

MODERN DİŞ HEKİMLİĞİNDE GÜNCEL TEKNOLOJİLER VE ÇÜRÜK YÖNETİMİ



Editör: DİLEK TAĞTEKİN

BİDGE Yayınları

Modern Diş Hekimliğinde Güncel Teknolojiler ve Çürük Yönetimi

Editör: DİLEK TAĞTEKİN

ISBN: 978-625-8995-83-1

1. Baskı

Sayfa Düzeni: Gözde YÜCEL

Yayınlama Tarihi: 2026-03-25

BİDGE Yayınları

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

Sertifika No: 71374

Yayın hakları © BİDGE Yayınları

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

Krc Bilişim Ticaret ve Organizasyon Ltd. Şti.

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



ÖNSÖZ

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

Saygılarımla.

Prof. Dr. DİLEK TAĞTEKİN
MARMARA ÜNİVERSİTESİ

İÇİNDEKİLER

Restoratif Diş Hekimliğinde Eklemeli Üretim Teknolojileri: Yazıcı Sistemleri, Dijital İş Akışı ve Klinik Uygulamalara Güncel Bir Bakış	1
<i>HANDE FİLİZ</i>	
Yaşlı Hastalarda Çürük Risk Faktörleri, Çürük Yönetimi ve Güncel Tedavi Seçenekleri	27
<i>MERVE ARSLAN, EMRE YAPICI</i>	
Restoratif Diş Tedavisinde Yapay Zeka Destekli Radyolojik Tanı Sistemleri	83
<i>FATİH CENGİZ, MUHAMMET CAN EREN, MERVE PELİN DUR SARIGÜZEL</i>	
Diş Çürüğüne Karşı İmmünolojik Yaklaşımlar ve Aşı Stratejileri	100
<i>MEHMET ALPEREN ŞAHİN</i>	
Resin Matrix Systems Used in Restorative Dentistry: Current Advances	112
<i>ÖZGE DUMAN ÖZBİLGİ</i>	
Diş Hekimliğinde Mikro ve Nanoplastikler: Klinik Kaynaklar, Olası Biyolojik Riskler ve Çevresel Sürdürülebilirlik	140
<i>ŞURA BOYRAZ</i>	

BÖLÜM 1

RESTORATİF DIŞ HEKİMLİĞİNDE EKLEMELİ ÜRETİM TEKNOLOJİLERİ: YAZICI SİSTEMLERİ, DİJİTAL İŞ AKIŞI VE KLİNİK UYGULAMALARA GÜNCEL BİR BAKIŞ

HANDE FİLİZ¹

Giriş

Bilgisayar destekli tasarım (CAD) ve bilgisayar destekli üretim (CAM) teknolojileri, diş hekimliğinde tanı, planlama ve restorasyon üretim süreçlerinde önemli değişimlere yol açmıştır (Van Noort, 2012). Uzun yıllardır yaygın olarak kullanılan CAD-CAM'e dayalı eksiltmeli üretim yöntemleri, boyutsal doğruluğu yüksek restorasyonların elde edilmesini sağlayarak üretim süresini ve iş gücünü azaltan güvenilir sistemler olarak kabul edilmektedir (Della Bona, Cantelli, Britto, Collares, & Stansbury, 2021). Bununla birlikte eksiltmeli üretim, iőlenmemiő materyalde kayba neden olması, frezleme aletlerinde aşınma oluőturması ve yüzey ile yüzey

¹ Uzm. Dt, Mersin Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi, Restoratif Diş Tedavisi Anabilim Dalı, Mersin, Türkiye. ORCID: 0000-0002-8100-6871

altı işleme kusurlarına yol açabilmesi nedeniyle bazı sınırlamalara sahiptir (Corazza, De Castro, Feitosa, Kimpara, & Della Bona, 2015). Bilgisayar destekli tasarım teknolojilerindeki gelişmelere paralel olarak, eklemeli üretim (üç boyutlu [3B] baskı), diş hekimliğinde özellikle karmaşık geometrilerin üretilmesi, materyal kullanımındaki verimlilik ve dijital iş akışına kolay entegrasyonu nedeniyle giderek daha fazla önem kazanmaktadır (Stansbury & Idacavage, 2016; Van Noort, 2012). Başlangıçta dental modeller ve geçici restorasyonlar gibi sınırlı endikasyonlarda kullanılan bu teknolojiler, günümüzde yazıcı sistemleri, materyal bilimi ve dijital üretim protokollerindeki gelişmeler sayesinde restoratif diş hekimliğinde daha geniş bir uygulama alanına ulaşmıştır (Della Bona et al., 2021). Bu bölümde restoratif diş hekimliğinde eklemeli üretim teknolojilerinin gelişimi; yazıcı sistemleri, dijital iş akışı, kullanılan materyaller, klinik uygulamalar, avantajlar, sınırlamalar ve gelecek perspektifleri açısından güncel literatür ışığında ele alınacaktır.

Restoratif Diş Hekimliğinde Eklemeli Üretim Teknolojilerinin Gelişimi

Eklemeli üretim teknolojisi, bilgisayar dosyasına dayalı katı model üretimi amacıyla ilk olarak mühendislik alanında tanıtılmıştır. Eklemeli üretim, bilgisayar destekli tasarım (CAD), dijitalleştirme veya konik ışınli bilgisayarlı tomografi (CBCT) sistemlerinden elde edilen 3B sanal modele dayanarak model ve prototiplerin

üretilmesine olanak sağlamaktadır (Rengier et al., 2010; Revilla-León, Sadeghpour, & Özcan, 2020; Revilla-León & Özcan, 2019). Sanal modelin üretim süreci daha sonra bilgisayar destekli üretim (CAM) işlemleri aracılığıyla tamamlanmaktadır. CAM teknolojileri, bir bilgisayara bağlı makine sistemlerini kullanarak istenilen prototipi “eklemeli” veya “eksiltmeli” üretim yöntemleriyle üretmektedir (Nayar, Bhuminathan, & Bhat, 2015; Spitznagel, Boldt, & Gierthmuehlen, 2018). Eksiltmeli teknolojide sanal model, kesici aletler kullanılarak üretilir. Bu yöntemde materyal, önceden hazırlanmış bir bloktan kesilerek veya çıkarılarak istenilen nesne oluşturulur (Spitznagel et al., 2018). Her ne kadar bu teknoloji yüksek doğrulukta nesnelerin üretilmesine olanak sağlasa da, prefabrike bloğun yaklaşık %90’ı uzaklaştırılmakta ve ortaya çıkan atık materyal yeniden kullanılamamaktadır (Strub, Rekow, & Witkowski, 2006). Buna karşılık, eklemeli üretim teknolojileri eksiltmeli üretim teknolojisinin tersine çalışmaktadır; sanal model, sıvı, toz ve/veya katı tabaka bileşenlerinden oluşan materyalin katman katman eklenmesiyle kademeli olarak oluşturulur (Alammar, Kois, Revilla-León, & Att, 2022). Eklemeli üretim, geleneksel işleme gibi eksiltmeli üretim yöntemlerinin aksine, 3B model verilerinden nesnelere üretmek amacıyla materyallerin katman katman birleştirilmesi süreci olarak tanımlanan nispeten yeni bir teknolojidir (Stansbury & Idacavage, 2016; Alammar et al., 2022). Her bir eklemeli üretim süreci kendine özgü avantajlara, zorluklara, baskı yöntemlerine ve kullanılan materyallere sahip olsa da, temelde

tüm süreçler parçaların katman katman üretilmesi prensibine dayanmaktadır (Piedra-Cascón, Krishnamurthy, Att, & Revilla-León, 2021). Uluslararası Standardizasyon Örgütü'ne (International Organization for Standardization – ISO) göre eklemeli üretim teknolojileri yedi ana kategoriye ayrılmaktadır: vat polimerizasyonu, materyal ekstrüzyonu, materyal püskürtme, bağlayıcı püskürtme, toz yatak füzyonu, tabaka laminasyonu ve yönlendirilmiş enerji biriktirme (Alammar et al., 2022). Vat polimerizasyon teknolojileri, 3B yazıcılarda kullanılan ışık kaynağına bağlı olarak farklı alt kategorilere ayrılabilir. Bu teknolojiler arasında lazer tabanlı stereolitografi (stereolithography, SLA), dijital ışık işleme (digital light processing, DLP) ve sıvı kristal ekran tabanlı yazıcı sistemleri (liquid crystal display, LCD) yer almaktadır. Sıvı kristal ekran tabanlı yazıcılar aynı zamanda gün ışığı polimerizasyon baskısı (daylight polymer printing, DPP) olarak da adlandırılmaktadır. Ayrıca sürekli sıvı arayüz üretimi (continuous liquid interface production, CLIP) yöntemi, dijital ışık işleme teknolojisinin bir varyasyonu olup vat polimerizasyon teknolojileri içerisinde değerlendirilmektedir. Toz yatak füzyonu (powder bed fusion) teknolojileri ise seçici lazer sinterleme (selective laser sintering, SLS), seçici lazer eritme (selective laser melting, SLM) ve elektron ışını eritme (electron beam melting, EBM) yöntemlerini içermektedir (Alammar et al., 2022).

Diş Hekimliğinde Kullanılan Eklemeli Üretim Teknolojileri

Vat Polimerizasyonu

Stereolitografi (Stereolithography, SLA)

SLA yöntemi, sıvı reçine içeren bir haznede ardışık katmanların lazer ile polimerizasyonu prensibine dayanarak nesnelerin oluşturulmasını sağlar. Bu yöntemde ultraviyole (UV) lazer, sıvı fotopolimer içeren haznenin yüzeyine odaklanarak CAD modelinin kesitlerine karşılık gelen bölgeleri seçici olarak polimerize eder (Alammar et al., 2022). SLA teknolojisi, yüksek doğruluk, pürüzsüz yüzey kalitesi ve katmanlar arasında güçlü kimyasal bağlanma sağlaması nedeniyle piyasaya sunulan ilk ticari eklemeli üretim sistemlerinden biri olmuştur (Alharbi, Osman, & Wismeijer, 2016; Kim et al., 2016). Ayrıca üretim hızı, üretilen parçaların boyutu ve sayısına bağlıdır. Aynı üretim platformu üzerinde birden fazla küçük parça eş zamanlı olarak üretilmektedir. Bir katmanın oluşturulması genellikle bir veya iki dakika sürerken, toplam üretim süresi 6–12 saat arasında değişmektedir. Daha büyük nesnelerin üretimi ise birkaç gün sürebilmektedir (Van Noort, 2012). SLA sistemi temel olarak sıvı reçine haznesi, model oluşturma platformu ve UV lazer bileşenlerinden oluşmaktadır. Bu sistem genellikle üstten aşağı (top-down) yaklaşımına dayanmaktadır. İlk katman CAD modeline uygun şekilde polimerize edildikten sonra reçine dolu bir bıçak,

nesnenin kesit yüzeyini yeni bir reçine tabakası ile kaplar. Daha sonra üretim platformu z ekseninde aşağı doğru hareket eder ve sonraki katman polimerize edilir. Bu işlem nesne tamamen oluşuncaya kadar tekrarlanır (Alammar et al., 2022). Bazı sistemlerde ise aşağıdan yukarı (bottom-up) yaklaşımı kullanılmaktadır. Bu yöntemde üretim platformu reçine haznesine yukarıdan daldırılır ve üretim sırasında z eksenini boyunca yukarı doğru hareket eder. Bu yaklaşım daha az reçine gerektirir ve üretilen nesnelere daha az porozite, daha yüksek üretim doğruluğu ve katman kalınlığının daha iyi kontrol edilmesini sağlar (Emami, Barazandeh, & Yaghmaie, 2014). Üretim tamamlandıktan sonra fazla reçine boşaltılır ve yeniden kullanılabilir. Nesne daha sonra alkol banyosunda temizlenir ve reaksiyona girmemiş reçine gruplarının polimerizasyonunu tamamlamak ve yapının dayanıklılığını artırmak amacıyla ultraviyole fırında post-kür işlemi uygulanır (Stansbury & Idacavage, 2016). SLA teknolojisinde üretim sırasında parçaları sabitlemek ve çıkıntılı bölgeleri desteklemek amacıyla destek yapıları oluşturulması gerekmektedir. Bu destekler genellikle düz ve rijit duvar yapılarından oluşur. Ancak bu tür destekler fazla materyal ve zaman tükettiğinden, günümüzde çıkarılması daha kolay olan delikli destek yapıları tercih edilmektedir (Alammar et al., 2022).

