alabilir, fakat çürük hastalığına yol açan riskleri tek başına ortadan kaldırmaz.

9. Sonuç ve Klinik Çıkarımlar

Derin çürüklü vital daimi dişlerde amaç, pulpayı canlı tutarken dişi sızdırmaz ve işlevsel bir restorasyonla tedavi etmektir. Bunun için kavitenin her yüzeyinde sert dentine ulaşmak gerekmez. Periferde bağlanmaya uygun sert bir alan hazırlanırken pulpa yakınında lezyonun derinliğine göre sıkı, derimsi veya yumuşak dentinde durulabilir. Böylece pulpa perforasyonu riski azaltılır ve sağlam diş dokusu gereksiz yere uzaklaştırılmaz.

Semptomsuz veya geri dönüşümlü pulpitis bulguları bulunan derin lezyonlarda selektif ve basamaklı uzaklaştırma, non-selektif yönteme göre daha fazla desteklenmektedir. İki koruyucu yöntemden hangisinin üstün olduğu ise kesin değildir. Tek seanslı selektif yöntem, yeniden giriş gerektirmemesi ve hasta uyumuna daha az bağlı olması nedeniyle birçok olguda daha pratik olabilir. Çok derin lezyonlarda pulpa perforasyonu ihtimali önceden hesaba katılmalı ve çalışma koşulları buna göre hazırlanmalıdır.

Kavite linerlarının rutin olarak kullanılmasının tedavi başarısını, pulpa canlılığını veya restorasyonun ömrünü artırdığı gösterilememiştir (Kosan et al., 2025). Bununla birlikte seçilmiş olgularda kalsiyum silikat esaslı bir linerın

dentin köprüsü oluşumuna katkı sağlayabileceğine ilişkin klinik bulgular vardır (Gözetici-Çil et al., 2025). Liner kullanılacaksa karar olguya göre verilmeli; liner, iyi izolasyonun, doğru adeziv işlemin ve marjinal sızdırmazlığın yerine konmamalıdır. Derin çürük lezyonlarının başarılı biçimde yönetilebilmesi; doğru pulpal tanıya, uygun olgu seçimine, periferik sızdırmazlık bölgesinin hazırlanmasına, pulpa yakınında kontrollü doku uzaklaştırılmasına, iyi bir daimi restorasyona ve düzenli takibe bağlıdır.

Kaynaklar

Barros, M. M. A. F., Sales, E. M. A., Vieira, P. H. A. G. P., Araújo, M. S., Muniz, F. W. M. G., & Rodrigues, L. K. A. (2025). Selective removal of dental caries in permanent teeth: An 18-month clinical trial. *Clinical Oral Investigations, 29*(5), 239. https://doi.org/10.1007/s00784-025-06320-6

Bjørndal, L., Larsen, T., & Thylstrup, A. (1997). A clinical and microbiological study of deep carious lesions during stepwise excavation using long treatment intervals. *Caries Research, 31*(6), 411–417. https://doi.org/10.1159/000262431

Bjørndal, L., Reit, C., Bruun, G., Markvart, M., Kjaeldgaard, M., Näsman, P., … Gluud, C. (2010). Treatment of deep caries lesions in adults: Randomized clinical trials comparing stepwise vs. direct complete excavation, and direct pulp capping vs. partial pulpotomy. *European Journal of Oral Sciences, 118*(3), 290–297. https://doi.org/10.1111/j.1600-0722.2010.00731.x

Bjørndal, L., Fransson, H., Bruun, G., Markvart, M., Kjældgaard, M., Näsman, P., … Thordrup, M. (2017). Randomized clinical trials on deep carious lesions: 5-year follow-up. *Journal of Dental Research, 96*(7), 747–753. https://doi.org/10.1177/0022034517702620

Bjørndal, L., Simon, S., Tomson, P. L., & Duncan, H. F. (2019). Management of deep caries and the exposed pulp. *International Endodontic Journal, 52*(7), 949–973. https://doi.org/10.1111/iej.13128

Demant, S., Dabelsteen, S., & Bjørndal, L. (2021). A macroscopic and histological analysis of radiographically well-defined deep and extremely deep carious lesions: Carious lesion characteristics as indicators of the level of bacterial penetration and pulp response. *International Endodontic Journal, 54*(3), 319–330. https://doi.org/10.1111/iej.13424

Dhar, V., Pilcher, L., Fontana, M., González-Cabezas, C., Keels, M. A., Mascarenhas, A. K., … Carrasco-Labra, A. (2023). Evidence-based clinical practice guideline on restorative treatments for caries lesions: A report from the American Dental Association. *Journal of the American Dental Association, 154*(7), 551–566.e51. https://doi.org/10.1016/j.adaj.2023.04.011

Duncan, H. F., Galler, K. M., Tomson, P. L., Simon, S., El-Karim, I., Kundzina, R., … Bjørndal, L. (2019). European Society of Endodontology position statement: Management of deep caries and the exposed pulp. *International Endodontic Journal, 52*(7), 923–934. https://doi.org/10.1111/iej.13080

Farges, J.-C., Alliot-Licht, B., Renard, E., Ducret, M., Gaudin, A., Smith, A. J., & Cooper, P. R. (2015). Dental pulp defence and repair mechanisms in dental caries. *Mediators of Inflammation, 2015*, 230251. https://doi.org/10.1155/2015/230251

Gözetici-Çil, B., Çetin, T., Bittar, A., & Özcan, M. (2025). Clinical outcomes of selective removal to soft dentin versus firm dentin for deep caries lesions: A randomized controlled trial up to 5 years. *Clinical Oral Investigations, 29*(1), 23. https://doi.org/10.1007/s00784-024-06109-z

Hamilton, A. R., & Ricketts, D. (2026). Management of deep caries. *British Dental Journal, 240*(5), 357–364. https://doi.org/10.1038/s41415-025-9350-7

Innes, N. P. T., Frencken, J. E., Bjørndal, L., Maltz, M., Manton, D. J., Ricketts, D., … Schwendicke, F. (2016). Managing carious lesions: Consensus recommendations on terminology. *Advances in Dental Research, 28*(2), 49–57. https://doi.org/10.1177/0022034516639276

Jardim, J. J., Mestrinho, H. D., Koppe, B., de Paula, L. M., Alves, L. S., Yamaguti, P. M., … Maltz, M. (2020). Restorations after selective caries removal: 5-year randomized trial. *Journal of Dentistry, 99*, 103416. https://doi.org/10.1016/j.jdent.2020.103416

Kosan, E., Kosan, D., Sturm, R., Schwendicke, F., & Paris, S. (2025). Efficacy of different cavity liners compared to no cavity lining in managing deep caries in vital permanent teeth: A systematic review. *Clinical Oral Investigations, 29*, 529. https://doi.org/10.1007/s00784-025-06479-y

Labib, M. E., Hassanein, O. E., Moussa, M., Yassen, A., & Schwendicke, F. (2019). Selective versus stepwise removal of deep carious lesions in permanent teeth: A randomised controlled trial from Egypt—An interim analysis. *BMJ Open, 9*(9), e030957. https://doi.org/10.1136/bmjopen-2019-030957

Lim, Z. E., Duncan, H. F., Moorthy, A., & McReynolds, D. (2023). Minimally invasive selective caries removal: A clinical guide. *British Dental Journal, 234*(4), 233–240. https://doi.org/10.1038/s41415-023-5515-4

Maltz, M., Koppe, B., Jardim, J. J., Alves, L. S., de Paula, L. M., Yamaguti, P. M., … Mestrinho, H. D. (2018). Partial caries removal in deep caries lesions: A 5-year multicenter randomized controlled trial. *Clinical Oral Investigations, 22*(3), 1337–1343. https://doi.org/10.1007/s00784-017-2221-0

McComb, D. (2000). Caries-detector dyes—How accurate and useful are they? *Journal of the Canadian Dental Association, 66*(4), 195–198.

Paddick, J. S., Brailsford, S. R., Kidd, E. A. M., & Beighton, D. (2005). Phenotypic and genotypic selection of microbiota surviving under dental restorations. *Applied and Environmental Microbiology, 71*(5), 2467–2472. https://doi.org/10.1128/AEM.71.5.2467-2472.2005

Petrou, M. A., Alhamoui, F. A., Welk, A., Altarabulsi, M. B., Alkilzy, M., & Splieth, C. H. (2014). A randomized clinical trial on the use of medical Portland cement, MTA and calcium hydroxide in indirect pulp treatment. *Clinical Oral Investigations, 18*(5), 1383–1389. https://doi.org/10.1007/s00784-013-1107-z

Ramezanzade, S., Bjørndal, L., Chen, H., & Baysan, A. (2026). Effectiveness of stepwise excavation or selective excavation in comparison with non-selective caries removal in managing deep caries in vital permanent teeth: A systematic review with trial sequential, pairwise, and network meta-analyses. *Caries Research, 60*(1), 80–109. https://doi.org/10.1159/000545052

Recchi, A. F., de Azambuja, R. S., Alves, L. S., Maltz, M., & Jardim, J. J. (2024). Restorations performance after selective caries removal to soft dentine: 18-month follow-up of a controlled clinical trial. *Journal of Dentistry, 147*, 105099. https://doi.org/10.1016/j.jdent.2024.105099

Schwendicke, F., Frencken, J. E., Bjørndal, L., Maltz, M., Manton, D. J., Ricketts, D., … 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

Schwendicke, F., Walsh, T., Lamont, T., Al-Yaseen, W., Bjørndal, L., Clarkson, J. E., … Innes, N. P. T. (2021). Interventions for treating cavitated or dentine carious lesions. *Cochrane Database of Systematic Reviews*, (7), CD013039. https://doi.org/10.1002/14651858.CD013039.pub2

Schwendicke, F., Kosan, E., Banerjee, A., Baysan, A., Bjørndal, L., Ceballos, L., … Dujic, H. (2026). Deep caries management: EFCD-ESE-ORCA S3-level clinical practice guideline. *Clinical Oral Investigations, 30*, 186. https://doi.org/10.1007/s00784-025-06727-1

BÖLÜM 2

Tek Renkli Renk Uyumlu Restoratif Materyaller: Optik Prensipler, Güncel Teknolojiler ve Klinik Performans

***Buse Kesgin*[1]**

[1] Dr. Öğretim Üyesi, Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Diş Hekimliği Fakültesi, Restoratif Diş Tedavisi, 0000-0001-9152-4472

Giriş

Estetik restoratif diş hekimliğinde, farklı diş renklerine uyum sağlayabilen tek renkli restoratif materyaller, klinik uygulamalarda renk seçimini kolaylaştırmaları ve estetik sonuçları iyileştirme potansiyelleri nedeniyle son yıllarda önemli ilgi görmektedir. Bu materyaller, geleneksel çok renkli sistemlerden farklı olarak yapısal renk oluşumu, ışık saçılması ve renk uyumlama mekanizmalarından yararlanarak geniş bir diş rengi yelpazesiyle uyum sağlamayı hedeflemektedir. Bu bölümde tek renkli renk uyumlu restoratif materyallerin optik prensipleri, geliştirilmesinde kullanılan güncel teknolojiler ve mevcut bilimsel kanıtlar doğrultusunda klinik performansları ele alınacaktır.

Doğal Diş Rengi ve Renk Uyumunun Optik Temelleri

Doğal diş rengi, tek ve homojen bir renk değerinden değil; ışık kaynağı, diş dokuları ve gözlemci arasındaki etkileşim sonucunda ortaya çıkan karmaşık bir optik görünümden oluşmaktadır. Diş yüzeyine ulaşan ışığın bir kısmı doğrudan yansırken bir kısmı mine ve dentin içerisine girerek kırılma, iletim, absorpsiyon ve saçılma olaylarına uğrar. Doku içerisinden yeniden yüzeye yönelen ışığın spektral özellikleri, dişin algılanan rengini belirler. Bu nedenle doğal diş görünümü yalnızca dokuların kendilerine özgü renginden değil, ışığın bu dokular içerisindeki ilerleyişinden ve dokular arasındaki etkileşiminden kaynaklanmaktadır (Forabosco & ark., 2024: 280-281; Ahmed, Jouhar & Khurshid, 2022: 4-5).

Dentin, doğal dişin temel renk tonu ve kromasının oluşumunda başlıca rolü üstlenirken mine, translüsent yapısıyla dentinden geri yansıyan ışığın görünür hâle gelmesini sağlayan optik bir filtre gibi davranmaktadır. Mine ve dentinin kalınlığı ile ışık geçirgenliğindeki bölgesel farklılıklar, aynı diş üzerinde servikal, orta ve insizal üçlüler arasında farklı renk görünümlerinin oluşmasına neden olur. Servikal bölgede minenin daha ince olması ve dentin etkisinin artması daha yüksek kromayla sonuçlanırken, insizal bölgede dentin desteğinin azalması ve arka plan etkisinin artması daha translüsent ve kimi zaman gri-mavimsi bir görünüm oluşturabilir. İnsizalden servikale doğru a* ve b* değerlerinin artması, translüsensinin ise azalması doğal dişin polikromatik yapısını ortaya koymaktadır (Tabatabaian & ark., 2021: 1088-1090).

Renk geleneksel olarak renk tonu, kroma ve değer olmak üzere üç temel boyutla tanımlanmaktadır. Renk tonu rengin kırmızı, sarı veya mavi gibi temel karakterini; kroma rengin doygunluğunu; değer ise açıklık-koyuluk derecesini ifade eder. Restoratif diş hekimliğinde renk uyumsuzluğunun fark edilmesinde değer önemli bir bileşen olmakla birlikte, doğal diş görünümünün taklit edilebilmesi için üç boyutun birlikte değerlendirilmesi gerekir. Ayrıca translüsensi, opasite, floresans, opalesans, yüzey dokusu ve parlaklık da restorasyonun görünümünü etkiler. Bu nedenle benzer renk koordinatlarına sahip iki yapı, ışığı farklı biçimde iletmesi veya saçması nedeniyle görsel olarak aynı

algılanmayabilir (Ahmed, Jouhar & Khurshid, 2022: 4-5; Saegusa & ark., 2021: 307-308).

Translüsensi, ışığın materyal içerisinden tamamen doğrusal olmayan ve saçılmaya uğrayan bir biçimde geçmesini ifade eder. Opasite ise ışık iletimini sınırlayarak alttaki yapının görünmesini engeller. Floresans, kısa dalga boylu ışığın absorbe edilerek daha uzun dalga boyunda yeniden yayılması; opalesans ise bir yapının yansıyan ışıkta mavimsi, iletilen ışıkta ise sarı-turuncu görünmesiyle karakterize optik bir olgudur. Bu özelliklerin doğal dişe benzer biçimde oluşturulamaması, kompozitin temel rengi uygun olsa dahi restorasyonun yapay görünmesine yol açabilir. Kompozitlerde ışığın yüzeyden yansıması, materyal içerisinden iletilmesi, absorbe edilmesi ve doldurucu partiküller tarafından saçılması; materyalin kalınlığına, arka plan rengine, doldurucu yapısına ve rezin matriks ile doldurucular arasındaki kırılma indisi farklılığına bağlıdır (Saegusa & ark., 2021: 307-309).

Rengin objektif biçimde tanımlanması amacıyla geliştirilen CIELAB renk sisteminde L* açıklık-koyuluk eksenini, a* kırmızı-yeşil eksenini ve b* sarı-mavi eksenini temsil etmektedir. İki ölçüm arasındaki toplam renk farkı ΔE ile ifade edilir. Klasik ΔE*ab formülü, CIELAB renk uzayının görsel açıdan tam homojen olmaması nedeniyle klinik algıyı her durumda yeterince yansıtamamaktadır. Bu nedenle açıklık, kroma ve renk tonu farklılıklarını ayrı ayrı ağırlıklandıran CIEDE2000 formülü geliştirilmiş ve güncel dental renk araştırmalarında yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır (Tabatabaian & ark., 2021: 1086-1087; Rashid, Farook & Dudley, 2023: 2-3).

Ölçülen renk farklarının klinik olarak yorumlanmasında algılanabilirlik ve kabul edilebilirlik eşiklerinden yararlanılır. Algılanabilirlik eşiği, iki renk arasındaki farkın gözlemcilerin yarısı tarafından fark edilebildiği düzeyi; kabul edilebilirlik eşiği ise renk farkının gözlemcilerin yarısı tarafından klinik olarak kabul edilebilir bulunduğu düzeyi ifade eder. CIEDE2000 sistemi için dental materyallerde yaygın olarak kullanılan 50:50 algılanabilirlik ve kabul edilebilirlik eşikleri sırasıyla ΔE_{00}=0,8 ve ΔE_{00}=1,8'dir. Bu eşikler, istatistiksel olarak anlamlı bir renk değişiminin klinik açıdan önemli olup olmadığının değerlendirilmesini sağlar. Bununla birlikte kullanılan renk farkı formülü, aydınlatıcı, gözlem geometrisi, arka plan ve ölçüm cihazı çalışma sonuçlarını etkileyebileceğinden, farklı araştırmalar karşılaştırılırken metodolojik koşullar da dikkate alınmalıdır (Tabatabaian & ark., 2021: 1086-1088).

Klinikte renk seçimi görsel veya cihaz destekli yöntemlerle gerçekleştirilebilir. Görsel renk seçimi kolay ve ekonomik olmakla birlikte aydınlatma koşulları, çevre renkleri, gözlemcinin deneyimi, renk görme yeterliliği, göz yorgunluğu ve değerlendirme süresinden etkilenmektedir. Spektrofotometreler, kolorimetreler, dijital fotoğraf sistemleri ve intraoral tarayıcılar daha objektif ve tekrarlanabilir ölçümler sunmasına rağmen bu

yöntemlerin sonuçları da cihaz özellikleri, kalibrasyon, ölçüm alanı ve yüzey geometrisine bağlıdır. Sistematik değerlendirmeler, kontrollü koşullarda cihaz destekli yöntemlerin görsel yöntemlere göre daha düşük renk farkı ve daha tutarlı sonuçlar sağlayabildiğini göstermektedir (Rashid, Farook & Dudley, 2023: 1-4; Morsy & Holiel, 2023: 1-5).

Dişin hidratasyon durumu da renk değerlendirmesini doğrudan etkiler. Dehidratasyon, mine içerisindeki ışık saçılımını artırarak dişin daha açık, daha opak, daha az kromatik ve daha düşük translüsensiye sahip görünmesine neden olur. Diş rengindeki değişimin dehidratasyonun ilk dakikasında algılanabilirlik eşiğini aşabildiği, yeniden hidratasyonun ise daha uzun süre gerektirdiği bildirilmiştir. Bu nedenle klinik renk seçimi; rubber-dam uygulamasından, dişin uzun süre hava ile kurutulmasından ve restoratif işlemlerden önce gerçekleştirilmelidir. Renk seçiminin orta üçlüden yapılması, tek bir renk kaydedilecekse dişin genel renginin daha dengeli temsil edilmesini sağlayabilir (Tabatabaian & ark., 2021: 1090-1092).

Doğal dişlerin renk dağılımı yaş, cinsiyet, etnik köken ve bireysel alışkanlıklara göre değişiklik göstermektedir. Geniş bir klinik popülasyonda gerçekleştirilen araştırmada kadınların dişlerinin genel olarak daha açık ve daha az sarı olduğu; yaş ilerledikçe dişlerin daha koyu ve kromatik hâle geldiği bildirilmiştir. Etnik köken, kahve tüketimi, diş fırçalama sıklığı ve daha önce uygulanmış beyazlatma işlemlerinin de renk koordinatları üzerinde etkili olabileceği gösterilmiştir (Ghinea & ark., 2025: 106-113). Bu geniş biyolojik çeşitlilik, sınırlı sayıdaki sabit kompozit renkleriyle tüm klinik durumlarda kusursuz uyum sağlanmasını güçleştirmektedir.

Sonuç olarak renk uyumu, yalnızca kompozitin katalog renginin diş rengiyle eşleştirilmesi olarak değerlendirilmemelidir. Başarılı bir estetik bütünleşme için restoratif materyalin renk tonu, kroması ve değerinin yanı sıra translüsensi, opasite, ışık saçılımı, floresans, opalesans ve yüzey parlaklığı gibi özelliklerinin de doğal diş dokularını taklit etmesi gerekir. Bu gereksinim, çevresindeki diş dokularıyla optik etkileşime girerek geniş bir renk aralığına uyum sağlamayı amaçlayan tek renk restoratif materyallerin geliştirilmesinin temelini oluşturmuştur (Ismail & Paravina, 2022: 42-49; Ahmed, Jouhar & Khurshid, 2022: 1-7).

Tek Renk Restoratif Materyallerin Gelişimi ve Renk Uyum Mekanizmaları

Doğal dişin polikromatik yapısının kompozit rezinlerle taklit edilmesi, geleneksel olarak farklı renk, kroma ve opasiteye sahip materyallerin tabakalama tekniğiyle birlikte kullanılmasını gerektirmektedir. Bu yaklaşım uygun klinik koşullarda başarılı estetik sonuçlar sağlayabilmekle birlikte renk seçiminin hekimin deneyimine bağlı olması, uygulama süresini uzatması ve çok sayıda kompozit renginin stokta bulundurulmasını gerektirmesi gibi sınırlılıklara

sahiptir. Bu sorunları azaltmak amacıyla önce sınırlı sayıda rengi kapsayan grup renkli ve üniversal sistemler, ardından tek bir kompozit materyalle geniş bir doğal diş rengi aralığına uyum sağlamayı amaçlayan tek renk sistemler geliştirilmiştir (Ahmed, Jouhar & Khurshid, 2022: 1-4; Ismail & Paravina, 2022: 42-45).

Literatürde bu materyaller için single-shade, one-shade, universal-shade ve monochromatic composite gibi farklı terimler kullanılmaktadır. Bununla birlikte "universal" ifadesi yalnızca tek renk materyalleri tanımlamamaktadır. Bazı üniversal kompozit sistemleri az sayıda renk seçeneğine sahipken, gerçek tek renk sistemler üretici tarafından tek bir materyalin VITA klasik renk skalasının geniş bölümüne uyum sağlayabileceği iddiasıyla sunulmaktadır. Bu nedenle sadeleştirilmiş sistemler değerlendirilirken materyalin tek renk olarak üretilmesi ile farklı renkleri kapsayan sınırlı renk gruplarına sahip olması birbirinden ayrılmalıdır (Ahmed, Jouhar & Khurshid, 2022: 1-4; Ismail & Paravina, 2022: 42-45).

Kompozit rezinin çevresindeki diş dokusuna daha uyumlu görünmesi uzun yıllardır "bukalemun etkisi" olarak tanımlanmaktadır. Bununla birlikte chameleon effect bilimsel olarak tek ve kesin bir mekanizmayı ifade etmemekte, daha çok klinik gözleme dayanan genel bir terim olarak kullanılmaktadır. Aynı olgu için blending effect, color shifting, color assimilation ve color adjustment kavramları da kullanılmıştır. Ismail ve Paravina (2022: 43-46), "bukalemun etkisi" yerine renk uyumu ve renk ayarlaması kavramlarının daha bilimsel olduğunu; olayın hem algısal hem de fiziksel bileşenler içerdiğini belirtmiştir.

Blending effect, restoratif materyal ile çevre diş dokusu birlikte değerlendirildiğinde algılanan renk farkının, aynı yapıların ayrı ayrı değerlendirildiği duruma göre daha düşük olmasıdır. Bu etki başlangıçta büyük ölçüde görsel bir yanılsama olarak ele alınmış, daha sonra cihazsal olarak ölçülebilen renk ayarlama potansiyeli kavramı geliştirilmiştir. Renk ayarlama potansiyeli, izole kompozit örneği ile çevresindeki substrat arasında ölçülen renk farkının, kompozit restorasyon substrat içine yerleştirildiğinde ne ölçüde azaldığını ifade eder. Bu amaçla görsel renk ayarlama potansiyeli ve cihazsal renk ayarlama potansiyeli ölçümleri tanımlanmıştır (Pereira Sanchez, Powers & Paravina, 2019: 465-468).

Pereira Sanchez ve arkadaşlarının çalışmasında tek başına değerlendirildiğinde çevre diş renkleriyle yüksek renk farkı gösteren Omnichroma'nın, kavite içerisinde değerlendirildiğinde belirgin biçimde daha düşük renk farkı oluşturduğu ve test edilen materyaller arasında en yüksek renk ayarlama potansiyeline sahip olduğu bildirilmiştir (Pereira Sanchez, Powers & Paravina, 2019: 465-469). Benzer şekilde Durand ve arkadaşları yalnızca toplam renk farkını değil, açıklık, kroma, renk tonu ve translüsensi uyumunu ayrı ayrı değerlendirmiş; Omnichroma'nın bütün renk boyutlarında en belirgin ayarlama potansiyelini gösterdiğini bildirmiştir (Durand & ark., 2021: 836-841).

Tek renk kompozitlerin çevre dokularla uyumu tek bir mekanizmayla açıklanamamaktadır. Bazı materyallerde renk uyumu büyük ölçüde yüksek translüsensi ve çevre substratın restorasyon içerisinden yansımasıyla sağlanmaktadır. Materyalin translüsensisi arttıkça alttaki ve çevredeki diş dokusundan yansıyan ışığın restorasyonun görünür rengine katkısı artar. Böylece kompozitin kendi rengi baskın olmaktan çıkar ve restorasyon çevresindeki yapının renk özelliklerini kısmen yansıtır. Bununla birlikte aşırı translüsensi, özellikle arka plan desteğinin bulunmadığı Sınıf III ve IV restorasyonlarda ağız boşluğunun koyu renginin görünmesine ve restorasyonun gri algılanmasına yol açabilir. Bu nedenle yüksek renk uyum potansiyeli her klinik koşulda ideal maskeleme anlamına gelmemektedir (Ismail & Paravina, 2022: 46-51; Oivanen & ark., 2021: 48-52).

Translüsensi üzerinde rezin matriks ve inorganik doldurucular arasındaki kırılma indisi ilişkisi önemli rol oynar. İki fazın kırılma indisleri birbirine yaklaştıkça ara yüzeylerdeki ışık saçılımı azalır ve materyalin ışık geçirgenliği artar. Polimerizasyon sırasında organik matriksin kırılma indisinin değişmesi, matriks ile doldurucu arasındaki optik uyumu ve dolayısıyla materyalin son translüsensisini etkileyebilir. Oivanen ve arkadaşları, matriks ve doldurucu arasındaki kırılma indisi uyumsuzluğunun azaltılmasının translüsensi ve renk uyumunu artırabileceğini göstermiştir (Oivanen & ark., 2021: 48-52).

Tek renk materyallerin tümü pigmentsiz değildir. Bazı sistemlerde sınırlı miktarda pigment ve yüksek translüsensi birlikte kullanılarak geniş bir renk aralığının kapsanması amaçlanmaktadır. Pigment temelli renklenmede materyalin görünür rengi, belirli ışık dalga boylarının pigmentler tarafından absorbe edilmesi ve kalan dalga boylarının yansıtılmasıyla oluşur. Bu sistemlerde başlangıç renk tonu materyalin organik ve inorganik içeriğine eklenen renklendiricilerle belirlenirken, çevre dokuya uyum büyük ölçüde translüsensi ve ışık saçılımıyla desteklenmektedir (Ahmed, Jouhar & Khurshid, 2022: 4-7; Ismail & Paravina, 2022: 46-49).

Yapısal renk teknolojisini kullanan materyallerde ise renk oluşumu temel olarak pigmentlerden değil, belirli boyut ve düzenlenmeye sahip nanoyapıların ışıkla fiziksel etkileşiminden kaynaklanır. Yapısal renk; kırınım, girişim ve saçılma gibi optik olaylar sonucunda belirli dalga boylarının seçici olarak yansıtılmasıyla meydana gelir. Bu yaklaşımın en bilinen örneği olan Omnichroma, yaklaşık 260 nm çapında, düzenli boyut dağılımına sahip küresel silika-zirkonya supra-nano doldurucular içermektedir. Bu doldurucuların görünür spektrumun sarı-kırmızı bölgesindeki ışığı yansıtarak doğal dişlerin yaygın renk özellikleriyle uyuma katkı sağladığı bildirilmektedir (Chen & ark., 2021: 874-878; Kobayashi & ark., 2021: 1033-1037).