Dijital Işık İşleme (Digital Light Processing, DLP)

DLP, sıvı fotopolimerler kullanarak karmaşık geometrilere sahip küçük ve hassas nesnelerin üretimi için uygun bir vat polimerizasyon teknolojisidir. Bu yöntem, ışığın polimerizasyon ajanı olarak kullanılması nedeniyle SLA ile aynı teknoloji grubunda yer almaktadır (Hazeveld, Slater, & Ren, 2014). Bu sistemde fotopolimer, yüksek güçlü LED kaynağına sahip bir projektörün üzerinde yer alan şeffaf bir hazne içerisinde bulunur. Projektör, mikro-elektromekanik sistem (MEMS) teknolojisine dayalı bir dijital mikro-ayna cihazı (DMD) kullanmaktadır (Alammar et al., 2022). Baskı işlemi sırasında üretim platformu reçine haznesine bir katman kalınlığı kadar daldırılır. UV ışığı, DMD tarafından reçine yüzeyine yansıtılarak CAD tasarımına uygun bir katman oluşturur. DMD sistemi, UV ışığının yönünü kontrol eden çok sayıda mikro aynadan oluşmaktadır. Bir katman oluşturulduktan sonra üretim platformu z ekseninde yukarı doğru hareket eder ve işlem nesne tamamlanıncaya kadar tekrarlanır (Alammar et al., 2022.; Monzón et al., 2017). DLP teknolojisi yüksek doğruluk, düşük maliyet ve pürüzsüz yüzey kalitesi gibi avantajlar sunmakta ve SLA yöntemine kıyasla daha hızlı üretim sağlayabilmektedir. Bununla birlikte bu yöntemle üretilen parçalar polimerizasyon büzülmesinden etkilenebilmekte ve üretim sonrasında manuel üretim sonrası işlemleri gerektirebilmektedir (Alammar et al., 2022).

Sürekli Sıvı Arayüz Üretimi (Continuous Liquid Interface Production, CLIP)

CLIP, UV ışık ve oksijen kullanarak 3B nesnelerin sürekli olarak üretildiği yeni bir vat polimerizasyon teknolojisidir. SLA ve DLP süreçlerine benzer şekilde fotopolimer reçineler kullanır. Sistem; sıvı reçine haznesi, bottom-up üretim platformu, UV ışık kaynağı, oksijen geçirgen pencere ve projektörden oluşmaktadır (Alammar et al., 2022). CLIP teknolojisi geleneksel SLA ve DLP süreçlerinden farklı olarak kesintisiz üretim prensibi ile çalışır. Bu sayede daha hızlı üretim, daha pürüzsüz yüzeyler ve katman izlerinin oluşmaması gibi avantajlar sağlar. Ayrıca elastomerler, seramikler ve biyolojik materyaller gibi farklı materyallerin üretimine olanak tanır (Emami et al., 2014; Januszewicz, Tumbleston, Quintanilla, Mecham, & DeSimone, 2016).

Malzeme Püskürtme (Material Jetting)

Malzeme püskürtme veya Multi-Jet Modeling (MJM), mürekkep püskürtme teknolojisini kullanarak nesnelerin üretildiği bir eklemeli üretim yöntemidir (Alammar et al., 2022). Bu yöntemde 20 µm'den daha ince katman kalınlıkları elde edilebilmektedir. Baskı sırasında yapının çökmesini önlemek için jel veya mum bazlı destek materyalleri kullanılmaktadır. Bu destekler üretim sonrasında ısı veya su ile kolayca uzaklaştırılabilir (Ibrahim et al., 2009). MJM teknolojisi farklı renklerde iki materyalin birlikte kullanılmasına

olanak sağlar, nispeten düşük maliyetlidir ve yüksek doğrulukta nesnelere üretir. Ancak bu yöntemle üretilen parçaların mekanik dayanımı daha düşüktür (Alammar et al., 2022).

Malzeme Ekstüzyonu (Material Extrusion – Fused Deposition Modeling (FDM))

FDM, yarı erimiş termoplastik materyalin bir nozuldaki ekstrüzyonu ile nesnelere üretildiği bir eklemeli üretim yöntemidir (Alammar et al., 2022). Plastik veya metal tel şeklindeki filamentler makaradan çözülür ve ısıtılmış nozula iletilir. Nozul x-y ekseninde hareket ederken katmanlar oluşturulur ve z ekseninde yükselerek yeni katmanlar eklenir. Bu süreçte kullanılan materyaller genellikle düşük maliyetlidir ve çevre açısından güvenlidir. Ayrıca farklı renklerde nesnelere üretilebilir ve kimyasal üretim sonrası işlem gerektirmez. Bununla birlikte filament kalınlığı nedeniyle yüzey kalitesi düşüktür ve üretilen parçaların yüzeylerinin sonradan işlenmesi gerekir. Ayrıca büyük ve karmaşık nesnelere üretimi birkaç gün sürebilmektedir (Stansbury & Idacavage, 2016; Wong & Hernandez, 2012).

Toz Yatak Füzyonu (Powder Bed Fusion)

Seçici Lazer Sinterleme (Selective Laser Sintering, SLS): SLS, toz yatak füzyonu teknolojisi olup, toz halindeki materyallerin karbondioksit (CO₂) lazeri ile sinterlenmesi prensibine dayanır.

Lazer, CAD modelinden elde edilen kesitleri takip ederek toz partiküllerini seçici olarak birleştirir. Toz, üretim haznesi üzerinde bir merdane aracılığıyla dağıtılır ve her katman tamamlandığında platform bir katman kalınlığı kadar aşağı iner. Bu süreç nesne tamamlanıncaya kadar tekrarlanır. Sinterlenen toz erimez ve gevşek toz parçacıkları yapıyı desteklediği için ek destek yapıları gerekmez. Kullanılmayan toz tekrar kullanılabilir. Üretim sonrasında ise kumlama veya basınçlı hava ile temizleme gibi işlemler uygulanır (Alammar et al., 2022).

Bağlayıcı Püskürtme (Binder Jetting)

Bağlayıcı püskürtme süreci, SLS'e benzer şekilde toz materyal kullanır; ancak bu yöntemde lazer yerine inkjet yazıcı başlığı toz partikülleri üzerine sıvı bağlayıcı püskürtür. Bu bağlayıcı partikülleri birleştirerek nesneyi oluşturur. Makinede biri toz besleme, diğeri üretim platformu için olmak üzere iki piston bulunur. Her katman oluşturulduktan sonra platform aşağı iner ve yeni bir toz tabakası uygulanır. Süreç nesne tamamlanıncaya kadar devam eder. Destek yapıları gerekmez çünkü gevşek toz partikülleri nesneyi destekler. Üretim sonrasında sinterleme veya infiltrasyon gibi işlemler uygulanır (Alammar et al., 2022).

Tabaka Laminasyonu

Tabaka laminasyonu, katı tabaka materyaller kullanarak nesnelerin üretildiği bir yöntemdir. Bu süreç hem eklemeli hem de eksiltmeli üretim tekniklerini birleştirir. Tabakalar ısı ve basınç uygulanarak birleştirilir ve lazer kullanılarak CAD modeline uygun şekilde kesilir. Kullanılmayan materyal kolayca uzaklaştırılabilir ve destek yapısı olarak da işlev görebilir. Bu yöntemde genellikle kağıt tabakalar kullanılır ve üretilen nesneler ahşaba benzer özellikler gösterir. Bu yöntem düşük maliyetli ve büyük nesnelerin üretimine uygun olsa da yüzey kalitesi düşüktür ve karmaşık iç geometrilerin üretimi sınırlıdır (Kruth, Leu, & Nakagawa, 1998; Yan & Gu, 1996).

Eklemeli Üretimde Dijital İş Akışı

Dijital diş hekimliğinin gelişmesiyle birlikte restoratif tedaviler dijital iş akışları ile gerçekleştirilmeye başlanmıştır. Dijital iş akışı, klinik verilerin dijital olarak elde edilmesi, restorasyonların bilgisayar destekli tasarımı ve bilgisayar destekli üretimi aşamalarından oluşmaktadır (Mangano, Gandolfi, Luongo, & Logozzo, 2017; Revilla-León & Özcan, 2019). Bu sistemler sayesinde restoratif tedaviler daha hızlı, tekrarlanabilir ve öngörülebilir hale gelmiştir. Ayrıca dijital iş akışı, klinik ve laboratuvar süreçlerinin daha etkin bir şekilde entegre edilmesine olanak sağlamaktadır (Mangano et al., 2017). Diş hekimliğinde eklemeli üretim teknolojilerinin uygulanması, dijital iş akışlarının

hassas üretim teknikleri ile entegre edildiği belirli aşamalardan oluşmaktadır (Yüceer et al., 2025).

Dijital Veri Elde Edilmesi: Süreç, genellikle intraoral tarayıcılar, tomografi görüntüleri veya ekstraoral tarayıcılar aracılığıyla elde edilen dijital modelin oluşturulması ile başlar (Yüceer et al., 2025). Bu amaçla en yaygın kullanılan yöntem intraoral tarayıcılar olup, diş ve çevre dokuların üç boyutlu görüntülerinin elde edilmesini sağlar. İntraoral tarayıcılar, geleneksel ölçü tekniklerine kıyasla hasta konforu açısından avantaj sağlayabilmekte ve ölçü doğruluğunu artırabilmektedir (Ender & Mehl, 2013). Elde edilen veriler genellikle STL (Standard Tessellation Language) formatında kaydedilerek CAD yazılımlarına aktarılmaktadır (Van Noort, 2012).

CAD Tasarım Süreci: Dijital veri elde edildikten sonra restorasyonların tasarım aşamasına geçilmektedir. Bilgisayar destekli tasarım (CAD) yazılımları kullanılarak restorasyonların anatomik formu ve oklüzal ilişkileri dijital ortamda oluşturulmakta ve marjinal uyumun değerlendirilmesine olanak sağlanmaktadır (Revilla-León & Özcan, 2019).

Üretim Süreci: Tasarlanan restorasyonlar daha sonra bilgisayar destekli üretim (CAM) sistemlerine aktarılmaktadır. Bu aşamada restorasyonlar, eksiltmeli üretim ve eklemeli üretim teknikleri kullanılarak üretilmektedir (Moon et al., 2022).

Üretim Sonrası İşlemler: Üretim tamamlandıktan sonra restorasyonlar çeşitli işlemlere tabi tutulmaktadır. Üretim sonrasında uygulanan temizleme, post-polimerizasyon ve yüzey bitirme işlemleri, restorasyonların mekanik, yüzey ve biyolojik özelliklerini doğrudan etkileyebilmektedir. Özellikle post-polimerizasyon işleminin dönüşüm derecesini artırarak mekanik dayanımı iyileştirdiği ve artık monomer miktarını azaltarak biyoyumluluğu artırdığı bildirilmektedir (Della Bona et al., 2021; Tahayeri et al., 2018; Keşler et al., 2025). Ayrıca kullanılan temizleme protokolü, polimerizasyon koşulları ve yüzey işlemleri nihai restorasyonun performansı üzerinde belirleyici rol oynamaktadır (Keşler et al., 2025).

Restoratif Diş Hekimliğinde Kullanılan Eklemeli Üretim Materyalleri

Eklemeli üretim teknolojilerinin diş hekimliğinde yaygınlaşmasıyla birlikte restoratif uygulamalara yönelik farklı materyaller geliştirilmiştir. Günümüzde restoratif amaçlı kullanılan eklemeli üretim materyalleri çoğunlukla fotopolimer rezin bazlı olup, metakrilat bazlı monomerler, oligomerler ve çeşitli doldurucu partiküllerinden oluşmaktadır. Bu materyaller kullanım amacına göre geçici ve daimi restoratif materyaller olarak sınıflandırılmakta olup, daimi materyaller uzun süreli kullanım gereksinimleri nedeniyle daha yüksek mekanik ve fiziksel özellikler gerektirmektedir. Restoratif diş tedavisinde kullanılan eklemeli

Üretim ile hazırlanan fotopolimer rezinler Tablo 1’de sunulmuştur (Yüceer et al, 2025). Bu iki materyal grubu arasında özellikle doldurucu partikül içeriği açısından belirgin farklılıklar bulunmakta olup, artan dolgu oranı mekanik özellikleri iyileştirirken rezin viskozitesini ve baskılanabilirliği olumsuz etkileyebilmektedir (Keler et al., 2025). Bu materyaller stereolitografi (SLA) ve dijital ışık işleme (DLP) gibi vat polimerizasyon teknolojileri ile işlenmektedir (Revilla-León & zcan, 2019; Stansbury & Idacavage, 2016). Baskı parametreleri, katman kalınlığı, baskı yönü ve post-polimerizasyon işlemleri bu materyallerin mekanik ve yüzey özelliklerini önemli ölçüde etkileyebilmektedir (Della Bona et al., 2021; Stansbury & Idacavage, 2016). Eklemeli retim teknolojileri, restoratif diş hekimliğinde özellikle geçici kron ve köprü restorasyonlarının üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır (Alyami et al., 2020). Bu amaçla geliştirilen fotopolimer bazlı reçineler yüksek boyutsal doğruluk, hızlı üretim süresi ve kabul edilebilir estetik özellikler sunmaktadır. Bu materyallerin mekanik özellikleri çeşitli çalışmalarla değerlendirilmiş ve geçici restorasyonların rimi için uygun oldukları bildirilmiştir (Alharbi et al., 2016; Atria et al., 2022; Tahayeri et al., 2018). Bununla birlikte, rezin bazlı kompozit yapıdaki eklemeli üretim materyalleri organik rezin matrisi ile inorganik dolgu partiküllerinin birleşiminden oluşmakta olup, geleneksel kompozit restoratif materyallere benzer özellikler göstermektedir. Doldurucu partikülleri materyalin elastik modülünü artırmakta ve aşınma

direncini geliştirmektedir. Ayrıca, eklemeli üretim ile üretilen rezin materyallerin mekanik özelliklerinin üretim yöntemi ve baskı parametrelerinden etkilendiği, fleksural dayanım ve mikrosertlik gibi özelliklerin geleneksel ve frezelenmiş materyallerle karşılaştırıldığında farklılık gösterebildiği bildirilmektedir. Baskı yönü ve katman organizasyonu gibi faktörler de materyalin mekanik performansı üzerinde belirleyici rol oynamaktadır (Sulaiman, 2020).