Chen ve arkadaşları, küresel supra-nano doldurucular içeren yapısal renkli kompozitin A2, A3 ve A4 renkli çevre yapılarda mikrohibrit ve kümelenmiş nano

dolduruculu materyallerden daha iyi renk uyumu gösterdiğini bildirmiştir. Araştırmacılar bu sonucu doldurucu morfolojisinin ışık iletimi ve saçılımı üzerindeki etkisiyle ilişkilendirmiştir (Chen & ark., 2021: 874-881). Kobayashi ve arkadaşları da doğal insan dişlerinde yaptıkları değerlendirmede 260 nm küresel dolduruculu materyalin farklı dalga boylarını mavi-kırmızı aralığında yansıttığını ve geleneksel pigmentli kompozitlere göre daha düşük renk farkı oluşturduğunu göstermiştir (Kobayashi & ark., 2021: 1033-1039).

Yapısal rengin oluşması yalnızca doldurucu partiküllerin boyutuna değil; şekline, boyut dağılımına, materyal içerisindeki miktarına ve partiküller arasındaki optik etkileşime de bağlıdır. Arai ve arkadaşları, küresel doldurucu miktarı arttıkça spektral yansımanın ve renk uyumunun güçlenebildiğini bildirmiştir (Arai & ark., 2021: 284-290). Buna karşılık daha düşük doldurucu yükü ışık saçılımını ve yapısal renge özgü yansımayı azaltabilmektedir. Bununla birlikte doldurucu miktarındaki azalma translüsensiyi artırabileceği için sonuç her zaman doğrusal değildir. Furusawa ve arkadaşlarının çalışmasında en yüksek renk uyumu, yüksek translüsensi ile yeterli yapısal renk yansıması arasında denge sağlayan akışkan formdaki materyalde görülmüştür (Furusawa & ark., 2023: 343-348).

Tek renk kompozitlerin renk uyumu restorasyonun çevre dokularla optik etkileşimine bağlı olduğundan, materyalin izole hâlde belirli bir diş rengine sahip olması beklenmemelidir. Nitekim bazı tek renk materyaller ağız dışında veya koyu arka plan üzerinde opak, beyazımsı ya da renksiz algılanırken, diş dokusu içerisine yerleştirildiklerinde çevre rengin etkisiyle daha uyumlu görünmektedir. Bu durum tek renk materyallerde başarının materyalin başlangıç rengiyle değil, yerleştirildiği klinik ortamda oluşturduğu toplam optik görünümle değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir (Pereira Sanchez, Powers & Paravina, 2019: 465-469; Durand & ark., 2021: 836-841).

Bununla birlikte yüksek renk ayarlama potansiyeli, tüm diş renklerinde ve tüm kavite tiplerinde kusursuz renk uyumu anlamına gelmez. Renk uyumu materyal tipine, restorasyon boyutuna, kalınlığına, çevreleyen diş dokusu miktarına ve arka plan rengine bağlıdır. Küçük ve çevresi diş dokusuyla tamamen sınırlı restorasyonlarda çevre rengin etkisi daha güçlü iken geniş restorasyonlarda materyalin kendi optik özellikleri daha belirgin hâle gelir. Abdelraouf ve Habib, restorasyon boyutu küçüldükçe ve materyal translüsensisi arttıkça blending effect'in güçlendiğini bildirmiştir (Abdelraouf & Habib, 2016: 1-5).

Sonuç olarak tek renk restoratif materyallerin çevre diş dokularına uyumu; algısal renk bütünleşmesi, translüsensi, matriks-doldurucu kırılma indisi ilişkisi, ışık saçılımı, pigment kullanımı ve yapısal renk gibi birbiriyle ilişkili mekanizmaların sonucudur. Tek renk materyallerin geliştirilmesi renk seçimini ve tabakalama işlemlerini azaltarak klinik uygulamayı basitleştirmiştir. Ancak bu materyallerin optik performansı yalnızca üretici tarafından belirtilen renk

kapsama alanına göre değil, materyalin yapısı ve kullanılacağı restorasyonun klinik özellikleri birlikte değerlendirilerek yorumlanmalıdır (Ismail & Paravina, 2022: 42-52; Oivanen & ark., 2021: 48-52).

Günümüzde renk seçimini ve tabakalama işlemlerini basitleştirmek amacıyla farklı üreticiler tarafından tek renk veya sınırlı sayıda üniversal renk seçeneği sunan restoratif kompozit sistemler geliştirilmiştir. Bu materyallerin renk uyum yaklaşımları aynı değildir. Bazı ürünlerde renk uyumu, belirli boyut ve morfolojideki doldurucu partiküllerinin oluşturduğu yapısal renk mekanizmasına dayandırılırken, bazı sistemlerde çevredeki diş dokusundan yansıyan ışığın restorasyonun görünür rengini etkilemesi, bukalemun etkisi veya üreticiye özgü adaptif ışık eşleştirme yaklaşımları öne sürülmektedir. Bunun yanında, özel bir optik mekanizma tanımlanmaksızın yalnızca tek bir üniversal posterior renkte sunulan bulk-fill kompozitler ile birkaç üniversal renk kullanılarak klasik renk aralığının sadeleştirildiği sistemler de bulunmaktadır. Bu nedenle ticari ürünlerin değerlendirilmesinde yalnızca renk sayısı değil; üreticinin bildirdiği renk sistemi, rezin matriks, doldurucu yapısı, uygulama kalınlığı ve klinik endikasyonlar birlikte dikkate alınmalıdır.

Materyaller renk sistemi, rezin matriks, doldurucu yapısı ve klinik kullanım özellikleri bakımından heterojen bir gruptur. Bu nedenle "tek renk kompozit" ifadesi, tüm ürünlerin aynı optik mekanizmayla çalıştığı anlamına gelmemektedir. Yapısal renk teknolojisini kullanan sistemler, üreticiye özgü renk uyum yaklaşımlarıyla tanımlanan materyaller, tek üniversal renkli posterior bulk-fill kompozitler ve sınırlı sayıda üniversal renk içeren sadeleştirilmiş sistemler birbirinden ayrılarak değerlendirilmelidir. Ayrıca üretici tarafından bildirilen renk uyumunun klinik başarısı; kavite boyutu, çevrede kalan diş dokusu, restorasyon kalınlığı, arka plan rengi ve materyalin translüsensi gibi değişkenlerden etkilenebilir.

Renk Uyumunu Etkileyen Materyale ve Kliniğe Bağlı Faktörler

Tek renk restoratif materyallerin çevre diş dokularıyla oluşturduğu renk uyumu, materyalin tek başına sahip olduğu optik özelliklerle açıklanamaz. Nihai görünüm; kompozitin yapısı, restorasyonun boyutları, kavite konfigürasyonu, alttaki substratın rengi, çevrede kalan diş dokusu miktarı ve yüzey özellikleri arasındaki etkileşimin sonucudur. Bu nedenle aynı materyal, farklı diş renklerinde veya farklı kavite tiplerinde birbirinden oldukça farklı estetik sonuçlar gösterebilir. Renk uyumunun materyal ve diş rengine bağlı olduğu, tek renk sistemlerin özellikle açık tonlarda daha başarılı olabildiği; koyu renklerde ise performansın materyale göre değiştiği bildirilmiştir (Iyer & ark., 2021: 394-399).

Materyalin translüsensi, renk ayarlama potansiyelini belirleyen başlıca özelliklerden biridir. Yüksek translüsensi, kavite tabanı ve duvarlarından yansıyan ışığın restorasyon içerisinden geçmesine olanak sağlayarak çevredeki

dokuların görünür renge katkısını artırır. Bununla birlikte translüsensi ile renk uyumu arasında her zaman doğrusal bir ilişki bulunmamaktadır. Aşırı translüsent bir kompozit, özellikle koyu bir arka plan üzerinde veya dentin desteğinin bulunmadığı alanlarda düşük L* değeri nedeniyle daha koyu ve gri görünebilir. Bu nedenle başarılı renk uyumu, yalnızca yüksek ışık geçirgenliğine değil, materyalin translüsensi ile opasite ve ışık saçılımı arasında kurduğu dengeye bağlıdır (Furusawa & ark., 2023: 346-349).

Doldurucu partiküllerin boyutu, şekli, dağılımı ve oranı da ışığın materyal içerisindeki hareketini etkiler. Düzenli boyut dağılımına sahip küresel doldurucular seçici ışık yansımasını desteklerken, doldurucu ile organik matriks arasındaki kırılma indisi farkı ışık saçılımının miktarını belirler. Rezin matriks ve doldurucu arasındaki kırılma indisleri birbirine yaklaştıkça ışık iletimi ve translüsensi artabilir. Bununla birlikte yüksek doldurucu oranı, bazı yapısal renkli materyallerde spektral yansımayı güçlendirirken farklı optik bileşenlerin ayarlanmasını aynı ölçüde iyileştirmeyebilir. Bu nedenle renk uyumunda doldurucu miktarından çok, doldurucu mimarisi ile rezin matriksin birlikte oluşturduğu optik yapı önemlidir (Arai & ark., 2021: 284-290; Oivanen & ark., 2021: 48-52).

Restorasyon kalınlığı, kompozitin kendi rengi ile alttaki substratın görünür renge katkısı arasındaki dengeyi değiştirir. İnce restorasyonlarda arka planın etkisi daha belirgin olurken kalınlığın artmasıyla materyalin kendi optik özellikleri baskın hâle gelir. Zhu ve arkadaşları, 1, 2 ve 3 mm kalınlıklarda değerlendirdikleri materyallerde hem cihazsal hem de görsel renk ayarlama potansiyelinin restorasyon derinliği arttıkça azaldığını bildirmiştir. Aynı çalışmada tek renkli Charisma Diamond One, tüm arka plan renkleri ve kalınlıklarda çok renkli materyallerden daha yüksek renk ayarlama potansiyeli göstermiştir (Zhu & ark., 2023: 1-8). Benzer şekilde bir çalışma, tek renk kompozitlerde renk uyumunun restorasyon kalınlığı ve arka plan rengine bağlı olduğunu; 1,5 mm kalınlıktaki örneklerde renk uyumunun genel olarak 3 mm kalınlıktaki örneklerden daha yüksek olduğunu bildirmiştir (Mohammadipour & ark., 2025: 1-10).

Kalınlığın etkisi, restorasyondan beklenen optik işleve göre farklı yorumlanmalıdır. Sağlıklı ve uygun renkli bir substratın bulunduğu durumlarda ince ve translüsent bir kompozit alttaki dokunun renginden yararlanabilir. Buna karşılık renklenmiş dentin, metalik yapı veya ağız boşluğunun koyu arka planı gibi istenmeyen bir substratın örtülmesi gerektiğinde yüksek translüsensi dezavantaj oluşturur. Güncel kanıtlar, koyu arka planların etkili biçimde maskelenmesi için kompozitin opasitesi ve tabaka kalınlığının birlikte değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir. Siyah arka planın maskelenmesinde genellikle en az 1-2 mm kalınlığında opak kompozit tabakası gerekirken C4 gibi koyu diş renklerinde daha ince opak tabakalar veya

tabakalama kombinasyonları yeterli olabilmektedir (Perez & ark., 2023: 333-343).

Kavite boyutu ve restorasyon yüzeyinin çevre dokulara oranı, renk uyumunun gücünü doğrudan etkiler. Küçük restorasyonlarda kompozit, geniş bir doğal diş dokusu alanıyla çevrelendiğinden optik bütünleşme daha belirgin olabilir. Restorasyon büyüdükçe çevrede kalan diş dokusu azalır ve materyalin kendi rengi ile translüsensisi görünümü daha fazla belirlemeye başlar. Geniş restorasyonlarda yapılan bir çalışmada tek renk materyaller çevre mineyle görsel olarak kabul edilebilir bir uyum göstermesine rağmen, hiçbir materyalin preparasyon öncesindeki diş rengini tamamen geri kazandıramadığı bildirilmiştir. Bu bulgu, çevre dokuya karışmanın restorasyonun tüm dişin başlangıç rengini yeniden oluşturduğu anlamına gelmediğini göstermektedir (Rosa & ark., 2024: 1-7).

Kavite konfigürasyonu, restorasyonun ışığı hangi yönlerden alacağını ve çevre dokularla ne ölçüde çevreleneceğini belirler. Kavite duvarlarıyla büyük ölçüde çevrili Sınıf I ve sınırlı Sınıf III restorasyonlarda taban ve yan duvarlardan yansıyan ışık renk uyumuna katkı sağlayabilir. Buna karşılık insizal kenarı içeren Sınıf IV veya labialden palatinale uzanan geçişli restorasyonlarda ağız boşluğunun koyu arka planı materyal içerisinden görülebilir. Bu durum özellikle yüksek translüsensili tek renk materyallerde gri bir görünüm oluşturabilir. Bu tür restorasyonlarda palatinal opak tabaka veya uygun dentin rengi kullanılması, ağız boşluğunun etkisini sınırlamak açısından gerekli olabilir (Ismail & Paravina, 2022: 48-51).

Çevrede kalan mine ve dentinin miktarı kadar bu dokuların yapısı da renk uyumunu etkiler. Mine, ışığı toplayan ve dağıtan translüsent bir doku olarak restorasyon ile diş arasındaki renk geçişini yumuşatabilir. Kavite kenarındaki mine prizma yöneliminin ve ışığın geliş açısının renk uyumuna katkıda bulunabileceği bildirilmiştir. Ayrıca genç dentinin daha yüksek ışık iletimi ve daha düşük renk doygunluğu nedeniyle renk ayarlaması için daha uygun bir arka plan oluşturabileceği düşünülmektedir. Klinik olarak bevel uygulanması, kompozit ile mine arasındaki geçiş alanını genişleterek restorasyon sınırlarının daha kademeli ve daha az belirgin algılanmasına yardımcı olabilir (Ismail & Paravina, 2022: 48-51).

Kompozitin polimerizasyonu sırasında organik matriksin kırılma indisi değişebilir ve bu değişim matriks ile doldurucu arasındaki optik uyumu etkileyerek materyalin translüsensi ve renk görünümünde değişikliğe neden olabilir. Polimerizasyon sonrasında matriks ve doldurucu fazların kırılma indislerinin birbirine yaklaşması, ışık iletimini artırarak çevre dokuların restorasyonun görünür rengine katkısını güçlendirebilir. Bu nedenle kompozitin polimerizasyon öncesindeki görünümüne göre kesin renk kararı verilmemeli; renk uyumu materyal tamamen polimerize edildikten ve yüzey işlemleri

tamamlandıktan sonra değerlendirilmelidir (Oivanen & ark., 2021: 48-52; Hayashi & ark., 2023: 676-681).

Yüzey pürüzlülüğü ve parlaklık, kompozit yüzeyinden gerçekleşen speküler ve dağınık yansımayı değiştirerek renk algısını etkiler. Pürüzlü bir yüzey, ışığı farklı yönlere dağıtarak restorasyonun daha mat ve opak görünmesine; parlak ve düzgün bir yüzey ise daha belirgin yüzey yansımasına neden olabilir. Hayashi ve arkadaşları, farklı yüzey pürüzlülüklerinde değerlendirdikleri yapısal renkli ve pigment içeren tek renk kompozitlerin renk ayarlama potansiyelinin yüzey özelliklerinden etkilendiğini ve yapısal renkli materyalin farklı pürüzlülük koşullarında daha kararlı bir uyum gösterdiğini bildirmiştir (Hayashi & ark., 2023: 676-681). Bu nedenle bitirme ve polisaj işlemleri yalnızca yüzey düzgünlüğü ve plak kontrolü açısından değil, restorasyonun optik bütünlüğü açısından da önem taşır.

Renk uyumunun değerlendirilmesi kullanılan yöntem ve gözlem koşullarından da etkilenir. Spektrofotometrik ölçümler sınırlı bir yüzey alanından sayısal veri sağlarken görsel değerlendirme restorasyon, çevre mine ve genel diş görünümünü birlikte ele alır. Bu nedenle cihazsal olarak yüksek renk farkı gösteren bir restorasyon, çevre dokularla birlikte değerlendirildiğinde görsel olarak daha uyumlu algılanabilir. Bunun tersi de mümkündür; ölçüm alanındaki renk farkı düşük olmasına rağmen yüzey parlaklığı, restorasyon sınırları veya bölgesel translüsensi farklılıkları restorasyonu görünür hâle getirebilir. Çalışmalar karşılaştırılırken cihaz tipi, ölçüm açıklığı, aydınlatıcı, gözlem geometrisi, arka plan ve değerlendiricilerin deneyimi dikkate alınmalıdır (Rashid, Farook & Dudley, 2023: 1-4; Morsy & Holiel, 2023: 1-5).

Sonuç olarak tek renk restoratif materyallerin renk uyumu materyalin sabit ve her klinik durumda değişmeden kalan bir özelliği değildir. Materyal yapısı, translüsensi, restorasyon kalınlığı ve boyutu, kavite konfigürasyonu, substrat rengi, çevreleyen diş dokusu, polimerizasyon ve yüzey kalitesi birlikte nihai görünümü belirler. Küçük, derinliği yeterli ve doğal diş dokusuyla çevrili restorasyonlar renk uyumu açısından daha elverişli koşullar sunarken geniş, koyu substratlı veya ağız boşluğuna açık restorasyonlarda ilave maskeleme ve tabakalama stratejileri gerekebilir.

Klinik Performans, Optik Stabilite ve Güncel Kanıtlar

Tek renk restoratif materyallerin klinik başarısı yalnızca restorasyonun uygulandığı andaki renk uyumuyla değerlendirilmemelidir. Başlangıçta çevre diş dokularıyla sağlanan optik bütünleşmenin zaman içinde korunması, renklendirici ajanlara ve yaşlandırmaya karşı direnç, yüzey özelliklerinin devamlılığı ve beyazlatma işlemleri sonrasındaki davranış da uzun dönem estetik performansın temel bileşenleridir. Bu nedenle bu materyallerin klinik değeri; uygulama kolaylığı, başlangıç renk uyumu, maskeleme kapasitesi ve optik stabilite birlikte

değerlendirilerek belirlenmelidir (Chaple Gil & ark., 2025: 1838-1846; Mohsen & ark., 2026: 1-14).

Tek renk kompozitlerin klinik performansına ilişkin güncel kanıtlar, laboratuvar ve klinik değerlendirmeler arasında belirgin bir ayrım bulunduğunu göstermektedir. Laboratuvar çalışmalarında çok renkli sistemler çoğu zaman daha düşük renk farkı oluştururken, klinik gözlemde tek renk restorasyonlar çevre mine, yüzey morfolojisi ve genel diş görünümüyle birlikte değerlendirildiğinde kabul edilebilir bulunabilmektedir. Randomize klinik çalışmaların sistematik değerlendirmelerinde kısa dönem renk uyumu ve renk stabilitesi bakımından tek renk ve çok renkli kompozitler arasında belirgin bir üstünlük gösterilememiştir; ancak çalışma sayısının sınırlı ve takip sürelerinin çoğunlukla kısa olması uzun dönem eşdeğerlik konusunda temkinli olunmasını gerektirmektedir (Leal & ark., 2024: 1-15; Forabosco & ark., 2025: 1443-1449; Chaple Gil & ark., 2025: 1838-1846).

Başlangıçta sağlanan renk uyumu, restorasyonun uzun dönem optik stabilitesini garanti etmemektedir. Kompozit rezinlerde zamanla meydana gelen renk değişimi; organik matriksin kimyasal yapısı, doldurucu içeriği, polimerizasyon derecesi, su emilimi, fotobaşlatıcı sistemi ve yüzey özellikleriyle ilişkilidir. Su, polimer ağı içerisine nüfuz ederek matrikste genişlemeye ve doldurucu-matriks ara yüzeyinde hidrolitik bozulmaya neden olabilir. Bu süreç ışık saçılımını ve yüzey özelliklerini değiştirirken renklendirici moleküllerin materyal içerisine girişini de kolaylaştırabilir. Bu nedenle tek renk materyallerin renk stabilitesi yalnızca başlangıçtaki renk ayarlama potansiyelleri üzerinden öngörülemez (Mohsen & ark., 2026: 1-14).

Kahve, çay, kırmızı şarap, renkli içecekler ve bazı baharatlar kompozit restorasyonların renk stabilitesini etkileyen başlıca dış kaynaklı etkenlerdir. Renk değişimi yalnızca yüzeyde pigment birikimiyle sınırlı kalmayabilir; kromojenik moleküllerin su emen rezin matrikse nüfuz etmesi daha kalıcı renk değişikliklerine neden olabilir. Güncel sistematik değerlendirmeler, renk değişiminin maruz kalma süresiyle arttığını ve özellikle kırmızı şarap ile yoğun pigment içeren ajanların klinik kabul edilebilirlik sınırlarının üzerinde değişiklik oluşturabildiğini göstermektedir. Tek renk materyallerin genel olarak renklenmeye duyarlı olduğu bildirilse de sonuçlar ürünlerin organik matriks ve doldurucu yapısına göre belirgin biçimde değişmektedir (Mohsen & ark., 2026: 1-14; Chaple Gil & ark., 2025: 1841-1845).

Tek renk kompozitlerin tümünün çok renkli materyallerden daha düşük renk stabilitesine sahip olduğu söylenemez. Renklenme davranışı, materyalin tek veya çok renkli olarak sınıflandırılmasından çok rezin matriksin hidrofilik yapısı, doldurucu-matriks ara yüzeyi, fotobaşlatıcı sistem, polimerizasyon yeterliliği ve yüzey polisaj kalitesiyle ilişkilidir. Bu nedenle optik stabilite ürün bazında değerlendirilmelidir. Ayrıca laboratuvar çalışmalarında örneklerin renklendirici

solüsyonlara kesintisiz ve uzun süre maruz bırakılması klinik ortamı tam olarak yansıtmamaktadır. Ağız içerisinde tükürük, diş fırçalama, mekanik temizleme ve renklendirici ajanlarla aralıklı temas renklenmenin miktarını değiştirebilir (Mohsen & ark., 2026: 8-14).

Termal yaşlandırma ve uzun süreli su depolama, materyalin yalnızca rengini değil translüsensi, yüzey pürüzlülüğü ve parlaklığını da etkileyebilir. Yaşlanmaya bağlı olarak rezin matriksin ve doldurucu–matriks ara yüzeyinin yapısında meydana gelen değişiklikler, materyalin ışık iletimi ve saçılım davranışını değiştirerek başlangıçtaki optik bütünlüğün azalmasına katkıda bulunabilir. Yüzey pürüzlülüğündeki artış ise ışığın daha dağınık yansımasına neden olarak restorasyonun daha mat ve opak algılanmasına yol açabilir. Bu nedenle uzun dönem estetik başarı, renk koordinatlarının korunmasının yanında yüzey özelliklerinin devamlılığına da bağlıdır (Chaple Gil & ark., 2025: 1841-1845; Mohsen & ark., 2026: 6-13).

Beyazlatma işlemleri tek renk kompozitlerin optik performansını iki farklı biçimde etkileyebilir. Ağızda mevcut olan restorasyon beyazlatıcı ajanlara maruz kaldığında materyalin rengi, translüsensisi ve yüzey pürüzlülüğü değişebilir. Buna ek olarak doğal diş dokusunun kompozit materyalden daha fazla açılması, mevcut restorasyon ile çevre diş arasında yeni bir renk uyumsuzluğu oluşturabilir. Peroksit konsantrasyonu, uygulama süresi ve materyalin organik ve inorganik yapısı sonuçları etkilediğinden tek renk kompozitler için ortak ve değişmez bir beyazlatma yanıtından söz etmek mümkün değildir (Tepe & ark., 2024: 372-380; Miranda & ark., 2025: 1-12).

Bazı tek renk materyaller beyazlatma sonrasında çok renkli kompozitlere benzer renk ve yüzey değişiklikleri gösterirken bazı ürünler daha belirgin biçimde etkilenebilmektedir. Bu farklılık, beyazlatma sonrasındaki davranışın tek renk teknolojisinin ortak bir özelliğinden çok materyal bileşimine bağlı olduğunu göstermektedir. Ayrıca doğal diş ile restorasyonun beyazlatmaya farklı yanıt vermesi nedeniyle mevcut restorasyonların beyazlatma sonrasında yeniden değerlendirilmesi ve gerektiğinde polisaj, onarım veya yenileme seçeneklerinin düşünülmesi gerekir (Tepe & ark., 2024: 372-380; Miranda & ark., 2025: 1-12).

Diş beyazlatıldıktan sonra yeni bir restorasyon yapılması planlandığında tek renk materyallerin değişen diş rengine uyum sağlayabilmesi klinik açıdan avantaj oluşturabilir. Bununla birlikte beyazlatmanın hemen ardından ortaya çıkan geçici optik değişiklikler, diş renginin nihai durumunun değerlendirilmesini güçleştirebilir. Bu nedenle restoratif işlem öncesinde diş renginin stabilize olması beklenmeli ve materyalin renk uyumu yeniden değerlendirilmelidir. Beyazlatma sonrasındaki renk uyumunun materyal tipine ve dişin başlangıç rengine bağlı olarak değişebildiği bildirilmiştir (Forabosco & ark., 2024: 280-285; Miranda & ark., 2025: 1-12).

Sonuç olarak tek renk restoratif materyaller, renk seçimi ve tabakalama işlemlerini sadeleştiren ve uygun klinik koşullarda kabul edilebilir estetik sonuçlar sağlayabilen güncel bir materyal grubudur. Bununla birlikte klinik başarı; restorasyonun büyüklüğü ve konfigürasyonu, çevreleyen diş dokusu miktarı, substrat rengi, materyalin maskeleme kapasitesi ve uzun dönem optik stabilitesiyle yakından ilişkilidir. Küçük ve uygun renkli diş dokusuyla çevrelenmiş restorasyonlar daha elverişli koşullar sunarken geniş, koyu substratlı veya arka plan etkisinin belirgin olduğu olgularda ilave maskeleme ve tabakalama yaklaşımları gerekebilir. Mevcut klinik bulgular umut verici olmakla birlikte uzun dönemli ve standartlaştırılmış randomize klinik araştırmalara duyulan gereksinim devam etmektedir.

Kaynakça

Abdelraouf, R. M. & Habib, N. A. (2016). Color-matching and blending-effect of universal shade bulk-fill-resin-composite in resin-composite models and natural teeth. BioMed Research International, 2016, 4183432. Doi: 10.1155/2016/4183432.

Ahmed, M. A., Jouhar, R. & Khurshid, Z. (2022). Smart monochromatic composite: A literature review. International Journal of Dentistry, 2022, 2445394. Doi: 10.1155/2022/2445394.

Arai, Y., Kurokawa, H., Takamizawa, T., Tsujimoto, A., Saegusa, M., Yokoyama, M. & Miyazaki, M. (2021). Evaluation of structural coloration of experimental flowable resin composites. Journal of Esthetic and Restorative Dentistry, 33 (2), 284-293. Doi: 10.1111/jerd.12674.

Chaple Gil, A., Caviedes, R., Bersezio, C., Martín, J., Fernández, E. & Angel, P. (2025). Color matching and stability of single-shade chameleon dental composites: A systematic review. Journal of Esthetic and Restorative Dentistry, 37, 1838-1847. Doi: 10.1111/jerd.13461.

Chen, F., Toida, Y., Islam, R., Alam, A., Chowdhury, A. F. M. A., Yamauti, M. & Sano, H. (2021). Evaluation of shade matching of a novel supra-nano filled esthetic resin composite employing structural color using simplified simulated clinical cavities. Journal of Esthetic and Restorative Dentistry, 33 (6), 874-883. Doi: 10.1111/jerd.12671.

Durand, L. B., Ruiz-López, J., Perez, B. G., Ionescu, A. M., Carrillo-Pérez, F., Ghinea, R. & Pérez, M. M. (2021). Color, lightness, chroma, hue, and translucency adjustment potential of resin composites using CIEDE2000 color difference formula. Journal of Esthetic and Restorative Dentistry, 33 (6), 836-843. Doi: 10.1111/jerd.12689.

Forabosco, E., Generali, L., Mancuso, E., Kaleci, S., Consolo, U. & Checchi, V. (2024). Color match of single-shade restorations after professional dental bleaching: An in vitro study. Journal of Conservative Dentistry and Endodontics, 27 (3), 280-285. Doi: 10.4103/JCDE.JCDE_295_23.