Tablo 1: Restoratif diş hekimliğinde kullanılan eklemeli üretim ile hazırlanan fotopolimer rezinler

Materyal	Teknoloji	Kullanım Alanı	Üretici
Formlabs Permanent Crown Resin®	SLA	Daimi kron	Formlabs Inc., ABD
VarseoSmile®mCrown ^{Plus}	SLA, DLP	Daimi kron	Bego, Almanya
CROWNTEC	DLP	Daimi kron	Saremco Dental AG, İsviçre
NextDent C&B MFH	SLA	Geçici kron-köprü	Vertex-Dental, Hollanda
Detax Freeprint Temp	DLP	Geçici kron-köprü	Detax GmbH, Almanya
GC TempPrint	DLP	Geçici kron-köprü	GC Corporation, Japonya
Formlabs Temporary CB	SLA	Geçici kron-köprü	Formlabs Inc., ABD
Graphy Tera Harz TC-80DP	DLP	Geçici kron-köprü	Graphy Inc., Güney Kore
Straumann P Pro Crown & Bridge	DLP	Geçici kron-köprü	Straumann, İsviçre
Voco Prov. Crown & Bridge	DLP	Geçici kron-köprü	Voco, Almanya

Materyal	Teknoloji	Kullanım Alanı	Üretici
3Delta Temp	DLP	Geçici restoratif rezin	Deltamed, Almanya
Zenith ZMD-1000B®	DLP	Geçici restoratif rezin	Dentis Co., Güney Kore
Veltz DT-1 Temporary Teeth®	DLP	Geçici restoratif rezin	Hephzibah, Güney Kore

Restoratif Tedavilerde Eklemeli Üretimin Klinik Kullanımları

Eklemeli üretim teknolojileri restoratif diş hekimliğinde giderek daha geniş bir kullanım alanı bulmaktadır. Bu teknolojiler özellikle geçici kron ve köprü restorasyonlarının üretiminde yaygın olarak kullanılmakta olup, dijital ölçü sistemleri ile elde edilen veriler CAD yazılımları aracılığıyla tasarlanmakta ve SLA veya DLP gibi vat polimerizasyon teknikleri ile üretilmektedir (Alharbi et al., 2016; Atria et al., 2022; Tahayeri et al., 2018). Eklemeli üretim rezinleri; geçici ve daimi kronlar, inleyler, onleyler, veneerler ile sabit ve hareketli protezlerin yüksek doğruluk ve estetikle üretilmesine olanak tanımaktadır (Yüceer et al., 2025). Bunun yanı sıra minimal invaziv restoratif tedavilerde kompozit restorasyon rehberleri ve preparasyon rehberlerinin üretiminde de kullanılmakta ve daha kontrollü, öngörülebilir klinik sonuçlar elde edilmesine katkı sağlamaktadır (Alghauli & Alqutaibi, 2024). Eklemeli üretim teknolojilerinin yalnızca geçici restorasyonlarla sınırlı kalmayıp, indirekt restorasyonların üretiminde de kullanılabildiği bildirilmektedir (Duarte Jr, S., & Phark, J. H., 2025). Bu teknolojiler, dijital iş akışı ile entegre olarak üretim sürecinin

standardizasyonunu sağlamakta ve tekrarlanabilirliği artırmaktadır (Revilla-León & Özcan, 2019). Bununla birlikte, bu yöntemle üretilen daimi restoratif materyallerin mekanik dayanım ve uzun dönem klinik performans açısından hâlen gelişim sürecinde olduğu bildirilmektedir (Sulaiman, 2020). Ayrıca eklemeli üretim teknolojileri dental modellerin ve diagnostik wax-up çalışmalarının üretiminde yaygın olarak kullanılmakta olup tedavi planlamasının görselleştirilmesine ve restoratif tedavilerin simülasyonuna olanak sağlamaktadır (Mangano et al., 2017; Revilla-León & Özcan, 2019). Eklemeli üretim teknolojisi, anterior diş restorasyonlarında non-invaziv ve etkili çözümler sunarak önemli avantajlar sağlamaktadır. Özellikle hasta spesifik olarak tasarlanan eklemeli üretim rehberleri, dijital tasarımların ağız ortamına hassas şekilde aktarılmasına olanak tanıyarak direkt kompozit restorasyonları kolaylaştırmakta, klinik süresini azaltmakta ve estetik sonuçların öngörülebilirliğini artırmaktadır. Bu kapsamda, eklemeli üretim kompozit enjeksiyon rehberleri, konvansiyonel silikon mock-up yöntemlerine hassas ve pratik bir alternatif olarak öne çıkmaktadır (Yüceer et al., 2025).

Eklemeli Üretimin Avantajları ve Sınırlamaları

Eklemeli üretim teknolojisi önemli avantajlar sunmaktadır: iç yapısı karmaşık geometrilere sahip nesnelerin üretimine olanak tanımakta ve montaj gerektirmeden fonksiyonel parçalar üretilebilmesini sağlayarak üretim süresini, maliyeti ve materyal kaybını azaltmaktadır (Campbell, Williams, Ivanova, & Garrett,

2011; (Alammar et al., 2022). Günümüzde rezinlerin farklı metal ve seramik türlerine kadar geniş bir materyal yelpazesini kapsayan çeşitli eklemeli üretim süreçleri mevcuttur. Kullanılacak materyalin seçimi, uygulanan eklemeli üretim sürecinin türüne bağlıdır. Bununla birlikte, bu teknolojinin diğer üretim süreçleriyle rekabet edip edemeyeceğini değerlendirmek zor olabilir; çünkü bir teknolojinin yaygın olarak kabul görmesi için üretilen parçaların doğruluğu ve kalitesi kritik bir öneme sahiptir. Eklemeli üretim süreçlerinin karşı karşıya olduğu çeşitli zorluklar hâlen çözüm beklemektedir. Bu teknolojinin başlıca avantajları ve sınırlamaları Tablo 2’de sunulmuştur (Alammar et al., 2022).

Tablo 2. Eklemeli üretim teknolojilerinin avantajları ve sınırlamaları

Avantajlar	Sınırlamalar
Ürünlerin doğrudan 3B CAD yazılımı ve manyetik rezonans görüntüleme gibi dijital dosyalardan üretilbilmesi	Mevcut materyallerin klinik doğrulamasının sınırlı olması
Ek kalıp veya üretim araçlarına ihtiyaç duyulmaması	Mevcut materyallerin mekanik ve termal özelliklerinin geliştirilmesi gerekliliği
Dijital tasarım dosyalarının kolaylıkla paylaşılabilmesi	Çok materyalli ve çok renkli baskı sistemlerinin geliştirilme ihtiyacı

Tablo 2. Eklemeli üretim teknolojilerinin avantajları ve sınırlamaları

Avantajlar	Sınırlamalar
Karmaşık geometrik yapıların üretilebilmesi	Seramik yapıların eklemeli üretimin sınırlı olması
Atık materyallerin geri dönüştürülebilmesi	Üretim doğruluğunun bazı durumlarda sınırlı olması
Hasta-klinisyen ve laboratuvar arasındaki iletişimin gelişmesi	Üretim sonuçlarının tekrarlanabilirliğinin her zaman garanti edilememesi
Tasarım ve modifikasyon süreçlerinin hızlı ve kolay olması	Üretim sonra işlemlerin çoğu zaman gerekli olması
Kişiyeye özel ürünlerin üretilebilmesi	Destek yapılarında kullanılan materyallerin geri dönüştürülememesi
Dijital iş akışı ile entegrasyonun kolay olması	Uygun baskı yöneliminin (build orientation) belirlenmesinin gerekli olması
Hızlı prototipleme ve üretim imkânı	Materyal maliyetlerinin yüksek olabilmesi

Gelecek Perspektifleri

Eklemeli üretim teknolojilerine olan ilgi artmaya devam ettikçe, bu teknolojiler de hızlı bir gelişim süreci göstermektedir. Güncel çalışmalar, üretim hızının artırılması ve doğruluğun geliştirilmesine odaklanmaktadır. Bu gelişmeler yalnızca donanım alanıyla sınırlı kalmayıp, yazılım teknolojilerinde de önemli ilerlemeleri kapsamaktadır. Özellikle hesaplama algoritmalarının optimize edilmesi sayesinde daha hızlı ve daha doğru üretim sonuçlarının elde edilmesi hedeflenmektedir. Ayrıca tasarım, yerleştirme (nesting) ve üretim süreçlerinin yapay zekâ destekli otomasyonu, gelecekteki gelişmelerin önemli bir bölümünü oluşturacaktır (Obregon, Vaquette, Ivanovski, Hutmacher, & Bertassoni, 2015). Teknolojik ilerlemeler yalnızca üretim sistemleriyle sınırlı olmayıp kullanılan materyallerin geliştirilmesini de kapsamaktadır. Günümüzde eklemeli üretim materyallerinin büyük çoğunluğu farklı uygulamalar için geliştirilen reçinelerden oluşmaktadır. Ancak gelecekte geliştirilecek materyallerin, ek bir işlem gerektirmeden doğrudan nihai restorasyonların üretimine olanak sağlayacak şekilde tasarlanması beklenmektedir. Bu gelişmelere örnek olarak seramik veya seramik benzeri materyallerin doğrudan nihai restorasyon olarak basılabilmesi gösterilebilir. Her ne kadar bu materyallerin laboratuvar ve klinik çalışmalarla doğrulanması henüz devam ediyor olsa da, bu amaçla geliştirilen bazı materyaller halihazırda tanıtılmıştır. Bunun yanı sıra

çok renkli veya çok tonlu nesnelerin üretimi (örneğin geçici restorasyonlar, tam protezler veya nihai restorasyonlar) de gelecekteki önemli gelişim alanları arasında yer almaktadır. Eklemeli üretim teknolojilerinin bir diğer önemli uygulama alanı ise doku mühendisliği ve maksillofasiyal protez alanıdır (Nesic, Schaefer, Sun, Saulacic, & Sailer, 2020; Obregon et al., 2015; Zeng, Ning, & Huang, 2021). Biyolojik materyallerden üretilen ve kemik grefti amacıyla kullanılan kemik benzeri yapıların oluşturulması için eklemeli üretim ile iskele yapıların (scaffold) tasarlanması ve üretilmesi daha önce tanımlanmıştır (Zeng et al., 2021). Ayrıca doku rejenerasyonu veya onarımı amacıyla rejeneratif hücreler ve biyolojik materyallerle yüklü iskele yapıların basılması, özellikle yumuşak doku uygulamaları açısından yeni bir kavram değildir. Gelecekteki teknolojik gelişmeler, üretim süreçlerini daha da basitleştirerek özellikle günümüzde kullanılan düz veya tabaka benzeri yapıların yerine gerçek 3B iskele yapıların üretilmesine olanak sağlayacaktır. Bu gelişmeler hem sert hem de yumuşak dokular için eklemeli üretim uygulamalarının kapsamını genişletecektir. Yeni donanım, yazılım ve materyaller arasındaki sinerji özellikle maksillofasiyal protez alanında önemli avantajlar sağlayacaktır. Örneğin çok tonlu eklemeli üretim teknolojilerinin geliştirilmesi, günümüzde yoğun manuel kişiselleştirme gerektiren göz veya burun protezleri gibi yapıların üretimini kolaylaştıracaktır. Bu gelişmeler yalnızca tedavi kalitesini artırmakla kalmayacak, aynı

zamanda daha fazla hastanın bu tür tedavilere erişebilmesini de mümkün kılacaktır (Alammar et al., 2022).

Sonuç

Eklemeli üretim teknolojileri, dijital diş hekimliğinin gelişimiyle birlikte restoratif diş hekimliğinde giderek daha önemli bir yer edinmektedir. Dijital iş akışının bir parçası olarak kullanılan bu teknolojiler, restoratif tedavilerin planlanması ve üretim süreçlerinde yüksek doğruluk, zaman tasarrufu ve kişiye özel restorasyonların üretimi gibi önemli avantajlar sunmaktadır. Son yıllarda geliştirilen kompozit bazlı ve seramik içerikli eklemeli üretim materyalleri, yalnızca geçici restorasyonlar için değil aynı zamanda bazı definitif restoratif uygulamalar için de umut verici sonuçlar ortaya koymaktadır. Bununla birlikte baskı yönü, katman kalınlığı, polimerizasyon derecesi ve üretim sonrası işlemleri gibi üretim parametreleri, restorasyonların mekanik özellikleri, yüzey pürüzlülüğü ve optik özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Günümüzde eklemeli üretim teknolojileri restoratif diş hekimliğinde hızla gelişmeye devam etmekte olup, yeni materyallerin geliştirilmesi ve yazıcı teknolojilerindeki ilerlemeler bu alandaki uygulama alanlarını genişletmektedir. Bununla birlikte, eklemeli üretim ile üretilen restorasyonların uzun dönem klinik performanslarının değerlendirilmesi için daha fazla *in-vitro* ve klinik çalışmaya ihtiyaç duyulmaktadır. Gelecekte yapay zekâ destekli tasarım sistemleri, çok materyalli baskı teknolojileri ve gelişmiş

biyomateryallerin entegrasyonu ile eklemeli üretim teknolojilerinin restoratif diş hekimliğinde daha geniş kullanım alanı bulması beklenmektedir.

Kaynakça

- Alammar, A., Kois, J. C., Revilla-León, M., & Att, W. (2022). Additive manufacturing technologies: Current status and future perspectives in prosthodontics. *Journal of Prosthodontic Research*, 66(1), 1–14.
- Alghauli, M., & Alqutaibi, A. Y. (2024). Applications of 3D printing in restorative dentistry: A review. *International Journal of Dentistry*, 2024, 1–10.
- Alharbi, N., Osman, R. B., & Wismeijer, D. (2016). Effects of build direction on the mechanical properties of 3D-printed complete coverage interim dental restorations. *Journal of Prosthetic Dentistry*, 115(6), 760–767.
- Alyami, M. (2020). The Applications of 3D-Printing Technology in Prosthodontics: A Review of the Current Literature. *Journal of Prosthodontics*.
- Atria, P. J., Bordin, D., Marti, F., Pacheco, R. R., Lima, D. A. N. L., & Pascotto, R. C. (2022). Mechanical and biological properties of 3D-printed provisional restorative materials: A systematic review. *Dental Materials*, 38(5), 861–876.
- Campbell, T., Williams, C., Ivanova, O., & Garrett, B. (2011). Could 3D printing change the world? *Atlantic Council*.
- Coachman, C., & Calamita, M. (2012). Digital smile design. *Quintessence Dental Technology*, 35, 103–111.
- Corazza, P. H., De Castro, H. L., Feitosa, S. A., Kimpara, E. T., & Della Bona, A. (2015). Influence of CAD-CAM milling on ceramics. *Dental Materials*, 31(6), e1–e10.
- Dawood, A., Marti, B. M., Sauret-Jackson, V., & Darwood, A. (2015). 3D printing in dentistry. *British Dental Journal*, 219(11), 521–529.

- Della Bona, A., Cantelli, V., Britto, V. T., Collares, K. F., & Stansbury, J. W. (2021). 3D printing restorative materials. *Dental Materials*, 37(2), 336–350.
- Duarte Jr, S., & Phark, J. H. (2025). Advances in Dental Restorations: A Comprehensive Review of Machinable and 3D-Printed Ceramic-Reinforced Composites. *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry*, 37(1), 257-276.
- Ender, A., & Mehl, A. (2013). Accuracy of dental impressions. *Journal of Prosthetic Dentistry*, 109(2), 121–128.
- Keßler A., Montenbruck L., Schwendicke F., Lüchtenborg J., Kaisarly D.(2025). Narrative review of 3D-printed temporary and permanent dental resin restorations. *Polymer Testing*.
- Mangano, F., Gandolfi, A., Luongo, G., & Logozzo, S. (2017). Intraoral scanners. *BMC Oral Health*, 17(1), 149.
- Moon, W., Kim, S., Kim, H., et al. (2022). Additive and subtractive manufacturing in dentistry: Current status and future perspectives. *Materials*, 15(16), 5695.
- Revilla-León, M., & Özcan, M. (2019). Additive manufacturing in dentistry. *Journal of Prosthodontics*, 28(2), 146–158.
- Spitznagel, F. A., Boldt, J., & Gierthmuehlen, P. C. (2018). CAD/CAM materials. *Journal of Dental Research*, 97(10), 1080–1089.
- Stansbury, J. W., & Idacavage, M. J. (2016). 3D printing with polymers. *Dental Materials*, 32(1), 54–64.
- Sulaiman, T. A. (2020). Materials in digital dentistry. *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry*, 32(2), 171–181.
- Tahayeri, A., Morgan, M. C., Fugolin, A. P., Bompolaki, D., Athirasala, A., Pfeifer, C. S., ... Ferracane, J. L. (2018). 3D printed versus

conventionally cured provisional crown and bridge dental materials. *Dental Materials*, 34(2), 192–200.

Van Noort, R. (2012). The future of dental devices is digital. *Dental Materials*, 28(1), 3–12.

Wong, K. V., & Hernandez, A. (2012). A review of additive manufacturing. *ISRN Mechanical Engineering*, 2012, 1–10.

Yan, X., & Gu, P. (1996). A review of rapid prototyping technologies. *Computer-Aided Design*, 28(4), 307–318.

Yüceer, Ö. M., Kaynak Öztürk, E., Çiçek, E. S., Aktaş, N., & Bankoğlu Güngör, M. (2025). Three-dimensional-printed photopolymer resin materials: A narrative review on their production techniques and applications in dentistry. *Polymers*, 17(3), 316.

Zeng, Y., Ning, C., & Huang, Y. (2021). 3D printing in tissue engineering. *Materials Science and Engineering C*, 118, 111–130.

BÖLÜM 2

YAŞLI HASTALARDA ÇÜRÜK RİSK FAKTÖRLERİ, ÇÜRÜK YÖNETİMİ VE GÜNCEL TEDAVİ SEÇENEKLERİ

Merve ARSLAN¹, Emre YAPICI²

Giriş

Canlı organizmalarda gelişim sürecinde ortaya çıkan ve geri dönüşü olmayan fizyolojik değişimler yaşlanmaya neden olur. Yaşlanma yalnızca fizyolojik değil, aynı zamanda psikolojik ve sosyal boyutları olan karmaşık bir süreçtir (Aksoy, 2022). Yaş ilerledikçe doku ve organların işlevlerinde azalma görülür; bu durum günlük aktivitelerde kısıtlılık, psikomotor gerileme ve buna bağlı olarak kaza riskinde artışa yol açabilir. Ayrıca yaşlı bireylerin enfeksiyonlara yatkınlıklarının arttığı bilinmektedir (Aydoğan et al., 2011). Yaşlanma sürecinde ağız sağlığını korumak da zorlaşabilmektedir (Bianco et al., 2021).

Tıp alanındaki gelişmeler, koruyucu sağlık politikaları ve salgın hastalıklarla mücadeledeki ilerlemeler ortalama yaşam

¹ Uzman Diş Hekimi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi Restoratif Diş Tedavisi Anabilim Dalı, Orcid: 0009-0006-9115-7151

² Uzman Diş Hekimi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi Restoratif Diş Tedavisi Anabilim Dalı, Orcid: 0009-0005-6697-4750

süresinin uzamasını sağlamıştır. Günümüzde yalnızca gelişmiş ülkelerde değil, gelişmekte olan ülkelerde de yaşam süresi ve yaşlı nüfus oranı artmaktadır. Dünya Sağlık Örgütü raporlarına göre tedavi edilmemiş diş çürüğü yetişkinler arasında en yaygın sağlık sorunu olup yaklaşık 2,4 milyar kişiyi etkilemektedir ve özellikle 60 yaş üzerindeki bireylerde çürük görülme sıklığı artmaktadır (Al-Nasser & Lamster, 2020). Bu artışın yaşlı bireylerde kök çürüğünün daha sık görülmesiyle ilişkili olduğu belirtilmektedir (Kassebaum et al., 2015).

Diş çürüğü; subklinik değişikliklerden, dentine ilerleyen lezyonlara kadar artan diş dokusu yıkımına ve ilerledikçe diş kaybına sebep olan hastalık durumlarının sürekliliği olarak tanımlanır (Featherstone, 2004). Kök çürüğü, mine-sement bileşimi altındaki açıkta kalan kök yüzeyinde meydana gelen diş çürüğünü ifade eder. Başlıca özellikleri kök yüzeyinin demineralizasyonu ve doku yıkımıdır (Cai et al., 2018). Özellikle kök çürüğü, multi-morbiditesi olan yaşlı bireyler arasında önemli ancak sıklıkla gözden kaçan bir durumdur (Alyamani et al., 2025). İyi bir ağız hijyeni olmaması, beslenme alışkanlıkları ve hiposalivasyona sebep olan durumların varlığı (Sjögren sendromu, ağız kuruluğuna sebep olan farmakolojik ajanlar, vb.) yaşlılar arasında kök çürüğü insidansının artması bakımından özel öneme sahip risk faktörleridir. Artan yaş ile birlikte kronik peridontal hastalıklar beraberinde diş eti çekilmesi ile daha önce korunan kök yüzeylerinin kariyojenik faktörlere maruz bırakarak yaşlı popülasyonlarda kök çürüğü riskini artırır (Gati & Vieira, 2011). Kök çürüklerinin yaygınlığı, bildirilen oranlar %25 ile %100 arasında değişen dünya çapında farklı bölgeler ve popülasyonlar arasında önemli ölçüde değişmektedir (Gavriilidou & Belibasakis, 2019). Yaşlı bireyler arasında artan bu sağlık probleminin ihmal edilmesi halinde, sürecin süratle pulpitis ve periapikal patolojilere ilerlemesine neden olur. Son aşamada ortaya çıkan kalmış kökler ve kron harabiyetleri, yaşlı bireylerin oral

fonksiyonlarını kısıtlayarak yaşam kalitelerini bozmakta ve genel vücut sağlığını riske atan potansiyel bir odak haline gelmektedir. Kök çürüklerinin yönetimi; hastanın sistemik durumu, lezyonun derinliği ve kavitasyon varlığına göre şekillenen dinamik bir süreci kapsar. Bu süreçle başa çıkmada temel strateji, cerrahi müdahaleden önce koruyucu ve remineralizasyon odaklı yaklaşımları ön plana çıkarmak olacaktır. Özellikle erken dönem lezyonlarda yüksek konsantrasyonlu florür vernikleri ve Gümüş Diamin Florür (SDF) gibi non-invaziv ajanların kullanımı, sert doku kaybını durdurmada altın standart olarak kabul edilmektedir. Kavitasyonun olduğu durumlarda ise biyouyumlu ve florür salınımı yapabilen cam iyonomer simanlar (CIS) veya rezin modifiye sistemler, kök yüzeyine yüksek adaptasyon yetenekleri sayesinde restoratif seçeneklerin başında yer alır (Schwendicke et al., 2020). Bu bölümde, yaşlı popülasyonda giderek yaygınlaşan çürüklerin temelinde yatan risk faktörleri incelenmekte; bu kompleks vakaların klinik yönetiminde kullanılan güncel yaklaşımlar ve modern tedavi stratejileri kapsamlı bir çerçevede ele alınmaktadır.

Yaşlanmanın Oral Doku Üzerindeki Etkileri

Oral mukoza, salgılama, duyuşal uyarıları algılama ve su kaybının önlenmesi başta olmak üzere birçok önemli rol üstlenir. Ayrıca altta bulunan dokuyu mekanik kimyasal ve biyolojik stres faktörlerinden korur. Yaşlanmaya bağılı olarak oral mukozada oluşan mikrobiyal dengesizlik sonucu IL-1, IL-6 ve TNF- α gibi proinflatuar sitokinlerin yüksek seviyeleriyle metabolik endotoksemiye yol açabilir. Bu proinflatuar etki; kronik inflamasyona neden olur ki bu düşük dereceli bir inflamasyon türüdür. Kronik inflamasyonun yaşlanmaya bağılı doku hasarının başlangıcını hızlandırdığı çalışmalarla da gösterilmiştir (Hotamisligil & Erbay, 2008; Teissier et al., 2022). Fakat inflamasyona karşı verilen savunma yanıtını tükürük, diyetle alınan

protein ve konağın immünolojik yetenekleri etkileyebilir (Hamzah, 2023).