Forabosco, E., Josic, U., Consolo, U., Generali, L., D'Alessandro, C., Breschi, L. & Checchi, V. (2025). Color match of single-shade versus multi-shade resin composites: A systematic review with meta-analysis. Journal of Esthetic and Restorative Dentistry, 37, 1443-1451. Doi: 10.1111/jerd.13444.

Furusawa, K., Kobayashi, S., Yamashita, A., Tichy, A., Hosaka, K., Shimada, Y. & Nakajima, M. (2023). Effect of filler load on structural coloration and color adjustment potential of resin composites. Dental Materials Journal, 42 (3), 343-350. Doi: 10.4012/dmj.2022-199.

Ghinea, R., Herrera, L. J., Ruiz-López, J., Sly, M. M. & Paravina, R. D. (2025). Color ranges and distribution of human teeth: A prospective clinical study. Journal of Esthetic and Restorative Dentistry, 37, 106-116. Doi: 10.1111/jerd.13344.

Hayashi, K., Kurokawa, H., Saegusa, M., Aoki, R., Takamizawa, T., Kamimoto, A. & Miyazaki, M. (2023). Influence of surface roughness of universal shade resin composites on color adjustment potential. Dental Materials Journal, 42 (5), 676-682. Doi: 10.4012/dmj.2023-007.

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. Doi: 10.1111/jerd.12843.

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. Doi: 10.1111/jerd.12621.

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. Doi: 10.4012/dmj.2020-364.

Leal, C. de F. C., Miranda, S. B., Alves Neto, E. L. de, Freitas, K., de Sousa, W. V., Lins, R. B. E., de Andrade, A. K. M. & Montes, M. A. J. R. (2024). Color stability of single-shade resin composites in direct restorations: A systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. Polymers, 16 (15), 2172. Doi: 10.3390/polym16152172.

Miranda, S. B., Leal, C. de F. C., Lins, R. B. E. & Montes, M. A. J. R. (2025). Clinical implications of color adjustment in single-shade resins post-dental bleaching: A systematic review. Journal of Clinical Medicine, 14, 3194. Doi: 10.3390/jcm14093194.

Mohammadipour, H. S., Yazdi, S. S., Mashhad, M. J. M., Babazadeh, S. & Shahri, A. (2025). Color matching and translucency of single-shade resin composites: Effects of restoration thickness, background shade, and aging. BMC Oral Health, 25, 616. Doi: 10.1186/s12903-025-05975-7.

Mohsen, M., Pergolini, D., Nistor, E. B., Habilaj, S., Migliau, G., Marini Grassetti, F., Polimeni, A. & Palaia, G. (2026). Color stability of single-shade resin composites: A systematic review of in vitro studies and clinical implications. Dentistry Journal, 14 (5), 293. Doi: 10.3390/dj14050293.

Morsy, N. & Holiel, A. A. (2023). Color difference for shade determination with visual and instrumental methods: A systematic review and meta-analysis. Systematic Reviews, 12, 95. Doi: 10.1186/s13643-023-02263-9.

Oivanen, M., Keulemans, F., Garoushi, S., Vallittu, P. K. & Lassila, L. (2021). The effect of refractive index of fillers and polymer matrix on translucency and color matching of dental resin composite. Biomaterial Investigations in Dentistry, 8 (1), 48-53. Doi: 10.1080/26415275.2021.1906879.

Perez, B. G., Miotti, L. L., Susin, A. H., Durand, L. B., Lopes, G. C. & Della Bona, A. (2023). Masking ability of resin composites: A scoping review. Journal of Esthetic and Restorative Dentistry, 35 (2), 333-344. Doi: 10.1111/jerd.12976.

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. Doi: 10.1111/jerd.12488.

Rashid, F., Farook, T. H. & Dudley, J. (2023). Digital shade matching in dentistry: A systematic review. Dentistry Journal, 11 (11), 250. Doi: 10.3390/dj11110250.

Rosa, E. D. A. R., da Silva, L. F. V., Silva, P. F. D. & Faria-e-Silva, A. L. (2024). Color matching and color recovery in large composite restorations using single-shade or universal composites. Brazilian Dental Journal, 35, e245665. Doi: 10.1590/0103-6440202405665.

Saegusa, M., Kurokawa, H., Takahashi, N., Takamizawa, T., Ishii, R., Shiratsuchi, K. & Miyazaki, M. (2021). Evaluation of color-matching ability of a structural colored resin composite. Operative Dentistry, 46 (3), 306-315. Doi: 10.2341/20-002-L.

Tabatabaian, F., Beyabanaki, E., Alirezaei, P. & Epakchi, S. (2021). Visual and digital tooth shade selection methods, related effective factors and conditions, and their accuracy and precision: A literature review. Journal of Esthetic and Restorative Dentistry, 33 (8), 1084-1104. Doi: 10.1111/jerd.12816.

Tepe, H., Çeliksöz, Ö., Biçer, Z. & Yaman, B. (2024). Evaluating the effects of bleaching on color stability and surface roughness in single-shade and multi-shade resin composites. Anatolian Current Medical Journal, 6 (3), 372-381. Doi: 10.38053/acmj.1543644.

Zhu, J., Chen, S., Anniwaer, A., Xu, Y. & Huang, C. (2023). Effects of background color and restoration depth on color adjustment potential of a new single-shade resin composite versus multi-shade resin composites. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 11, 1328673. Doi: 10.3389/fbioe.2023.1328673.

BÖLÜM 3

Self-Healing Bioactive Composites in Restorative Dentistry

***Merve Haberal*[1]**

[1] Assist. Prof., Department of Restorative Dentistry, Faculty of Dentistry, Kırıkkale University, ORCID ID: 0000-0003-2804-0947

1. Introduction

Modern dental composites have evolved from inert materials designed merely to fill cavities into complex polymer-ceramic systems in which mechanical, optical, and biological functions are integrated. Nevertheless, their clinical longevity remains limited by the interplay among patient-related factors, such as caries risk and parafunctional habits, operator technique, cavity geometry, and material properties. From a materials perspective, a critical process is the progressive growth of initially microscopic and clinically undetectable defects under repetitive loading. Residual stresses generated by polymerization shrinkage, masticatory forces, differences in thermal expansion, and water penetration into the polymer network can facilitate the initiation, propagation, and coalescence of microcracks (Althaqafi et al., 2020; Wu et al., 2016; Zhang et al., 2024).

Therefore, simply increasing the initial strength of the material is not a sufficient strategy. Although a high filler content or a highly rigid polymer network may improve initial mechanical properties, these approaches cannot actively repair an existing crack. The self-healing concept introduces a distinct design paradigm: damage triggers a repair mechanism pre-incorporated within the material, allowing the crack path to be filled with a healing agent or reversible bonds within the polymer network to reorganize. The objective is to reduce stress concentration at the crack tip, retard crack propagation, and restore at least part of the load-bearing capacity of the restoration (Fugolin & Pfeifer, 2022; Li et al., 2023).

The bioactive dimension further emphasizes that repair should not be limited to mechanical recovery. Crack formation at restoration margins may increase microleakage and promote biofilm retention. Accordingly, an ideal next-generation composite should not only seal cracks but also suppress bacterial metabolism, provide buffering and/or ion release against acidic challenges, and promote remineralization of demineralized dental tissues. The integration of calcium-phosphate sources, such as nanoparticles of amorphous calcium phosphate (NACP), and polymerizable antibacterial monomers, such as dimethylaminohexadecyl methacrylate (DMAHDM), with self-healing microcapsules represents one of the most prominent examples of this multifunctional design strategy (Wu et al., 2015; Yue et al., 2018).

2. Conceptual and Chronological Development

The introduction of self-healing composites into dentistry originated from the adaptation of autonomous repair concepts developed in polymer engineering to biomedical applications. A major milestone was the work of White et al. (2001), who demonstrated autonomous healing in an epoxy matrix using microencapsulated dicyclopentadiene (DCPD) and a catalyst, establishing a fundamental model for capsule-based self-healing systems. Subsequent

developments demonstrated that microvascular networks could enable repeated healing, introducing replenishable repair architectures as an alternative to single-use microcapsule systems (Toohey et al., 2007).

An important early step toward dental applications was reported by Wertzberger et al. (2010), who characterized a DCPD-based self-healing approach within the context of restorative materials. Subsequent research shifted toward alternative healing chemistries with greater potential and compatibility for dental applications. In this context, pioneering studies by Wu and coworkers introduced dental-compatible self-healing resin systems based on poly(urea-formaldehyde) (PUF) microcapsules encapsulating a polymerizable triethylene glycol dimethacrylate-N,N-dihydroxyethyl-p-toluidine (TEGDMA-DHEPT) healing agent. Across a series of seminal investigations, their group not only demonstrated substantial recovery of fracture toughness without compromising baseline mechanical properties (Wu et al., 2016), but also seamlessly coupled this autonomic mechanical repair mechanism with bioactive components, specifically NACP for remineralization and DMAHDM for contact antibacterial action (Wu et al., 2015). In parallel, alternative healing chemistries were explored; for instance, Huyang et al. (2016) proposed an extrinsic system combining strontium fluoride-aluminosilicate powder with polyacrylic acid encapsulated within silica microcapsules to generate a glass-ionomer-like repair phase within developing cracks.

This multifunctional design concept was subsequently extended to adhesive resins by Yue et al. (2018), who demonstrated significant fracture toughness recovery and antibiofilm activity without compromising dentin bond strength. Systematic reviews have since highlighted the considerable variability in healing efficiency depending on capsule composition, shell wall thickness, and experimental conditions (Althaqafi et al., 2020).

More recent investigations have focused on optimizing structural parameters and incorporating additional functional nanomaterials. Ning et al. (2021) demonstrated that microcapsule size and initiator concentration are key determinants of healing efficiency in commercial flowable composites. Subsequently, functional additives such as nanoclays, silica, chitosan, and titanium dioxide (TiO_2) have been explored to enhance mechanical reinforcement, biocompatibility, and antibacterial durability (Althaqafi et al., 2022, 2024; Menikheim et al., 2022; Ravandi et al., 2023, 2024).

Recent reviews have increasingly positioned self-healing dental composites within the broader concept of multifunctional and sustainable restorative materials. Rather than focusing exclusively on mechanical crack repair, contemporary approaches aim to integrate autonomous healing with antibacterial activity, ion release, remineralization, and long-term preservation of the tooth-restoration interface. Nevertheless, the limited availability of clinical evidence

remains one of the major barriers to translating these promising laboratory-based technologies into routine restorative practice (Khan, 2025; Noorudeen et al., 2026; Wang & Ding, 2024; Zhang et al., 2024). The chronological development and key milestones in the evolution of self-healing bioactive dental composites are summarized in Table 1.

Table 1. Evolution of Self-Healing Bioactive Dental Composites

Year	Study	Key Contribution
2001	White et al.	Established the fundamental model of autonomous healing in polymer composites
2007	Toohey et al.	Introduced the concept of repeatable and replenishable healing
2010	Wertzberger et al.	Early adaptation of the self-healing concept to dental materials
2015	Wu et al.	Integrated self-healing capability with antibacterial activity and calcium-phosphate-based bioactivity in a multifunctional dental composite
2016	Wu et al.	Demonstrated substantial recovery of fracture toughness while maintaining mechanical properties at appropriate microcapsule concentrations
2016	Huyang et al.	Introduced an alternative, potentially clinically compatible chemistry beyond PUF/TEGDMA-DHEPT systems
2018	Yue et al.	Demonstrated fracture toughness recovery and antibiofilm activity at the adhesive interface
2020	Althaqafi et al.	Demonstrated considerable variability in reported self-healing performance across dental systems
2021	Ning et al.	Identified microcapsule size and initiator concentration as important determinants of healing efficiency
2022	Althaqafi et al.	Demonstrated the influence of microcapsule content on the mechanical properties of the composite
2022	Menikheim et al.	Demonstrated the potential transferability of capsule chemistry across biomedical applications
2023	Ravandi et al.	Demonstrated self-healing capability with preservation of performance following water aging
2024	Ravandi et al.	Focused on antibacterial and mechanical optimization and durability following aging

2024	Althaqafi et al.	Advanced the characterization and optimization of healing-agent microcapsule synthesis
2025, 2026	Khan, Noorudeen et al.	Emphasized clinical translation and the need for long-term evidence

PUF, poly(urea-formaldehyde); TEGDMA, triethylene glycol dimethacrylate; DHEPT, N,N-dihydroxyethyl-p-toluidine.

3. Classification of Self-Healing Mechanisms

Self-healing materials are conventionally classified in the engineering literature into three major categories: extrinsic systems, based on capsules or reservoirs; intrinsic systems, based on dynamic covalent or supramolecular networks; and vascular systems, in which healing agents are delivered through interconnected channels (Hager et al., 2010; Wang, Pham, & Ji, 2015). Among these approaches, dental research has predominantly focused on extrinsic microcapsule-based systems because of their relatively straightforward integration into resin-based restorative materials.

3.1. Extrinsic Microcapsule-Based Systems

Extrinsic microcapsule-based systems are the most extensively investigated self-healing approach in dental materials. In these systems, a healing agent is encapsulated and physically separated from the polymer matrix. When a propagating crack reaches a microcapsule, the capsule ruptures and releases the healing agent, which flows into the crack by capillary action and subsequently polymerizes. Since this process is directly triggered by damage without external intervention, it represents a form of autonomous self-healing (Althaqafi et al., 2020; Fugolin & Pfeifer, 2022).

In commonly investigated dental systems, low-viscosity healing agents such as TEGDMA-DHEPT are encapsulated within PUF shells. Following capsule rupture, the interaction between DHEPT and benzoyl peroxide (BPO) initiates free-radical polymerization, forming a new polymer phase within the crack and partially restoring mechanical integrity (Wu et al., 2015, 2016).

In multifunctional formulations, this mechanism can be combined with bioactive components such as NACP for remineralization and DMAHDM for antibacterial activity (Wu et al., 2015; Yue et al., 2018).

Healing efficiency depends primarily on capsule chemistry, size, concentration, and the reactivity of the healing agent. Although larger or more numerous capsules may increase the availability of the healing agent, excessive incorporation can reduce mechanical properties by decreasing the reinforcing filler fraction and introducing interfacial defects. Therefore, an optimal balance between initial mechanical strength and healing capacity is essential (Althaqafi et al., 2022; Ning et al., 2021; Wu et al., 2016).