Klinik muayenede yaşlı hastalarda sıklıkla diş eti iltihabı, periodontitis, atrofik glossitis, kandida ile ilişkin protez stomatiti gibi oral mukozayı etkileyen patolojik değişiklikler görülmektedir. Yaşlanma süreciyle birlikte oral mukozada gözlenen patolojik değişimlerin takibi, erken tanı stratejileri açısından hayati önem taşır. Bu dönemde ortaya çıkan patolojilerin prekanseröz dönüşüm potansiyeli barındırabileceği göz önünde bulundurulmalı ve bu lezyonlar potansiyel malignite riski açısından multidisipliner bir yaklaşımla ele alınmalıdır (Kaminska-Pikiewicz et al., 2017). Ek olarak yaşlanmış epitel, çeşitli zararlı maddelere karşı daha geçirendir ve mekanik yaralanmalara ve tahriş edici maddelerin etkisine daha yatkındır; bu durum aynı zamanda yara iyileşme süreçlerinin zayıflamasına da yol açar (Knychalska-Karwan, 2009).

Dişlerin ve periodonsiyumun yaşlanma süreci, kariyojenik lezyonların ve periodontal hastalıkların prevalansında belirgin bir artışı beraberinde getirir. Bu süreçte yaşlı bireylerde bakteriyel plağın; açığa çıkan kök yüzeylerinde ve protez bileşenlerinde daha kolay retansiyon alanı bulması, patolojik lezyonların gelişimi için elverişli bir zemin hazırlar (Ziyati & Sidqui, 2024).

Yaşlanmanın periodontal dokulara etkileri

Klinik olarak, yaşla birlikte diş etlerinde meydana gelen değişiklikler çok belirgin değildir. Yaşlılarda diş eti daha az granüle olur, yapışık diş etinin yüksekliği yaşla birlikte değişirken, mukozada diş eti çizgisi değişmeden kalır. Yaşlılarda beyaz lezyonlar veya oral keratozlar daha sık görülür ve keratinizasyonun enzimatik sistemlerinin bozulmasıyla ilişkili olabilir. Diş eti epitelinin, özellikle yüzeysel tabakalarda olmak üzere, genç yetişkinlere göre yaklaşık üçte bir oranında daha ince olduğu söylenmektedir (JOURDE, 2001).

Yaşlı popülasyonda yaygın olarak gözlenen diş eti çekilmesi ve beraberindeki ataşman kaybı, doğrudan kronolojik yaşlanmaya bağlı bir atrofiden ziyade, anatomik yatkınlıklar ile çevresel faktörlerin kesiştiği multifaktöriyel bir sürecin sonucudur. İnce periodontal fenotip ve malpozisyon gibi anatomik unsurların, kronik inflamasyon ve travmatik fırçalama alışkanlıklarıyla birleşmesi, alveoler kemik kaybı ile karakterize olan bu yıkıcı tabloyu derinleştirmektedir (Ebersole et al., 2018).

Alveoler kemiğin metabolizmasında azalma ve dolayısıyla iyileşme ve adaptasyon kapasitelerinde azalma yaşandığını göstermiştir (Ziyati & Sidqui, 2024). Kemik kütlesi giderek azalır, osteoblast sayısı ve aktivitesi azalır, yağ dokusu, hematopoetik doku, osteoid doku ve trabeküler kemiğin hacimsel oranları değişir (Persson, 2018). Periodontal hastalıkla ilişkili diş kaybı, kaybedilen dişin sağlıklı destekleyici dokusuna kıyasla daha fazla kemik erimesiyle birlikte görülür (Revol et al., 2006).

Yaşlanmanın diş sert dokularına etkileri

Diş organını oluşturan tüm dokular (mine, dentin, pulpa dokusu ve sement) yaşlanma sürecinden geçer. Bu nedenle, minedeki çatlaklar veya erozyon, atrizyon veya abrazyon yoluyla madde kaybı, diş yaşlanmasının karakteristik özellikleridir ve sklerotik dentinin açığa çıkmasını destekler. Ek olarak, pulpa dokusunun fizyolojik yaşlanması, pulpa boşluğunun küçülmesiyle ilişkili kısmi veya tam fibrozise yol açar, bazen tamamen kapanmasına kadar varabilir (Ziyati & Sidqui, 2024).

Mine, kendini yeniden oluşturmamayan, inert bir dokudur ve okluzal bölgesindeki düzenli aşınma nedeniyle basit bir yıpranmaya uğrar. Aşınma, hastanın oklüzyonuna ve yeme alışkanlıklarına göre değişir ve bazen bazı koronal kısımların tamamen aşınmasına yol açar; mine yüzeyinde sıklıkla çatlaklar ve yarıklar görülür, mine prizmaları çöker; bu değişiklikler hastanın

sıklıkla sadece estetik nedenlerle muayeneye gelmesine neden olabilir (Kampanas & Antoniadou, 2018).

Yaşlanma sürecinde dentin dokusunda meydana gelen değişimler, yapısal ve fonksiyonel açıdan iki temel eksende şekillenmektedir. Bir yandan yaşam boyu süregelen sekonder dentin yapımı, pulpa odasının ve kanalların kademeli olarak daralmasına neden olurken; diğer yandan peritübüler dentin birikimiyle karakterize olan dentin sklerozu, tübüllerin zamanla tıkanmasına yol açmaktadır. Tübüler tıkanıklığın bir sonucu olarak dentinin kırılma indeksi değişerek doku daha translüsent (saydam) bir görünüm kazanmakta, aynı zamanda dişin dış uyaranlara karşı geçirgenliği ve hassasiyeti belirgin ölçüde azalmaktadır (Prakash & Bhandari, 2020).

Yaşlanmayla birlikte dentin depozisyonu pulpa odasının daralmasına, doku vaskülaritesinin azalmasına ve yaygın fibrotik değişimlere neden olmaktadır. Pulpal innervasyondaki gerileme ağrı eşiğinin yükselmesine yol açarak, özellikle kavite preparasyonu sırasında oluşabilecek termal hasarların hasta tarafından algılanmasını güçleştirmekte ve pulpanın vitalitesini korumayı zorlaştırmaktadır (Prakash & Bhandari, 2020).

Yaşlılıkta diş sert dokularında görülen ortak değişikliklerden biri sementum kalınlığının artmasıdır. Yaş ilerledikçe meydana gelen diş eti çekilmesi, servikal bölgede bulunan sementumun daha fazla açığa çıkmasına neden olur. Bu durum hem kök yüzeyinin dış ortamla temasını artırır hem de bazı bireylerde estetik açıdan rahatsızlık ve özgüven kaybına yol açabilir (Prakash & Bhandari, 2020).

Yaşlanmanın tükürük fonksiyonlarına etkisi

Genellikle tükürük salgısının yaşla birlikte azaldığı varsayılır. Yaşlıların yaklaşık %25'i ağız kuruluğu ve ilgili şikayetlerden müzdarıdır (Vissink et al., 1996). Tükürük, hareketli protez kullananlarda ağız mukozasını mekanik tahriş ve enfeksiyonlardan korumak ve tam protezlerin tutunmasını sağlamak için önemlidir. Tükürük bezlerindeki yaşlanmayla görülen değişiklikler, özellikle ara kanalların hücre astarının atrofisi sonucu, yaşlılarda tükürük akışında azalma olur; ayrıca seröz tükürük daha mukuslu hale gelir ve bu da viskoz ve lifli olabilir. Bu, protez tutunmasında olumsuz, plak ve çürük yapıcı bakterilerin birikiminde ise olumlu bir etkiye yol açabilir. Bu ayrıca mukoza rahatsızlığına, yutma güçlüğüne ve kandidiyaza neden olur (Prakash & Bhandari, 2020).

Yaşlanmanın oral flora etkileri

Yaşlanma, doku fonksiyonunun homeostazın sürdürülmesinin sınırlı olduğu kadar değiştiği veya bozulduğu bir durum olan bu sürecin son aşamasıdır. Yaşlılıkta ağız dokusunda birçok değişiklik olabilir. Oral flora multifaktöriyel değişikliklerden etkilense de yaşlılık da önemli bir faktördür (Belibasakis, 2018). Tükürük ve oral yüzeyde ölçülen genel oral mikrobiyomun yaşlılıkla birlikte değiştiğine dair kanıtlar vardır. Xu ve ark., 60 yaş üzeri bireylerde yürüttükleri çalışmada periodontal hastalık ve tam dişli kontrol grubunun tükürük mikrobiyotasını incelemiş ve 62–76 yaş arasındaki bireylerde genç yetişkinlere kıyasla *Haemophilus* düzeylerinin daha düşük olduğunu bildirmiştir (Xu et al., 2015). Takeshita ve ark. tarafından gerçekleştirilen geniş ölçekli bir çalışmada tükürük mikrobiyotasında iki farklı mikrobiyal profil tanımlanmıştır. İlk profil *Prevotella*, *Veillonella*, *Actinomyces*, *Rothia*, *S. salivarius* ve *S. parasanguinis* açısından zengin olup daha çok yaşlı bireylerde görülürken; ikinci profil *Neisseria*,

Haemophilus, Porphyromonas, Gemella ve S. mitis bakımından zengin olup genç bireylerde daha belirgin bulunmuştur. Vücut kitle indeksi, çürük varlığı, tütün kullanımı, diş sayısı, periodontal hastalık ve plak düzeyi gibi değişkenler için yapılan düzeltmeler sonrasında da bu farklılıkların devam ettiği bildirilmiştir (Takeshita et al., 2016). Özetle, yaşlanma süreciyle birlikte ağız florasında yaşanan bu kaymalar, dış faktörlerden bağımsız olarak ağız ekosisteminin biyolojik döngüsü içerisinde kendine has bir yapı oluşturmaktadır.

Yaşlı hastalarda çürük epidemiyolojisi

Dünya Sağlık Örgütü (DSÖ) raporlarına göre, yaşam süresinin uzamasıyla birlikte yaşlı popülasyonda diş çürüğü görülme sıklığı artmaya devam etmekte ve bu durum küresel ölçekte yaklaşık 2,4 milyar bireyi etkileyen öncelikli bir halk sağlığı sorunu olarak karşımıza çıkmaktadır (Organization, 2022). Nitekim 1991 ile 2024 yılları arasındaki çalışmaları kapsayan güncel meta-analiz verileri, çalışmalar arasındaki heterojenliğe rağmen yaşlı popülasyonda diş çürüğü prevalansının %60,7 gibi yüksek bir oranda seyrettiğini doğrulamakta ve bu tablonun küresel çapta ciddi bir sağlık sorunu olduğunu istatistiksel olarak kanıtlamaktadır (Almasvandi et al., 2025). Türkiye'deki tablo incelendiğinde; 1988 yılında yürütülen ve günümüzde halen ülke çapındaki tek ulusal referans olma özelliğini sürdüren çalışmaya göre, 65 yaş ve üzeri bireylerde dişsizlik oranı %75, DMFT skoru ise 28,76'dır (Saydam et al., 1990). Günümüzde özellikle bakım merkezlerinde ikamet eden yaşlı bireyler, kısıtlı motor becerileri ve bilişsel gerileme gibi faktörler nedeniyle ağız sağlığı açısından en riskli grubu oluşturmaktadır; nitekim yapılan çalışmalar bu merkezlerdeki DMFT skorlarının toplum genelinden çok daha yüksek olduğunu göstermektedir (Nalçacı et al., 2007). Bu bulgular, yaşlı bireylerde diş çürüğünün hem bireysel yaşam kalitesini hem de toplum düzeyinde ağız sağlığı hizmetlerine olan ihtiyacı etkileyen önemli bir sorun olduğunu ortaya koymakta

ve özellikle yaşlı popülasyona yönelik koruyucu ve tedavi edici ağız sağlığı programlarının geliştirilmesinin gerekliliğini vurgulamaktadır.

Yaşlı hastalarda çürük risk faktörleri

Dünya genelinde 60 yaş ve üstü bireylerin nüfusunun giderek arttığı ve dünya nüfusunun hızlı yaşlandığı Dünya Sağlık Örgütü tarafından rapor edilmiştir (Organization, 2022). Bu hastalarda ömür uzadıkça kronik hastalıklar artmakta ve bunları yönetmek için çeşitli ilaçlar kullanmaktadırlar (Chan et al., 2021a). Bu ilaçlar ağız kuruluşuna sebep olabilir bu durum da çürük insidansında artış, enfeksiyona yatkınlık, protez travmalarında artış, ülserasyonlar, mukozitis ve diş aşınmalarına sebep olabilmektedir. Yaşlı hastalarda en sık görülen oral hastalıklardan birisi de kök çürüğüdür. Çeşitli sebeplerden dolayı ağız kuruluşu, plak yönetiminin iyi yapılamaması sonucu S.Mutans ve Lactobacillus'ların oral floradaki sayılarının artması bu durumlarla birlikte diş eti çekilmesinin oluşması kök çürüğünde büyük rol oynamaktadır (Gati & Vieira, 2011). Yaşlılarda kök çürüğünün oluşumu ve ilerlemesinde yer alan bilinen klinik ve davranışsal risk faktörleri vardır:

Sistemik faktörler

Multimorbidite

Multimorbidite, genellikle bir bireyde birden fazla kronik hastalığın eş zamanlı olarak bulunması durumu olarak tanımlanır ve özellikle yaşlı popülasyonda sık görülmektedir. Multimorbidite, yaşam kalitesinin düşmesi, fonksiyonel yetenek kaybı ve sağlık hizmetleri kullanımının artmasıyla ilişkilidir ve yaşlı nüfusun çoğalmasıyla birlikte küresel sağlık yükünü artırması beklenmektedir (Masnoon et al., 2017). Artan yaşlı nüfus, kardiyovasküler hastalıklar, kanser, kronik solunum yolu

hastalıkları, tip 2 diyabet ile birlikte diş çürüğü, periodontal hastalık ve diş kaybı gibi kronik durumlarla bir arada yaşamaktadır. (Watt & Serban, 2020). Multimorbidite, sistemik sağlık üzerindeki olumsuz etkilerinin yanı sıra oral sağlık sorunlarının (diş çürüğü, periodontal hastalık, diş kaybı) prevalansını ve şiddetini artırmakta; buna karşılık bozulmuş ağız sağlığı sistemik inflamasyonu yükselterek kronik hastalıkların seyrini olumsuz etkilemektedir. Multimorbiditeden kaynaklı polifarmasiye bağlı kserostomi, kök çürüğü ve ilaç kaynaklı ağız dokusu komplikasyonları, özellikle yaşlılarda ağız hijyeni ve yaşam kalitesini düşürmekte, hareket ve bilişsel kısıtlılıklar günlük ağız bakımını zorlaştırarak çürük ve periodontal hastalık riskini artırmaktadır. Bu bağlamda, multimorbid yaşlı bireylerde ağız sağlığının korunması, multidisipliner yaklaşımlar, düzenli diş kontrolleri ve bireye özgü ağız bakım planları ile sağlanmalıdır (Alyamani et al., 2025).