Alternative capsule chemistries, including silica-based systems capable of forming glass-ionomer-like repair phases and biocompatible nanocapsules, have also been investigated. These approaches may expand the potential applications of extrinsic self-healing systems while improving their biocompatibility (Huyang et al., 2016; Menikheim et al., 2022).

3.2. Vascular and Reservoir-Based Systems

In vascular self-healing systems, the healing agent is transported through microchannels or interconnected networks embedded within the material rather than being stored in discrete capsules. Their principal theoretical advantage is the possibility of repeated healing, particularly when the vascular network can be replenished from an external reservoir. This feature distinguishes vascular systems from conventional microcapsules, which generally provide a single healing event at the site of capsule rupture (Toohey et al., 2007).

Despite this advantage, translation of vascular systems to restorative dentistry remains challenging. Dental restorations have limited dimensions and typically require high filler loading to provide adequate mechanical properties. Incorporating vascular networks may interfere with filler distribution, weaken the restorative structure, and complicate light-curing procedures. Consequently, although vascular self-healing is an established concept in engineering composites, its development in dental restorative materials remains considerably less advanced than that of microcapsule-based approaches (Fugolin & Pfeifer, 2022).

3.3. Intrinsic Self-Healing Networks

Unlike extrinsic systems, intrinsic self-healing materials do not require a separate healing agent. Instead, repair relies on reversible interactions within the polymer network, allowing damaged chains to reorganize and potentially undergo repeated healing. Intrinsic approaches mainly include dynamic covalent and supramolecular systems.

Dynamic covalent networks use reversible reactions such as Diels-Alder reactions or disulfide exchange. Diels-Alder systems can reform disrupted bonds through thermally reversible reactions, although the relatively high temperatures required may limit their dental application. Disulfide-based networks offer an alternative mechanism in which dynamic S-S bonds can rearrange under appropriate stimuli, enabling partial recovery of the polymer structure (Khan, 2025).

Supramolecular systems rely on reversible noncovalent interactions, including hydrogen bonding, ionic associations, and host–guest interactions. Their major advantage is the potential for repeated healing without depletion of a stored healing agent. However, the need for external stimuli and the challenge of combining molecular mobility with the high mechanical strength required for

dental restorations remain important limitations. Consequently, although intrinsic self-healing systems are promising, evidence supporting their application in restorative dentistry remains limited compared with extrinsic microcapsule-based systems (Fugolin & Pfeifer, 2022; Khan, 2025; Li et al., 2023).

4. Bioactivity: From Mechanical Repair to Biologically Guided Restoration

4.1. Remineralization and Calcium-Phosphate Phases

A major component of bioactive dental composites is the controlled release of calcium and phosphate ions. Amorphous calcium phosphate (ACP)-based composites have long been investigated for their potential to promote mineral regeneration in dental tissues (Skrtic & Antonucci, 2011). More recently, NACP have extended this concept by providing an ion-releasing phase capable of increasing calcium and phosphate availability, particularly under acidic conditions.

The integration of NACP with self-healing microcapsules represents an important step toward multifunctional restorative materials. While microcapsules primarily repair structural damage within the composite, NACP influences the surrounding mineral environment by providing ions that may promote remineralization. These mechanisms are therefore complementary rather than identical. Their combination within a single material forms the basis of the bioactive self-healing concept, in which mechanical repair is accompanied by a biologically favorable response (Skrtic & Antonucci, 2011; Wu et al., 2015; Yue et al., 2018).

Natural polymers may further contribute to bioactive material design. Polysaccharides such as chitosan have attracted attention because of their biocompatibility, biodegradability, antimicrobial properties, and ability to interact with calcium-phosphate phases (Niziołek et al., 2024). Although much of the supporting evidence originates from the broader biomaterials literature, these properties provide a rationale for exploring biopolymers as functional components of bioactive dental composites.

4.2. Antibacterial Function

The biological relevance of self-healing extends beyond crack closure, as structural defects and marginal gaps may provide protected sites for biofilm accumulation and contribute to secondary caries. Consequently, multifunctional self-healing composites have been designed to combine mechanical repair with antibacterial activity.

Polymerizable quaternary ammonium monomers, particularly DMAHDM, have been widely investigated for this purpose. DMAHDM acts primarily through a contact-active mechanism involving interactions between positively

charged quaternary ammonium groups and negatively charged bacterial membranes. Studies combining DMAHDM with NACP and self-healing microcapsules have demonstrated marked reductions in biofilm viability and acid production while maintaining the capacity for mechanical repair and remineralization (Wu et al., 2015; Yue et al., 2018).

An important advantage of polymerizable antibacterial monomers is their incorporation into the resin network, which may provide a more persistent antibacterial effect than agents based solely on continuous release. However, their long-term effectiveness may be influenced by salivary pellicle formation and biofilm maturation. Therefore, future evaluation should increasingly incorporate clinically relevant models involving multispecies biofilms, salivary pellicles, and repeated acidic challenges (Wang & Ding, 2024).

4.3. Multifunctional Reinforcement with Chitosan, TiO_2, and Nanoclay

Recent research has explored the incorporation of additional functional components, including nanoclay, chitosan, and TiO_2, to further enhance the performance of self-healing composites. Nanoclay may improve mechanical reinforcement and modify crack propagation because of its high surface area and layered structure. Studies suggest that nanoclay can be combined with self-healing microcapsules while maintaining healing capability, although homogeneous dispersion is essential to prevent agglomeration and defect formation (Ravandi et al., 2023).

Chitosan and nano-TiO_2 have also been investigated because of their potential antimicrobial, biological, and mechanical benefits. Their incorporation into microcapsule-containing composites has shown that appropriate concentrations may improve healing and antibacterial performance, whereas excessive concentrations can promote particle agglomeration and compromise material properties (Ravandi et al., 2024). This highlights an important principle in multifunctional composite design: increasing the concentration of a functional additive does not necessarily produce greater benefit.

Aging studies further indicate that preservation of self-healing capacity does not necessarily imply preservation of the overall mechanical properties of the composite. The polymer matrix may continue to undergo hydrolytic degradation even when the healing mechanism remains functional (Ravandi et al., 2023, 2024). Therefore, healing efficiency and overall material durability should be considered as distinct outcomes.

Overall, the incorporation of NACP, DMAHDM, chitosan, TiO_2, and nanoclay illustrates the transition of self-healing composites from materials designed primarily for crack repair toward multifunctional bioactive restorative systems. Nevertheless, improvements observed under laboratory conditions should not be directly interpreted as clinical superiority. Long-term studies

addressing aging, biocompatibility, polymerization behavior, optical properties, surface characteristics, and biofilm interactions remain necessary before these systems can be translated into routine restorative dentistry (Niziołek et al., 2024; Ravandi et al., 2024; Wang & Ding, 2024).

5. Assessment of Self-Healing Efficiency and Interpretation of Outcomes

Self-healing efficiency in dental composites is commonly evaluated by measuring fracture toughness (KIC) before and after a controlled healing period. Typically, pre-notched specimens are fractured, the separated surfaces are repositioned to allow the healing mechanism to occur, and fracture toughness is subsequently reassessed. Healing efficiency is generally expressed as the percentage of recovered fracture toughness relative to the original value (Althaqafi et al., 2020; Fugolin & Pfeifer, 2022; Ravandi et al., 2024).

Although this approach provides a practical and comparable measure of self-healing performance, the results are highly dependent on experimental conditions, including specimen geometry, notch characteristics, alignment of the fractured surfaces, healing time, temperature, and aging environment. Moreover, laboratory models involving complete fracture and repositioning of specimens may not accurately reproduce the subcritical microcracks that self-healing systems are primarily intended to repair under clinical conditions (Althaqafi et al., 2020; Fugolin & Pfeifer, 2022). This limitation highlights the need for nondestructive monitoring approaches capable of evaluating crack initiation, propagation, and healing without requiring complete specimen fracture and manual repositioning. In this context, acoustic emission analysis allows for the real-time detection of microdamage events during mechanical loading. Complementarily, micro-computed tomography (micro-CT) enables non-destructive, three-dimensional, and longitudinal visualization of crack morphology and crack–capsule interactions within the same specimen, offering a clinically relevant framework to evaluate self-healing under subcritical and cyclic loading conditions.

Therefore, reported healing percentages should be interpreted cautiously. Recovery of fracture toughness does not necessarily indicate equivalent recovery of other clinically relevant properties, such as fatigue resistance, wear resistance, marginal integrity, or bond strength. Furthermore, capsule-based systems generally provide a single healing event at the site of capsule rupture, which may limit their ability to respond to repeated damage in the same region. This limitation provides an important rationale for the continued development of intrinsic and vascular self-healing approaches (Fugolin & Pfeifer, 2022; Khan, 2025).

Future studies should employ testing strategies that more closely simulate the dynamic oral environment and evaluate damage development under cyclic loading and aging conditions. Combining nondestructive damage-monitoring

techniques with mechanically and environmentally relevant aging protocols could provide a more clinically meaningful assessment of when healing is initiated, how effectively cracks are arrested or repaired, and whether this response persists under repeated functional loading. Such approaches may help bridge the gap between experimentally measured fracture toughness recovery and the actual behavior of subcritical microcracks in dental restorations. Importantly, given the substantial methodological heterogeneity among studies, reported self-healing efficiencies should be interpreted within the context of the specific experimental conditions of each investigation rather than directly compared across different material systems.

6. Critical Considerations in Formulation Design

6.1. Capsule-Matrix Interface and Mechanical Integrity

Microcapsules must maintain a balance between structural stability and responsiveness to damage. They should withstand manufacturing, placement, and polymerization while remaining sufficiently fragile to rupture when intersected by a propagating crack. Excessively strong capsules may deflect cracks, whereas weak capsules may release the healing agent prematurely. Therefore, capsule shell properties, surface morphology, and interfacial compatibility with the resin matrix are critical determinants of self-healing performance (Althaqafi et al., 2024).

Surface modification of microcapsules, particularly silanization with suitable silane coupling agents, may further improve capsule–matrix compatibility by promoting stronger interfacial interactions between the capsule shell and the methacrylate-based resin matrix. Such treatment can enhance chemical coupling and interfacial adhesion, thereby improving stress transfer and mechanical interlocking while reducing the likelihood that the capsule-matrix interface acts as a premature defect site (Althaqafi et al., 2020; Wang & Ding, 2024).

6.2. Healing Agent Viscosity and Polymerization

The healing agent should have sufficiently low viscosity to penetrate microcracks by capillary action while remaining stable within the capsule before damage occurs. TEGDMA is particularly suitable because of its compatibility with conventional dental resin chemistry. In TEGDMA-DHEPT/BPO systems, redox polymerization enables the healing agent to polymerize within cracks even in areas with limited light access. This approach represents a more dental-compatible alternative to earlier DCPD/catalyst-based systems (Althaqafi et al., 2020; Wu et al., 2016).

6.3. Biocompatibility and Toxicological Considerations

Biocompatibility assessment should address all major components of the self-healing system, including the capsule shell, healing agent, and initiator or catalyst. Although experimental TEGDMA-DHEPT/BPO systems have demonstrated acceptable cytocompatibility in vitro, short-term single-cell assays cannot establish long-term biological safety (Ravandi et al., 2024; Wu et al., 2016). Future studies should therefore include assessment of genotoxicity, inflammatory responses, degradation products, and long-term elution. Particular attention is also required for formaldehyde-based PUF capsule shells, supporting the development of alternative biocompatible capsule chemistries (Huyang et al., 2016; Menikheim et al., 2022).

6.4. Filler Content, Bioactive Phases, and Clinical Properties

The incorporation of self-healing microcapsules and bioactive particles can influence the mechanical, optical, and handling properties of dental composites. Excessive capsule loading may reduce the reinforcing filler fraction and adversely affect strength, translucency, polishability, polymerization behavior, and long-term surface properties (Noorudeen et al., 2026; Ravandi et al., 2024; Wang & Ding, 2024; Wu et al., 2016). Furthermore, refractive index mismatches between the resin matrix, microcapsules, and bioactive fillers can exacerbate light scattering and reduce light transmission, negatively impacting color matching while limiting the depth of cure and degree of conversion; insufficient polymerization may subsequently increase the elution of unreacted monomers, raising cytotoxicity concerns.

Accordingly, formulation design should not aim solely to maximize self-healing efficiency. Healing performance must be balanced with mechanical strength, polymerization behavior, optical properties, aging resistance, and clinical handling. Successful translation therefore requires optimization of the entire composite system rather than improvement of a single functional property.

7. Self-Healing Adhesives and Resin Cements

Crack formation in restorative systems is not limited to the bulk composite. The dentin-adhesive-composite interface is particularly susceptible to long-term degradation because of moisture, polymerization stress, collagen degradation, and enzymatic activity. Therefore, extending self-healing strategies to dental adhesives represents an important step toward improving interfacial durability.

Yue et al. (2018) developed an experimental adhesive combining PUF-based self-healing microcapsules with DMAHDM and NACP. The system demonstrated substantial recovery of fracture toughness, strong antibiofilm activity, and dentin bond strength comparable to that of a commercial control. These findings suggest that mechanical repair, antibacterial activity, and remineralization may potentially be integrated within the adhesive interface.

A similar concept may be applied to resin cements to limit the propagation of microdefects within the thin cement layer between the tooth and indirect restoration. However, limited film thickness imposes an important constraint on microcapsule size. Consequently, smaller micro- or nanoscale reservoirs, silica-based capsules, or intrinsic self-healing networks may be more suitable for resin cement applications. Although promising, self-healing resin cements remain at an earlier stage of development than self-healing restorative composites (Fugolin & Pfeifer, 2022; Khan, 2025).

8. Translational Challenges in the Oral Environment

Controlled laboratory fracture models provide only a simplified representation of the complex damage experienced by restorations in the oral environment. Clinically, restorative materials are continuously exposed to cyclic mechanical loading, thermal fluctuations, moisture, salivary enzymes, changes in pH, and complex biofilms. Hydrolytic degradation of the resin matrix, deterioration of the silane interface, and filler loss may occur simultaneously. Therefore, even when a self-healing agent successfully repairs a crack, it cannot fully restore the surrounding aged material. Self-healing should thus be regarded primarily as a strategy to limit damage progression rather than reverse material aging (Althaqafi et al., 2020; Khan, 2025; Zhang et al., 2024).