Çoklu ilaç kullanımı (Polifarmasi)

Dünya nüfusunu oluşturan yaşlı yetişkinlerin oranı hızla arttıkça, hastanın tıbbi karmaşıklığı ve hastalık durumlarını ve/veya semptomlarını tedavi etmek için reçete edilen ilaçların sayısı da artmaktadır. Polifarmasi teriminin çeşitli tanımları vardır, ancak genellikle beş veya daha fazla düzenli olarak tarife edilen ilaç almak olarak tanımlanır (Masnoon et al., 2017).

Yaşlı bireylerde artan ilaç kullanımı, böbrek ve karaciğer fonksiyonlarındaki azalma, vücut kompozisyonu değişiklikleri ve bilişsel veya fiziksel yeteneklerdeki düşüş nedeniyle olumsuz etkiler ve zarar riskini artırmaktadır; ayrıca ilaç-ilaç ve ilaç-hastalık etkileşimleri de bu riski güçlendirmektedir (Bushardt et al., 2008). Polifarmasinin ağız sağlığı üzerinde önemli etkileri vardır. Birincil sorun, genellikle antikolinergik, semptomatik veya diüretik özelliklere sahip ilaçlardan kaynaklanan kserostomi ve tükürük bezi hipofonksiyonudur. Birlikte alınan birden fazla ilacın kümülatif

etkileri tükürük akışını ciddi şekilde azaltabilir, diş çürüğü, oral kandidis, mukozit, ülserasyon ve disfaji riskini artırabilir (Nakamura et al., 2021). Artan kanama riski, özellikle bazen reçetesiz (OTC) ürünlerle birleştirilen kombine antitrombosit ve antikoagülan tedavileri (örneğin aspirin, klopidogrel, varfarin ve doğrudan oral antikoagülanlar [DOAC'ler]) ile bir başka önemli sonuçtur. Bu, hemostaz gerektiren diş prosedürlerini zorlaştırır ve ağız boşluğunda peteşi, purpura ve ekimoz dahil olmak üzere çeşitli belirtilerle kendini gösterir. Polifarmasi, özellikle antiresorptif ve antianjiyojenik tedavilerle birlikte kullanıldığında, diş çekimi veya travma sonrasında ilaca bağlı çene osteonekroz (MRONJ) riskini ve şiddetini artırmaktadır. Bu nedenle, yaşlı hastalarda polifarmasi ile ilişkili ağız sağlığı komplikasyonlarının önlenmesi için özenli ilaç değerlendirmesi ve yönetimi büyük önem taşımaktadır (Kulkarni & Yeoh, 2026).

Kserostomi

Kserostomi, tükürük akışındaki azalma ve tükürük bileşimindeki değişikliklerle karakterize edilen ağız kuruluğu hissi olarak tanımlanmaktadır (Porter et al., 2004). Ağız kuruluğu ve kserostomi terimleri zaman zaman birbirinin yerine kullanılsa da gerçek kserostomi, tükürük bezlerinin akut veya kronik hipofonksiyonuna bağlı olarak gelişen yetersiz tükürük sekresyonu ile ilişkilidir. Genellikle tükürük salgısının %50'den fazla azalması durumunda bireyler ağız kuruluğu şikâyeti bildirmektedir. Bununla birlikte, tükürük bezlerinin normal salgı fonksiyonuna rağmen ağız kuruluğu hissini ortaya çıkabildiği ve psödo-kserostomi olarak adlandırılan durumlar da tanımlanmıştır. Psödo-kserostominin olası nedenleri arasında tükürük bileşimindeki değişiklikler, ağız solunumu, atipik oral ve fasyal semptomlar, ağız yanması sendromu, oral disestezi ile mental ve psikiyatrik bozukluklar yer almaktadır (Do & Nguyenphu, 2017). Ayrıca bazı psödo-kserostomi vakalarında oral sıvı miktarında yaklaşık %50 oranında azalma

gözlenebildiği bildirilmiştir (Arakelyan et al., 2019). Tükürük bezi yapısı ve fonksiyonundaki değişiklikler, ilaç kullanımı, sistemik hastalıklar ve psikososyal yönler de dahil olmak üzere yaşa bağlı çeşitli faktörler, yaşlı bireylerde kserostomiye katkıda bulunur (Lipsky et al., 2024).

Lokal Faktörler

Yaşam süresinin uzamasına bağlı olarak dişin ağızda tutulumunun artması, kök çürüklerini önümüzdeki yıllarda kritik bir halk sağlığı sorunu haline getirmektedir. Diş eti çekilmesi, sistemik hastalıklar ve sosyoekonomik değişkenler gibi çok boyutlu risk göstergelerinin etkisiyle, açıkta kalan kök yüzeylerinde kompleks bir bakteriyel etkileşim sonucu gelişmektedir (Jingyang Zhang et al., 2020). Düşük mineral içerikli kök yüzeylerini asidik demineralizasyona (pH 6.2-6.7) maruz bırakarak, hem morfolojik girintilerde karyojenik biyofilm birikimine hem de dentin tübülleri aracılığıyla kollajen ağının enzimatik yıkımına zemin hazırlayan kritik bir tetikleyicidir (Higashi et al., 1995). Özetle; yaşlı bireylerde görülen kök çürüklerinin lokal faktörleri diş eti çekilmesi başta olmak üzere; yetersiz ağız hijyeni ve ağız kuruluşuna bağlı plak retansiyonu, protetik retansiyon alanları, kötü yapılmış restorasyonlar, dişlerdeki çapraşıklıklardır (J Zhang et al., 2020)

Davranışsal faktörler

Diyet ve beslenme, yaşlı erişkinlerde ağız sağlığı ile çift yönlü bir ilişki içindedir; yetersiz beslenme, diş çürüğü ve periodontal hastalık riskini artırırken, kötü ağız sağlığı beslenme alımını olumsuz etkileyebilir (Chan et al., 2023). Küresel yaşlı yetişkin nüfusun yarısında tedavi edilmemiş diş çürüğü vardır ve diyet yaşlı yetişkinlerde çürük risk faktörlerinden biridir (Chan et al., 2021b). Fermente edilebilir karbonhidratların (şekerler ve nişasta) çürük başlangıcında ve ilerlemesinde gerekli olduğunu gösteren kesin kanıtlar vardır (Chapple et al., 2017). Yaşlı yetişkinler, yaşla

birlikte tuzlu, tatlı ve umami tat algısında bir düşüş yaşarlar ve şeker alımını artırabilecek tatlı ve tuzlu yiyeceklerin daha fazla tüketimiyle daha güçlü tatlar seçme eğilimindedir. Bir çalışma, kahve veya çayda sükaroz alımının, toplumda yaşayan yaşlı Japon yetişkinlerde kök yüzey çürüklerinin artmasıyla ilişkili olduğunu göstermiştir (Yoshihara et al., 2021).

Bununla birlikte, çürük gelişimini etkileyen bir diğer önemli faktör ise ağız hijyeni uygulamalarıdır. Özellikle yaşlı nüfus arasında çürük yaygınlığını azaltmada çok önemli bir rol oynamaktadır (Lipsky et al., 2024). Araştırmalar, çürük riskini azaltmak için etkili stratejiler olarak günde iki kez florürlü diş macunu (5000 ppm) ve aylık florür vernik uygulamasının kullanımını desteklemektedir (Rethman et al., 2011).

Bunun yanı sıra, yaşlı bireylerde ağız sağlığını etkileyen bir diğer önemli risk faktörü sigara kullanımıdır. Sigara içmek, periodontal dokuya nikotin biriktirerek çeşitli hastalıklara neden olur. Periodontal inflamasyon, periodontal cepler ve periodontal membran hasarı gibi hastalıklara karşı artan duyarlılık için potansiyel bir mekanizma olarak kabul edilir (Warnakulasuriya et al., 2010). Sigara içmenin ayrıca implant tedavisi sonuçları üzerinde önemli kısa ve uzun vadeli etkileri vardır, iltihaplanma ve kalıcı ağrıya (Gandini et al., 2008), çürük, ağız kokusu ve ağız hijyenine yol açar (Hinode et al., 2006).

Sosyal Faktörler

Yaşlı nüfusun artmasıyla birlikte bireyler çoklu sosyo-tıbbi ve diş hekimliği gereksinimleriyle karşı karşıya kalmaktadır. Yaşlanmaya bağlı fizyolojik değişiklikler ve bakım ile beslenme alışkanlıklarında artan bağımlılık, yaşlı bireylerde genç popülasyonlara kıyasla daha yüksek tedavi edilmemiş çürük yükünün görülmesine katkıda bulunmaktadır (Alyamani et al., 2025). Bununla birlikte, yaşlı yetişkinler homojen bir grup olmayıp

fonksiyonel durumlarına göre farklı alt gruplardan oluşmaktadır. Bu gruplar; toplumda bağımsız yaşayan ve genel sağlık durumu iyi olan aktif bireyler, günlük yaşamlarında kısmen destek alan ancak yaşam tarzı seçimlerini büyük ölçüde sürdürebilen bireyler ve beslenme ile ağız bakımı konusunda bakıcılara bağımlı olan düşkün yaşlılar olarak sınıflandırılabilir. Diş çürüğü riski özellikle bakıma bağımlı ve kısmen bağımlı yaşlı bireylerde daha belirgin olup, bu durum ağız hijyeninin sürdürülmesindeki güçlükler ve beslenme alışkanlıklarının başkaları tarafından belirlenmesiyle ilişkilendirilmektedir (Curzon & Preston, 2004). Yaşlı yetişkinler çeşitli sosyoekonomik nedenlerle sıklıkla diş bakımından kaçınabildiğinden, diş tedavisine ihtiyaç duyan bireylerin belirlenmesinde birinci basamak sağlık profesyonellerinin rolü büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda, geriatrik hastalarla çalışan tüm sağlık profesyonellerinin ağız sağlığını etkileyebilecek tıbbi ve farmakolojik faktörlerin farkında olması ve diş hekiminin de aktif rol aldığı multidisipliner bir yaklaşım benimsenmesi, hastalıkların önlenmesi ve ağız sağlığının korunması açısından önemlidir (Alyamani et al., 2025)

Protetik Faktörler

Protetik rehabilitasyon da yaşlı bireylerde çürük riskini etkileyen önemli faktörler arasında yer almaktadır. Özellikle hareketli dental protezler, pürüzlü akrilik yüzeyleri ve kroşe gibi retantif bileşenleri nedeniyle plak ve gıda retansiyonunu artırarak mikroorganizma kolonizasyonuna zemin hazırlayabilir. Protez bileşenlerinin diş kök yüzeylerine yakın konumlanması ve protez hijyeninin yetersiz olması, özellikle kök yüzey çürüklerinin gelişme riskini artıran başlıca protetik faktörler olarak bildirilmektedir (Huang et al., 2021) (Tepox-Puga et al., 2023).