Another challenge is the unpredictable interaction between propagating cracks and healing components. In microcapsule-based systems, successful healing requires the crack to intersect a capsule. Increasing capsule concentration may improve this probability but can negatively affect mechanical and optical properties. Advanced imaging and computational fracture models may therefore help optimize capsule distribution and crack–capsule interactions (Fugolin & Pfeifer, 2022).

Most importantly, laboratory recovery of fracture toughness should not be considered the ultimate measure of clinical success. The true clinical value of self-healing materials will depend on their ability to preserve marginal integrity,

reduce fracture and secondary caries, and ultimately decrease the need for restoration replacement. Current evidence remains predominantly based on in vitro studies, and long-term clinical superiority has yet to be established (Khan, 2025; Noorudeen et al., 2026).

9. Sustainability and Restoration Longevity

The potential sustainability of self-healing dental materials is primarily associated with their ability to extend restoration longevity and reduce the restorative replacement cycle. Replacing a restoration requires additional restorative materials, disposable supplies, energy, water, sterilization procedures, and clinical time, while repeated cavity preparation may result in further loss of healthy tooth structure. By reducing the frequency of replacement, self-healing materials could therefore contribute to more resource-efficient and minimally invasive restorative care (Khan, 2025).

However, the environmental benefits of these materials remain largely theoretical. The production of self-healing composites may itself require additional energy, chemicals, microcapsule synthesis, nanoparticle production, and purification processes. A genuine sustainability advantage would therefore depend on whether increased clinical longevity compensates for the additional environmental burden associated with manufacturing.

Future studies should evaluate sustainability alongside mechanical and biological performance through life-cycle assessment, resource and waste analysis, and cost-effectiveness modeling. Such evidence is necessary to determine whether self-healing composites can provide measurable environmental and economic benefits rather than merely theoretical advantages (Khan, 2025).

10. Limitations and Evidence Gaps

The major limitation of self-healing bioactive dental composites is the current level of evidence. Most favorable outcomes have been obtained under controlled in vitro conditions, which cannot fully reproduce the combined mechanical, thermal, chemical, enzymatic, and microbiological challenges of the oral environment. Consequently, robust clinical evidence demonstrating prolonged restoration longevity or reduced secondary caries remains limited (Noorudeen et al., 2026).

Several additional limitations should be considered. Microcapsule-based systems generally provide a single healing event because the encapsulated agent is depleted after capsule rupture. Increasing microcapsule content may improve the probability of crack–capsule interaction but can compromise the initial mechanical, optical, and wear properties of the material. Furthermore, incorporating multiple bioactive components increases formulation complexity

and may introduce unfavorable interactions among constituents (Althaqafi et al., 2020; Noorudeen et al., 2026).

Another important limitation is the lack of standardized testing protocols. Differences in capsule size, healing conditions, specimen geometry, aging procedures, and outcome measures make direct comparison among studies difficult. More importantly, the clinical significance of experimentally measured healing remains uncertain. Recovery of fracture toughness or reduction in bacterial activity cannot yet be directly translated into additional years of restoration survival or a measurable reduction in secondary caries. Future research should therefore establish stronger links between material-level outcomes and clinically relevant patient-level outcomes (Althaqafi et al., 2020; Noorudeen et al., 2026).

11. Future Research Directions and Clinical Translation

Research is progressively moving from single-function crack-repair systems toward adaptive and multifunctional restorative materials. One major objective is repeatable healing. Because conventional microcapsules are generally single-use, intrinsic dynamic networks and hybrid capsule-intrinsic systems may offer greater potential for responding to repeated damage (Khan, 2025; Li et al., 2023).

A second priority is the development of stimuli-responsive bioactivity. Rather than continuously releasing active components, future materials could respond selectively to pathological conditions, such as acidic pH, increased biofilm activity, or crack formation. Controlled calcium and phosphate release, responsive antibacterial activity, and localized delivery of remineralizing agents could improve functionality while preserving material resources (Niziołek et al., 2024; Wang & Ding, 2024).

Standardization is also essential. Future studies should use comparable protocols for crack generation, healing conditions, aging, and mechanical testing. Evaluation should extend beyond fracture toughness recovery to include fatigue behavior, wear, water sorption, degree of conversion, bond durability, marginal integrity, and biofilm-related outcomes (Althaqafi et al., 2020; Fugolin & Pfeifer, 2022). Long-term combined aging models incorporating thermal cycling, mechanical fatigue, enzymatic challenges, and biofilm exposure would provide a more realistic assessment of material performance.

Clinical translation should follow a stepwise pathway from formulation optimization and long-term laboratory aging to restoration-based models, complex biological models, and controlled clinical trials. Clinical studies should evaluate standardized outcomes such as marginal adaptation and discoloration, fracture, wear, postoperative sensitivity, secondary caries, and the need for repair or replacement (Noorudeen et al., 2026). Manufacturing feasibility,

biocompatibility, cost-effectiveness, and life-cycle sustainability should also be incorporated into the translational pathway.

12. Clinical Relevance and Critical Perspective

The principal theoretical advantage of self-healing materials is their ability to respond to microscopic damage before it progresses to clinically detectable failure. Unlike conventional restorations, in which intervention generally occurs after marginal or bulk fracture becomes evident, autonomous systems may stabilize early microdamage without operator intervention. Their multifunctional potential further allows mechanical repair to be combined with antibacterial and remineralizing functions, thereby addressing both fracture and secondary caries, two major causes of restoration failure (Althaqafi et al., 2020; Noorudeen et al., 2026; Wu et al., 2015; Yue et al., 2018).

Potential applications include posterior composites exposed to repetitive mechanical stress, adhesive interfaces susceptible to degradation, and microscopic defects that are inaccessible to conventional repair. Nevertheless, self-healing should not be expected to repair extensive bulk fractures, replace lost restorative material, or compensate for severe contamination. Its primary objective is to stabilize early microdamage and delay its progression toward catastrophic failure.

Bioactive components may further support this strategy through complementary mechanisms, including mineral ion release from NACP, antibacterial activity from DMAHDM, and additional functional modification using materials such as chitosan and TiO_2 (Ravandi et al., 2024; Wu et al., 2015; Yue et al., 2018). However, each additional component increases formulation complexity. Future material development should therefore prioritize the simplest formulation that provides a measurable clinical benefit for a specific indication, rather than maximizing the number of incorporated functions.

Overall, self-healing bioactive composites represent a transition from passive restorative materials toward systems capable of responding to structural and biological challenges. Their future clinical value will ultimately depend not only on demonstrating self-healing under laboratory conditions but also on proving long-term safety, durability, clinical effectiveness, and meaningful improvement in restoration longevity.

13. Conclusion

Self-healing bioactive composites represent an important step in the evolution of restorative dentistry from passive materials toward adaptive restorative systems capable of responding to both structural damage and biological challenges. Unlike conventional composites, which primarily rely on their initial

mechanical properties to resist failure, self-healing materials are designed to respond to developing microdamage and potentially limit crack propagation before clinically detectable failure occurs. When combined with antibacterial and remineralizing components, this concept extends beyond mechanical repair toward a multifunctional approach that may simultaneously address fracture, secondary caries, and degradation of the tooth-restoration interface.

Among the available strategies, microcapsule-based systems currently have the strongest experimental foundation and demonstrate the feasibility of autonomous crack repair within resin-based restorative materials. However, their single-use nature, potential effects on mechanical and optical properties, and dependence on successful interaction between the propagating crack and the healing reservoir remain important limitations. Intrinsic and vascular approaches may provide opportunities for repeatable healing, although their application in dental materials is still at an earlier stage of development.

Importantly, self-healing should not be interpreted as complete regeneration of a damaged restoration. Its primary clinical purpose would be to stabilize microscopic damage, delay its progression, and preserve restoration integrity for a longer period. The most successful future materials will therefore not necessarily be those with the highest laboratory healing efficiency or the greatest number of functional additives, but those that achieve an appropriate balance among healing capability, mechanical durability, bioactivity, esthetics, biocompatibility, and clinical handling.

Although current experimental findings are promising, the transition from laboratory concepts to routine clinical use requires further evidence. Standardized testing methods, clinically relevant aging models, comprehensive biological evaluation, and long-term clinical studies are essential to determine whether self-healing bioactive composites can meaningfully reduce restoration failure and replacement. If these challenges can be addressed, self-healing technology may contribute to a new generation of adaptive, minimally invasive, and longer-lasting restorative materials.

References

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.

Althaqafi, K . A., AlShabib, A., Satterthwaite, J., & Silikas, N. (2022). Properties of a model self-healing microcapsule-based dental composite reinforced with silica nanoparticles. *Journal of Functional Biomaterials*, 13(1), 19.

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.

Fugolin, A. P., & Pfeifer, C. S. (2022). Strategies to design extrinsic stimuli-responsive dental polymers capable of autorepairing. *JADA Foundational Science*, 1, 100013.

Hager, M. D., Greil, P., Leyens, C., Van Der Zwaag, S., & Schubert, U. S. (2010). Self-healing materials. *Advanced Materials*, 22(47), 5424-5430.

Huyang, G., Debertin, A. E., & Sun, J. (2016). Design and development of self-healing dental composites. *Materials & Design*, 94, 295-302.

Khan, A. A. (2025). Self-healing dental biomaterials: bioinspired pathways to sustainable dentistry. *Biomaterial Investigations in Dentistry*, 12, 45229.

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.

Menikheim, S., Leckron, J., Duffy, M., Zupan, M., Mallory, A., Lien, W., & Lavik, E. (2022). Biocompatible nanocapsules for self-healing dental resins and bone cements. *ACS Omega*, 7(36), 31726-31735.

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.

Niziołek, K., Słota, D., & Sobczak-Kupiec, A. (2024). Polysaccharide-based composite systems in bone tissue engineering: A review. *Materials*, 17(17), 4220.

Noorudeen, A. A., Shetty, S. V., Mariyam, N., & Harikrishnan, N. (2026). Self-healing bioactive composites: A review of emerging strategies in restorative dentistry. *Giornale Italiano di Endodonzia*, 40(2), 37-47.

Ravandi, R., Heris, S. Z., Hemmati, S., & Davaran, S. (2023). Development of a novel self-healing dental nanocomposite containing PUF nanocapsules and nanoclay. *Materials Today Chemistry*, 27, 101302.

Ravandi, R., Heris, S. Z., Hemmati, S., Aghazadeh, M., Davaran, S., & Abdyazdani, N. (2024). Effects of chitosan and TiO_2 nanoparticles on the antibacterial property and ability to self-healing of cracks and retrieve mechanical characteristics of dental composites. *Heliyon*, 10(6), e27734.

Skrtic, D., & Antonucci, J. M. (2011). Bioactive polymeric composites for tooth mineral regeneration: physicochemical and cellular aspects. *Journal of Functional Biomaterials*, 2(3), 271-307.

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.

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.

Wang, Y., Pham, D. T., & Ji, C. (2015). Self-healing composites: A review. *Cogent Engineering*, 2(1), 1075686.

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.

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.

Wu, J., Weir, M. D., Melo, M. A. S., & Xu, H. H. (2015). Development of novel self-healing and antibacterial dental composite containing calcium phosphate nanoparticles. *Journal of Dentistry*, 43(3), 317-326.

Wu, J., Weir, M. D., Zhang, Q., Zhou, C., Melo, M. A. S., & Xu, H. H. (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.

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.

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.

BÖLÜM 4

Quantitative Light-Induced Fluorescence in Caries Detection and Preventive Dentistry: Evidence for Monitoring Enamel Remineralization

***Ahmad Bittar*[1]**

[1] Assistant Professor, DDS, PhD., Department of Restorative Dentistry, Faculty of Dentistry, İstinye University, Istanbul, Türkiye, ORCID: 0009-0009-3305-5298

1. Introduction

Contemporary caries management depends on detecting non-cavitated lesions and determining whether they are progressing, stable, or responding to preventive care before restorative intervention becomes necessary. Visual examination and bitewing radiography remain central to diagnosis, but categorical scores may be relatively insensitive to small longitudinal changes. Quantitative light-induced fluorescence (QLF) offers non-ionizing, image-based assessment and generates continuous variables that can be compared over time (Angmar-Månsson & ten Bosch, 2001; de Josselin de Jong et al., 1995).

The phrase 'QLF measures remineralization' nevertheless requires qualification. QLF does not directly assay calcium, phosphate, crystal structure, or mineral density. It measures optical changes that are associated with lesion porosity and, in newer systems, red fluorescence related to bacterial metabolites. This narrative review examines QLF in caries detection and preventive dentistry, with particular emphasis on whether the available validation and longitudinal evidence is sufficient to regard it as an established method for monitoring enamel remineralization. The aim is interpretive rather than systematic: foundational method studies, diagnostic-accuracy research, preventive trials, and comparisons with transverse microradiography (TMR), surface microhardness (SMH), and micro-computed tomography (micro-CT) are considered together.

2. Optical Basis and QLF-Derived Variables

The original QLF system illuminated enamel with 488-nm laser light and recorded emitted fluorescence above 520 nm. Contemporary digital systems generally use blue-violet light around 405 nm. Sound enamel produces predominantly green autofluorescence; a porous demineralized lesion scatters excitation and emitted light, causing a localized reduction in fluorescence relative to adjacent sound tissue. Software reconstructs the expected sound-surface fluorescence and calculates the difference within a selected region of interest (Amaechi & Higham, 2002; Angmar-Månsson & ten Bosch, 2001; de Josselin de Jong et al., 1995).

Common outcomes include mean fluorescence loss (ΔF), maximum fluorescence loss (ΔFmax), lesion area, and integrated fluorescence loss (ΔQ), which combines fluorescence loss with lesion area. Depending on the software, fluorescence loss may be reported as a negative value or as its absolute magnitude. Newer QLF devices also quantify increased red fluorescence (ΔR), which is associated mainly with porphyrin-like fluorophores from mature biofilm and carious tissue (van der Veen et al., 2006). ΔF and ΔQ are therefore more directly relevant to optical changes accompanying enamel demineralization or remineralization, whereas ΔR should not be interpreted as a direct measure of mineral gain. Device generations can produce comparable ΔF values under controlled conditions, but ΔR may vary more between systems (Park et al., 2019).