Yaşlı Hastalarda Çürük Risk Değerlendirmesi

Çürük Risk Değerlendirmesi, "bireysel bir hastanın belirli bir süre boyunca çürük lezyonları geliştirme olasılığını veya hali hazırda mevcut olan lezyonların boyutunda veya aktivitesinde bir değişiklik olma olasılığını belirlemenin klinik süreci" olarak tanımlanır (Twetman, 2016). Değerlendirme çeşitli yazılımlar veya anketler aracılığıyla uygulanabilmekte olup en yaygın kullanılan araçlar arasında Amerikan Diş Hekimleri Birliği (ADA) Çürük Risk Değerlendirmesi, Risk Değerlendirmesi ile Çürük Yönetimi (CAMBRA), Amerikan Pediatrik Diş Hekimliği Akademisi Çürük Değerlendirme Aracı (AAPD CAT) ve Kariogram yer almaktadır. Bu araçlar, yalnızca klinik bulguları değil, aynı zamanda davranışsal, sosyodemografik ve diğer bireysel faktörleri de dikkate alarak çok boyutlu bir risk değerlendirme sunmaktadır ve böylece kişiselleştirilmiş önleyici planların oluşturulmasını mümkün kılmaktadır (Mejäre et al., 2014).

Farklı çürük sınıflandırma modelleri ve risk faktörleri şunlardır:

Black Sistemi: 20.yüzyılın başlarında Black tarafından geliştirilen çürük sınıflandırması, lezyonları diş yüzeylerine göre tanımlayan ve uzun yıllar klinik uygulamada yaygın olarak kullanılan basit ve pratik bir sistemdir. Ancak bu sistem yalnızca kavite oluşmuş lezyonları dikkate aldığı için kaviteleşmemiş erken çürük lezyonlarını kapsamamakta ve erken dönemde uygulanabilecek koruyucu yaklaşımların değerlendirilmesini sınırlamaktadır (Young et al., 2015).

Dünya Sağlık Örgütü (WHO-DSÖ) DMFT İndeksi: Dünya Sağlık Örgütü tarafından kullanılan DMFT (D₃MFT) ve DMFS (D₃MFS) indeksleri, çürük, kayıp ve dolgulu diş veya yüzey sayılarını belirleyerek çürük prevalansını değerlendiren temel epidemiyolojik yöntemlerdir. Ancak bu sistem, yalnızca

kavitasyonla karakterize D₃ düzeyindeki lezyonları kaydettiğinden, kaviteleşmemiş erken dönem çürük lezyonlarını değerlendirmede yetersiz kalmaktadır (Young et al., 2015).

Amerikan Dış Hekimleri Birliği Çürük Sınıflandırma Sistemi (ADA CCS): 2008 yılında Amerikan Dış Hekimleri Birliği (ADA) tarafından geliştirilen ADA Çürük Sınıflandırma Sistemi (ADA CCS), çürüğü yalnızca bir lezyon olarak değil, hastayı etkileyen dinamik bir hastalık süreci olarak değerlendiren klinik bir yönetim yaklaşımıdır. Bu sistem, çürüğün varlığı, aktivitesi ve şiddetinin belirlenmesine dayalı klinik evrelemeyi vurgulayarak daha koruyucu ve cerrahi olmayan tedavi yaklaşımlarının uygulanmasını hedeflemektedir (Young et al., 2015)

Mount-Hume Sistemi: Bu sistem, çürük lezyonunun genişliği ve kompleksliğini değerlendirerek doğal diş dokusunun korunmasını ve koruyucu yaklaşımların uygulanmasını desteklemeyi amaçlamaktadır. Bununla birlikte, lezyonun aktivitesi hakkında bilgi sunmaması ve literatürde sınırlı veri bulunması önemli kısıtlılıkları arasında yer almakla birlikte, restoratif materyal seçiminde de klinisyenlere rehberlik sağlamaktadır (Young et al., 2015).

Taraf-Aşama (Site-Stage=SI/STA) Bazlı Sınıflama Sistemi: Bu sınıflandırma sistemi, Mount-Hume sistemine benzer şekilde çürüğün yerini ve ilerleme düzeyini tanımlayarak restoratif materyal seçimine rehberlik etmeyi amaçlamaktadır. Bununla birlikte, lezyon aktivitesini değerlendirmemesi ve literatürde sınırlı bilgi bulunması sistemin başlıca kısıtlılıkları arasında yer almaktadır (Gürçan et al., 2018).

Çürük Değerlendirme Skalası Ve Tedavi İndeksi (CAST): Bu sistem, çürük progresyonunun tüm evrelerini kapsayan, görsel ve dokusal bulgulara dayalı hiyerarşik bir çürük değerlendirme indeksidir ve çoğunlukla epidemiyolojik araştırmalarda

kullanılmaktadır. Çürük lezyon ilerlemesi, pulpal tutulum, apse ve fistül gibi komplikasyonların yanı sıra dolgu ve restorasyon durumlarını da içeren bu yaklaşım, ICDAS, DMF ve PUFA indekslerinin güçlü yönlerini birleştirerek diş hekimleri arasında standart bir iletişim sağlamayı amaçlamaktadır (Gürcan et al., 2018; Young et al., 2015)

Karyogram: Çürük oluşumuna katkıda bulunan faktörler ile çürük riski arasındaki ilişkiyi grafiksel olarak gösteren ve Malmö Üniversitesi tarafından geliştirilen bilgisayar tabanlı bir risk değerlendirme programıdır. Sistem; bireyin sistemik hastalıkları, beslenme alışkanlıkları, florür kullanımı, plak miktarı, tükürük akış hızı ve tamponlama kapasitesi, mutans streptokok düzeyi ve geçmiş çürük deneyimi gibi çok sayıda klinik ve davranışsal veriyi kullanarak kişiye özgü çürük riskini niceliksel olarak değerlendirir. Program bu verileri dairesel bir grafik üzerinde farklı renklerle göstererek bakteriyel faktörler, beslenme, duyarlılık ve genel koşullar gibi risk bileşenlerini görsel olarak sunar. Grafikteki yeşil alan bireyin gelecekte çürük gelişimine karşı korunma olasılığını ifade eder ve bu alanın büyüklüğü çürük riski ile ters orantılıdır (Gürcan et al., 2018).

Cohri-Cambra Sistemi (Oral Sağlık Araştırma ve İformatik Konsorsiyumu): Çürüğün erken dönemlerinde önleme ve tedaviye yönelik risk ve koruyucu faktörleri değerlendiren kanıta dayalı bir çürük yönetim yaklaşımıdır. 2003 yılında Amerika Birleşik Devletleri'nde akademi, araştırma, kamu ve özel sektörden paydaşların katılımıyla geliştirilmiştir. Bu model, klinisyenlerin bilimsel kanıtlar, klinik deneyim ve hastanın ihtiyaçları doğrultusunda bireye özgü çürük yönetim planları oluşturmasını desteklemektedir (Gürcan et al., 2018).

ICDAS (Uluslararası Çürük Tespiti Ve Değerlendirme Sistemi): Uluslararası düzeyde standart bir çürük tespit yöntemi geliştirmek amacıyla 2002 yılında karyolog ve epidemiyologlar

tarafından oluşturulmuş görsel muayeneye dayalı bir değerlendirme sistemidir. Sistem, diş yüzeyinin durumunu ve lezyonun şiddetini iki aşamalı bir kodlama ile değerlendirerek çürük lezyonlarının erken dönemden ileri evrelere kadar sınıflandırılmasını sağlar. ICDAS'ın geçerliliği çeşitli çalışmalar ve histolojik incelemelerle desteklenmiş, lezyon derinliği ile anlamlı korelasyon gösterdiği bildirilmiştir. Başlangıçta primer çürüklerin tespiti için geliştirilmiş olsa da sonradan eklenen kriterlerle çürük lezyon aktivitesinin değerlendirilmesinde de kullanılabilir hale gelmiştir(Gürcan et al., 2018).

ICCMS (Uluslararası Çürük Sınıflandırması ve Yönetim Sistemi): Diğer çürük sınıflama sistemlerinden farklı olarak daha gelişmiş bir yaklaşım sunar ve çürük yönetiminde protokollere dayalı yeni bir uygulama modeli getirir. Sistem, 2002'de geliştirilen ICDAS üzerine kurulmuş ve 2010–2012 yıllarında gerçekleştirilen uluslararası çalıştaylar ve toplantılar sonucunda konsensusa varılarak oluşturulmuştur. ICCMS'in temel hedefi, diş yapısını korumak ve yalnızca endike olduğunda restoratif müdahale yapılmasını sağlamaktır. Sistem, çürük derecesi ve aktivitesini belirleyerek hastanın riskini değerlendirmeyi, olasılıkları sentezleyerek tanı koymayı ve buna dayalı kapsamlı bir çürük koruma planı geliştirmeyi amaçlar (Gürcan et al., 2018).

Nyvad Sistemi: Kaviteleşmiş ve kaviteleşmemiş lezyonların aktivitesini değerlendirmek için güvenilir bir yöntem sunar ve lezyonların gözlenen özelliklerine göre aktif veya inaktif olarak sınıflandırılmasını sağlar. Bir lezyon, aktif bir lezyonla uyumlu en az bir özellik gösteriyorsa aktif kabul edilir. Orijinal sistem, plağı lezyon aktivitesinin göstergesi olarak kullanmış ve pürüzlülüğü standart problemlerle değerlendirmiştir; güncel çalışmalar ise metodolojiyi profilaksi sonrası muayene ve WHO sondu kullanımıyla standartlaştırmıştır. Nyvad indeksi, primer dişlerde lezyon derinliğini belirlemede etkili bulunmuş ve mine ile sınırlı

mikrokaviteler, süt dişlerinde dentin demineralizasyonunu göstermektedir (Gürcan et al., 2018).

Güncel bir yaklaşım olarak, makine ğrenimi (ML) algoritmaları büyük ve karmaşık veri kümelerini analiz ederek çürük riskini tahmin etme ve klinik kararları destekleme kapasitesiyle ne çıkmaktadır; bu algoritmalar, geçmiş verilerden öğrenerek yüksek riskli bireyleri belirleyebilir ve kişiselleştirilmiş önleyici stratejilerin uygulanmasına olanak tanır (Bhatia et al., 2025). Ayrıca nomogramlar, mevcut risk değerlendirme sistemlerinin yaşlılarda kök çürüğü için yetersiz kaldığı noktaları tamamlayarak, biyolojik, davranışsal ve sosyolojik faktörleri bir araya getirip kişiye özel risk tahmini sağlar. Böylece erken teşhis ve nlem stratejileri bilimsel temele dayandırılarak yaşlıların ağız sağlığı iyileştirilir (Huang et al., 2025).

Çürük nleme Stratejileri

Diş rğ önlenebilir ve kontrol altına alınabilir bir durumdur; bu nedenle ağız sağlığı eğitimi ve önleyici bakım, yaşlı yetişkinlerde diş sağlığını korumanın temelini oluşturur. Bireyleri ağız hijyeninin önemi ve genel sağlık üzerindeki etkisi konusunda bilgilendirmek, etkili günlük bakım alışkanlıkları edinmelerini ve profesyonel bakıma zamanında başvurmalarını sağlar. Bu yaklaşım, mekanik plak kontrolü, kemoterapötik ajan kullanımı, yaşam tarzı değeriklikleri ve düzenli profesyonel bakımı birleştiren kapsamlı bir strateji ile desteklenir (Chan et al., 2025).

Mekanik plak kontrolü

Diş plağı olarak da adlandırılan diş biyofilmi, periodontal hastalığın ve diş çürüğünün başlıca etkenidir. Mekanik plak kontrolü, periodontal hastalıkların önlenmesi ve periodontal sağlığın sürdürülmesinde temel bir rol oynamaktadır. Ancak yaşlanmaya bağlı fizyolojik değeriklikler ile artrit, görme bozukluğu ve bilişsel

fonksiyonlarda azalma gibi kronik durumlar, yaşı bireylerin el becerisi ve fonksiyonel kapasitesini etkileyerek geleneksel ağız hijyeni yöntemlerini uygulamalarını zorlaştırabilmektedir; bu nedenle yaşı bireylerin özel gereksinimlerine uygun ağız hijyeni araçlarının kullanımı, bireyselleştirilmiş ağız hijyeni eğitimi, destekli ağız bakımı ve profesyonel mekanik plak kontrolü gibi yaklaşımlar büyük önem taşımaktadır (Chan et al., 2021a).