3. QLF for Caries Detection

The evidence supports QLF as an adjunctive detection method rather than a stand-alone diagnostic replacement. A 2025 systematic review and meta-analysis included 17 studies and reported pooled in vivo sensitivity/specificity of 0.86/0.82 for occlusal caries and 0.74/0.82 for proximal caries. In vivo area-under-the-curve values reached 0.94-0.98 for thresholds separating sound or enamel sites from dentin lesions, although study setting, lesion threshold, reference standard, and device type contributed to heterogeneity (Lee et al., 2025). Earlier evidence similarly showed that performance is surface- and threshold-dependent (Foros et al., 2021). Combining QLF with structured visual criteria has also been investigated as a complementary approach (Ferreira Zandoná et al., 2010).

Recent clinical data illustrate this threshold effect. In 297 posterior proximal sites, QLF scoring showed an AUC of 0.729 for any radiographic caries, 0.909 for a dentin-involvement threshold, and 0.961 for radiographically deeper dentin involvement (Bittar et al., 2026). Thus, discrimination may be strong for more advanced thresholds while remaining moderate for early proximal disease. QLF images can improve documentation and diagnostic confidence, but anatomical access, plaque, stains, reflections, and the selected reference standard affect estimates. Current consensus retains structured visual examination as the first-line method and recommends radiography where clinically indicated; fluorescence methods supplement rather than replace these procedures (Kühnisch et al., 2024).

4. Role in Preventive Dentistry

QLF is particularly compatible with preventive care because serial imaging can be performed without ionizing radiation and because continuous outcomes may reveal change before cavitation becomes evident. Reported applications include monitoring smooth-surface white spot lesions, orthodontic lesions, fluoride-dentifrice or varnish response, and plaque-related red fluorescence. Image review can also support patient communication. These advantages are meaningful only when changes are interpreted within a clinical examination: a color difference alone does not establish lesion activity, arrest, or a need for operative treatment.

5. Is QLF Established for Monitoring Enamel Remineralization?

The strongest argument is not any single correlation coefficient, but triangulation across experimental models, reference methods, and longitudinal clinical studies. Early laboratory work demonstrated that fluorescence loss changed during both artificial lesion formation and remineralization (Al-Khateeb et al., 1997). A randomized clinical study in caries-active adolescents then used QLF to monitor white spot lesions over six months and detected a stronger

response to repeated fluoride-varnish application than to professional cleaning alone (Tranaeus et al., 2001). A cluster-randomized trial also showed that QLF could distinguish the longitudinal response of early lesions to fluoride-containing and non-fluoride dentifrices (Feng et al., 2007).

Table 1. Key evidence supporting and qualifying QLF-based monitoring of enamel remineralization

Study	Model / comparator	Principal finding	Interpretation
Tranaeus et al. (2001)	Clinical, 6 months; fluoride varnish vs professional cleaning	QLF detected lesion improvement and a stronger varnish response.	Supports longitudinal clinical sensitivity.
Gmür et al. (2006)	In vitro; QLF vs TMR	QLF and TMR mineral-loss outcomes correlated at r = 0.82.	Supports criterion-related validity, not interchangeability.
Gomez et al. (2014)	Human enamel, pH cycling; QLF vs SMH	QLF differentiated 0, 550, and 1,100 ppm F groups; QLF-SMH r = 0.67.	Shows treatment-dose responsiveness.
Restrepo et al. (2015)	Orthodontic WSL model; QLF vs TMR	QLF-TMR correlation r = 0.63 (95% CI 0.35-0.81).	Moderate validation against mineral loss.
Zheng et al. (2019)	In vivo rat model; QLF-D vs micro-CT	ΔQTotal correlated with mineral density at r = 0.80.	Extends evidence to an in vivo experimental model.

Source: Prepared by the author from Tranaeus et al. (2001), Gmür et al. (2006), Gomez et al. (2014), Restrepo et al. (2015), and Zheng et al. (2019).

Direct comparison with independent reference methods strengthens this evidence. Gmür et al. (2006) reported a QLF-TMR correlation of r = 0.82. In a 14-day pH-cycling study using 36 human enamel specimens, QLF distinguished 0-, 550-, and 1,100-ppm fluoride dentifrices and correlated with SMH at r = 0.67 (Gomez et al., 2014). Restrepo et al. (2015) found a moderate QLF-TMR correlation of r = 0.63 (95% CI 0.35-0.81) in an orthodontic white spot lesion model. In an in vivo rat model, ΔQTotal correlated with micro-CT mineral density at r = 0.80 and with residual enamel volume at r = 0.64 (Zheng et al., 2019). An in situ study of fluorescence devices also demonstrated that performance is technology-specific: some devices differentiated demineralization from remineralization, whereas a fluorescence camera based mainly on red signal did not (Moriyama et al., 2014).

Taken together, these studies justify describing QLF as an established non-destructive surrogate for longitudinal fluorescence changes consistent with enamel demineralization and remineralization, especially in controlled research and structured preventive follow-up. They do not justify describing QLF as a direct mineral-density measurement. Correlations of approximately 0.63-0.82 indicate shared information but also substantial unexplained variance. Treatment-group discrimination does not guarantee that a small change in one patient represents durable mineral gain. The most defensible expression is therefore

‘fluorescence recovery consistent with remineralization,’ unless an independent mineral or structural method confirms the interpretation.

6. Methodological Requirements and Sources of Bias

Longitudinal validity depends on standardization. The same device, software version, field of view, exposure, camera-to-surface distance, focus, and ambient-light control should be used at each visit. Plaque and debris should be removed using a consistent protocol, and the drying interval should be fixed because hydration changes optical scattering. Baseline and follow-up images should be registered to the same surface, with a prespecified region of interest and analysis threshold. Examiners should be trained and, where feasible, blinded to treatment and time point; repeatability should be reported (Tranaeus et al., 2002).

Interpretation must also separate mineral-related and bacterial-related signals. ΔF, ΔFmax, lesion area, and ΔQ describe loss of green fluorescence relative to sound enamel, while ΔR predominantly reflects red fluorescence and can change with plaque maturation, staining, or cleaning. Developmental defects, restorations, calculus, extrinsic stains, reflections, and inaccessible proximal geometry can create false or non-comparable signals. Different QLF generations and software algorithms should not be treated as automatically interchangeable (Oh et al., 2022; Park et al., 2019).

For clinical trials, investigators should define the direction and clinical meaning of change before analysis, account for repeated sites within patients, provide confidence intervals, and report non-interpretable images. When a new remineralizing material is being validated, pairing QLF with TMR, micro-CT, hardness testing, spectroscopy, or another independent endpoint is preferable. QLF may subsequently serve as the non-destructive longitudinal outcome once its relationship with the relevant reference method has been established for that model.

7. Clinical Interpretation

In practice, QLF is best used within a detect-document-monitor pathway. A reduction in fluorescence loss or ΔQ can support lesion arrest or remineralization when image acquisition is standardized and the clinical surface remains non-cavitated and compatible with improvement. QLF should not, in isolation, justify restoration replacement, confirm complete remineralization, or eliminate bitewing radiography when radiographic staging is required. Its greatest value is objective follow-up of accessible lesions and preventive interventions, not autonomous diagnosis.

8. Conclusion

QLF is sufficiently established to detect caries-associated fluorescence changes and to monitor longitudinal optical recovery associated with enamel remineralization. This conclusion is supported by treatment-dose responses, clinical follow-up, and moderate-to-strong relationships with TMR, SMH, and micro-CT. The limitation is equally clear: QLF is an indirect optical surrogate rather than a direct mineral assay. Scientifically responsible use therefore requires standardized imaging, appropriate parameter selection, awareness of device and surface limitations, and cautious wording that distinguishes fluorescence recovery from proven mineral replacement.

References

Al-Khateeb, S., ten Cate, J. M., Angmar-Månsson, B., de Josselin de Jong, E., Sundström, G., Exterkate, R. A. M., & Oliveby, A. (1997). Quantification of formation and remineralization of artificial enamel lesions with a new portable fluorescence device. *Advances in Dental Research*, *11*(4), 502-506. doi:10.1177/08959374970110041801

Amaechi, B. T., & Higham, S. M. (2002). Quantitative light-induced fluorescence: A potential tool for general dental assessment. *Journal of Biomedical Optics*, *7*(1), 7-13. doi:10.1117/1.1427044

Angmar-Månsson, B., & ten Bosch, J. J. (2001). Quantitative light-induced fluorescence (QLF): A method for assessment of incipient caries lesions. *Dentomaxillofacial Radiology*, *30*(6), 298-307. doi:10.1038/sj/dmfr/4600644

Bittar, A., Alkan, E., Kanar, Ö., Korkut, B., & Tağtekin, D. (2026). Comparison of quantitative light-induced fluorescence and near-infrared intraoral scanner imaging for proximal caries across predefined ICCMS radiographic thresholds: A diagnostic accuracy study. *BMC Oral Health*, *26*, 1365. doi:10.1186/s12903-026-08559-1

de Josselin de Jong, E., Sundström, F., Westerling, H., Tranaeus, S., ten Bosch, J. J., & Angmar-Månsson, B. (1995). A new method for in vivo quantification of changes in initial enamel caries with laser fluorescence. *Caries Research*, *29*(1), 2-7. doi:10.1159/000262032

Feng, Y., Yin, W., Hu, D., Zhang, Y. P., Ellwood, R. P., & Pretty, I. A. (2007). Assessment of autofluorescence to detect the remineralization capabilities of sodium fluoride, monofluorophosphate and non-fluoride dentifrices: A single-blind cluster randomized trial. *Caries Research*, *41*(5), 358-364. doi:10.1159/000104793

Ferreira Zandoná, A., Santiago, E., Eckert, G., Fontana, M., Ando, M., & Zero, D. T. (2010). Use of ICDAS combined with quantitative light-induced fluorescence as a caries detection method. *Caries Research*, *44*(3), 317-322. doi:10.1159/000317294

Foros, P., Oikonomou, E., Koletsi, D., & Rahiotis, C. (2021). Detection methods for early caries diagnosis: A systematic review and meta-analysis. *Caries Research*, *55*(4), 247-259. doi:10.1159/000516084

Gmür, R., Giertsen, E., van der Veen, M. H., de Josselin de Jong, E., ten Cate, J. M., & Guggenheim, B. (2006). In vitro quantitative light-induced fluorescence to measure changes in enamel mineralization. *Clinical Oral Investigations*, *10*, 187-195. doi:10.1007/s00784-006-0058-z

Gomez, J., Pretty, I. A., Santarpia, R. P., Cantore, B., Rege, A., Petrou, I., & Ellwood, R. P. (2014). Quantitative light-induced fluorescence to measure enamel

remineralization in vitro. *Caries Research*, *48*(3), 223-227. doi:10.1159/000354655

Kühnisch, J., Aps, J. K. M., Splieth, C., Lussi, A., Jablonski-Momeni, A., Mendes, F. M., ... Huysmans, M.-C. D. N. J. M. (2024). ORCA-EFCD consensus report on clinical recommendation for caries diagnosis. Paper I: Caries lesion detection and depth assessment. *Clinical Oral Investigations*, *28*(4), 227. doi:10.1007/s00784-024-05597-3

Lee, E.-S., Hwang, J., Cheng, L., Jung, H. I., & Kim, B.-I. (2025). Diagnostic accuracy of quantitative light-induced fluorescence in detecting caries of various types and locations: A systematic review and meta-analysis. *Scientific Reports*, *15*, 39905. doi:10.1038/s41598-025-23631-6

Moriyama, C. M., Rodrigues, J. A., Lussi, A., & Diniz, M. B. (2014). Effectiveness of fluorescence-based methods to detect in situ demineralization and remineralization on smooth surfaces. *Caries Research*, *48*(6), 507-514. doi:10.1159/000363074

Oh, S. H., Choi, J. Y., & Kim, S. H. (2022). Evaluation of dental caries detection with quantitative light-induced fluorescence in comparison to different field of view devices. *Scientific Reports*, *12*, 6139. doi:10.1038/s41598-022-10126-x

Park, S. W., Kim, S. K., Lee, H. S., Lee, E. S., de Josselin de Jong, E., & Kim, B. I. (2019). Comparison of fluorescence parameters between three generations of QLF devices for detecting enamel caries in vitro and on smooth surfaces. *Photodiagnosis and Photodynamic Therapy*, *25*, 142-147. doi:10.1016/j.pdpdt.2018.11.019

Restrepo, M., Bussaneli, D. G., Jeremias, F., Cordeiro, R. C. L., Magalhães, A. C., Palomari Spolidorio, D. M., & Santos-Pinto, L. (2015). Control of white spot lesion adjacent to orthodontic bracket with use of fluoride varnish or chlorhexidine gel. *The Scientific World Journal*, *2015*, 218452. doi:10.1155/2015/218452

Tranaeus, S., Al-Khateeb, S., Björkman, S., Twetman, S., & Angmar-Månsson, B. (2001). Application of quantitative light-induced fluorescence to monitor incipient lesions in caries-active children: A comparative study of remineralisation by fluoride varnish and professional cleaning. *European Journal of Oral Sciences*, *109*(2), 71-75. doi:10.1034/j.1600-0722.2001.00997.x

Tranaeus, S., Shi, X. Q., Lindgren, L. E., Trollsås, K., & Angmar-Månsson, B. (2002). In vivo repeatability and reproducibility of the quantitative light-induced fluorescence method. *Caries Research*, *36*(1), 3-9. doi:10.1159/000057583

van der Veen, M. H., Thomas, R. Z., Huysmans, M. C. D. N. J. M., & de Soet, J. J. (2006). Red autofluorescence of dental plaque bacteria. *Caries Research*, *40*(6), 542-545. doi:10.1159/000095655

Zheng, W., Ding, L., Wang, Y., Han, S., Zheng, S., Guo, Q., ... Zhang, L. (2019). The effects of 8DSS peptide on remineralization in a rat model of enamel caries evaluated by two nondestructive techniques. *Journal of Applied Biomaterials & Functional Materials*, *17*(1), 2280800019827798. doi:10.1177/2280800019827798