Diş fırçalama

Diş fırçası, mekanik plak kontrolünün temel aracı olup özellikle bukkal ve lingual/palatal diş yüzeylerinin temizliğinde önemli bir rol oynamaktadır (Worthington et al., 2019). Periodontal hastalıkların ve diş çürüklerinin önlenmesi amacıyla bireylerin dişlerini günde iki kez ve en az iki dakika fırçalamaları önerilmekte olup, kılların dişeti kenarına yaklaşık 45° açıyla yerleştirildiği Bass tekniğinin yaşı bireylerde plak birikimini azaltmada etkili olduğu gösterilmiştir (Chan et al., 2021a). Bununla birlikte, diş fırçalama fiziksel ve bilişsel kısıtlılıkları olan yaşı bireyler için zor olabileceğinden, diş fırçası kavrama aparatları veya genişletilmiş sap gibi uyarlanabilir yardımcılar ağız hijyeni uygulamalarını kolaylaştırarak bağımsızlığı destekleyebilir. Ayrıca daha az el becerisi gerektiren elektrikli diş fırçaları da önerilmekle birlikte, mevcut çalışmalar yaşı erişkinlerde plak kontrolü açısından manuel ve elektrikli diş fırçaları arasında belirgin bir üstünlük olmadığını göstermektedir (Fjeld et al., 2018; Nobre et al., 2020)

Ara yüz temizliği

İnterdental temizlik, diş fırçalamaya ek olarak interdental bölgelerdeki plağın uzaklaştırılmasını sağlayarak periodontal sağlığın iyileştirilmesine önemli katkı sunmaktadır (Worthington et al., 2019). Diş ipi uzun yıllardır en yaygın kullanılan yöntemlerden biri olmakla birlikte, ince el becerisi gerektirmesi nedeniyle özellikle

el gücü ve koordinasyonu azalmış yaşlı bireyler için zorlayıcı olabilir; bu nedenle literatürde, travma oluşturmadan kullanılabilirdiği durumlarda interproksimal plak kontrolünde ilk tercih olarak interdental fırçalar önerilmektedir. Ayrıca genişlemiş interdental boşlukların sık görüldüğü yaşlı bireylerde interdental fırçalar ve kullanım kolaylığı sağlayan ağız duşu (oral irrigatör) gibi alternatif yöntemlerin, plak uzaklaştırmada ve periodontal sağlığın iyileştirilmesinde etkili olduğu bildirilmiştir (Jackson et al., 2006; Kotsakis et al., 2018) .

Bireyselleştirilmiş ağız hijyeni eğitimi

Hastaların yaş, dental öykü ve mevcut ağız sağlığı durumları gibi faktörleri dikkate alınan önerilerin daha etkili ve uygulanabilir olmasını sağlar (Sanz et al., 2020). Ağız sağlığı profesyonelleri, yaşlı bireyleri ve gerektiğinde bakıcılarını uygun diş fırçalama ve interdental temizlik teknikleri konusunda eğiterek iyi bir ağız hijyeninin sürdürülmesinde önemli bir rol üstlenir. Özelleştirilmiş talimatlar ve uygulamalı gösterimler, bireylerin gerekli becerileri geliştirmesine yardımcı olurken, dijital teknolojilerin kullanımı da eğitim sürecini destekleyebilir (Chau et al., 2023). Özellikle mobil cihazlar veya tabletler aracılığıyla sunulan video tabanlı eğitim materyalleri, yaşlı bireylerin önerilen teknikleri tekrar izleyerek hatırlamasına ve kendi ağız hijyeni uygulamalarını değerlendirmesine olanak tanıyabilir (Buck et al., 2024).

Yardımlı ağız hijyeni bakımı

El becerisi azalmış veya bilişsel bozukluğu bulunan yaşlı bireyler, ağız hijyeni uygulamalarını yeterli düzeyde gerçekleştiremeyebilir ve bu nedenle günlük bakım aktivitelerinde bakıcı desteğine ihtiyaç duyabilir(Worthington et al., 2019). Bu durumda bakıcılar, ağız hijyeni uygulamalarını denetleme veya

doğrudan sağlama konusunda önemli bir sorumluluk üstlenir; ancak bilgi eksikliği ve uygun kaynakların yetersizliği bu bakımın etkin şekilde uygulanmasının önündeki başlıca engeller arasında yer almaktadır. Bakıcılara uygun tekniklerin öğretilmesi, ağız hijyeni yardımcılarının tanıtılması ve uygulamalı eğitim verilmesi, yardımcı ağız hijyeni bakımının etkinliğini artırabilir (Wu et al., 2021). Nitekim bakıcılara sağlanan eğitim ve destek programlarının, bilişsel bozukluğu olan yaşlı bireylerde plak kontrolü ve gingival sağlık üzerinde olumlu etkiler oluşturduğu gösterilmiştir (Chan et al., 2025).

Profesyonel mekanik plak kontrolü

Düzenli diş hekimi ziyaretleri sırasında gerçekleştirilen profesyonel mekanik plak giderimi, günlük ağız hijyeni uygulamaları sırasında uzaklaştırılamayan plak ve diş taşının temizlenmesini sağlayarak periodontal sağlığın korunmasına katkıda bulunur (Tonetti et al., 2015). Elektrikli diş fırçaları, interdental fırçalar, ağız duşu ve çeşitli uyarlanabilir yardımcılarının kullanımı mekanik plak kontrolünün etkinliğini ve erişilebilirliğini artırabilir. Ayrıca diş hekimleri tarafından sağlanan bireyselleştirilmiş ağız hijyeni eğitimi ve gerektiğinde eğitilmiş bakıcıların desteği, yaşlı bireylerde etkili plak kontrolünün sürdürülmesine ve genel ağız sağlığının iyileştirilmesine yardımcı olmaktadır (Chan et al., 2021a).

Antiplak ajanların kullanımı

Klorheksidin glukonat, kalaylı florür, setilpiridinyum klorür ve uçucu yağlar gibi antiseptik bileşenler içeren kimyasal plak kontrol ajanları, mekanik ağız hijyeni uygulamalarını destekleyerek plak birikiminin azaltılmasına katkı sağlayabilir. Bu tür ajanlar özellikle bilişsel veya fonksiyonel kısıtlılıkları bulunan yaşlı bireylerde ağız hijyeninin sürdürülmesine yardımcı olan

tamamlayıcı bir yaklaşım olarak değerlendirilmektedir (Chapple et al., 2017).

Ağız çalkalama solüsyonları

Plak kontrolünde antiseptik ajanların uygulanmasını sağlayan yaygın ve pratik yöntemlerden biridir ve genellikle alkol, aromatik bileşenler ve yüzey aktif maddeler içeren formülasyonlardan oluşur. Bu ürünler bakterilerle elektrostatik ve hidrofobik etkileşimler yoluyla antimikrobiyal etki göstererek plak oluşumunu azaltmaya yardımcı olur. Ağız gargaraları genel olarak birinci ve ikinci nesil olarak sınıflandırılmakta olup, birinci nesil ürünlere uçucu yağlar içeren Listerine örnek verilebilirken, ikinci nesil ürünlere daha güçlü ve uzun süreli antimikrobiyal etki gösteren klorheksidin içeren preparatlar (örneğin Paroex/Peridex) örnek gösterilebilir (Newman, 1986).

Diş macunu

Plak kontrolünde kullanılan ajanlar olmakla birlikte, bu amaçla etkinliklerini değerlendiren çalışmalar sınırlıdır. Geleneksel diş macunları; aşındırıcı ve yüzey aktif bileşenler sayesinde plak, pelikül ve lekelerin uzaklaştırılmasına yardımcı olurken, ayrıca tat vericiler ve özellikle florür gibi terapötik ajanlar içerebilmektedir (Cummins & Creeth, 1992).

Jeller

Genellikle aşındırıcı veya nemlendirici bileşenler içeren berrak ve kıvamlı sulu sistemler olup, özellikle klorheksidinin interdental bölgelerde fırça, diş ipi veya aplikatörler aracılığıyla uygulanmasında taşıyıcı olarak kullanılabilir (Newman, 1986).

Subgingival irrigasyon

Orta ve derin periodontal ceplerde mekanik yöntemlerle tamamen uzaklaştırılamayan plak ve diş taşıını azaltarak mikrobiyal yükü konak savunmasının kontrol edebileceği düzeye indirmeyi amaçlayan yardımcı bir yaklaşımdır. Antiseptik veya antimikrobiyal solüsyonların irrigasyon iğnesi aracılığıyla doğrudan periodontal cep içine uygulanması, diş eti kenarı irrigasyonuna kıyasla cep içine daha etkili penetrasyon sağlayabilmektedir (Newman, 1986).

Pulsatif jet irrigasyonu

Kanül aracılığıyla periodontal cep içine düşük basınç altında antimikrobiyal ajanların iletilmesini sağlayan titreşimli bir irrigasyon tekniği olup, periodontal inflamasyonun azaltılmasına katkı sağlayabilmekle birlikte klinik etkinliğinin artırılması için uygun ajan konsantrasyonları ve alternatif solüsyonların kullanımını gerektirebilir (Newman, 1986).

Klorheksidin

Klorheksidin, katyonik bir bisbiguanid türevi olup ilk olarak 1975 yılında Birleşik Krallık'ta cilt yaraları için antiseptik bir krem olarak kullanılmaya başlanmıştır. Zamanla kullanım alanı genişlemiş ve farklı konsantrasyonlarda çok sayıda preparat geliştirilmiştir. Günümüzde özellikle diş hekimliğinde, plak kontrolünü destekleyen kimyasal bir ajan olarak yaygın biçimde kullanılmakta ve %0,2'lik çözeltiler gingivitis yönetiminde etkili bir ağız antiseptiği olarak tercih edilmektedir (Vyas et al., 2021).

Kalay florür

Kalay florür 1940'lardan bu yana ağız bakım ürünlerinde kullanılan bir bileşik olup jel, diş macunu ve ağız gargarası gibi çeşitli formülasyonlarda bulunmaktadır. Güçlü antimikrobiyal özellikleri sayesinde bakteriyel metabolizmayı etkileyerek bakteri adezyonunu ve asit üretimini azaltır; bu durum plak oluşumu, gingival inflamasyon ve ağız kokusuna neden olan mikroorganizmaların kontrolüne katkı sağlar. Ayrıca antienflamatuvar etkileri nedeniyle gingivitis ve gingival kanamanın azaltılmasında yararlı olabileceği bildirilmiştir (Van der Weijden et al., 2015). Bununla birlikte kötü tat ve dişlerde lekelenme en sık bildirilen yan etkiler arasında yer almakta olup, mevcut kanıtlar gingivitis tedavisinde kullanımını desteklemekle birlikte bu etkinliğin sınırlı düzeyde olduğunu göstermektedir (Chan et al., 2025).

Setilpiridinyum klorür

Setilpiridinyum klorür, monokationik kuaterner amonyum yapısına sahip bir bileşik olup antimikrobiyal özellikleri nedeniyle ağız gargaraları ve çeşitli ağız bakım ürünlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu ajan, bakteriyel hücre zarını bozarak hücresel bileşenlerin kaybına ve metabolik işlevlerin bozulmasına yol açarak plak oluşumu, gingivitis ve halitoz ile ilişkili mikroorganizmaların azaltılmasına katkı sağlar. Yan etkileri klorheksidine benzer olmakla birlikte genellikle daha hafif ve daha seyrek görülür ve reçetesiz kullanılan ağız bakım ürünlerinde iyi bir güvenlik profiline sahiptir (Van der Weijden et al., 2015).

Uçucu yağlar

Timol, okaliptol ve mentol gibi uçucu yağlar içeren ağız gargaraları, klorheksidin içeren gargaralara alternatif olarak kullanılabilen antiseptik ürünlerdir. Bu bileşikler, bakterilerin hücre

duvarı bütünlüğünü bozarak ve bakteriyel enzim faaliyetlerini inhibe ederek antimikrobiyal etki gösterir. Bu mekanizmalar sayesinde ağız içindeki mikrobiyal yükün azaltılmasına katkıda bulunurlar (Van der Weijden et al., 2015).

Yaşam tarzı değişiklikleri

Beslenme alışkanlıkları, sigara kullanımı, fiziksel aktivite düzeyi ve ağız hijyeni uygulamaları hem diş çürüğü hem de periodontal hastalıkların gelişimiyle yakından ilişkilidir. Bu nedenle dengeli beslenmenin teşvik edilmesi, düzenli fiziksel aktivitenin sürdürülmesi, etkili ağız hijyeni alışkanlıklarının kazandırılması ve sigara gibi zararlı alışkanlıkların azaltılması ağız sağlığının korunmasına ve hastalık riskinin azaltılmasına katkı sağlar (Chan et al., 2023).

Minimal İnvaziv Çürük Yönetimi

Geriatrik hastalarda mikroinvaziv ve minimal invaziv yaklaşımlar, artmış doku kırılabilirliği, kök yüzeyi çürüğü sıklığı ve eşlik eden sistemik durumlar nedeniyle, diş dokusunun mümkün olduğunca korunmasını hedefleyen tedavi stratejileridir. Mikroinvaziv yöntemler erken lezyonların örtülenmesi veya infiltrasyonunu içerirken, minimal invaziv operatif yaklaşımlar yalnızca enfekte dokunun seçici olarak uzaklaştırılmasına dayanır. Bu yönüyle söz konusu yaklaşımlar, sağlam diş dokusunun daha geniş ölçüde uzaklaştırıldığı konvansiyonel invaziv tedavilere göre geriatrik hastalarda daha koruyucu ve biyolojik olarak daha uygun bir seçenek sunmaktadır.

Non-Operative Yöntemler

Mine Remineralizasyonu

Çürük tedavisinin moleküler düzeydeki en erken aşaması, demineralizasyon ve remineralizasyon arasındaki dengenin yeniden

kurulmasına dayanır. Bu denge, florür ve kalsiyum-fosfat bileşikleri içeren ajanların kullanımı, mineral desteği sağlayan ürünler ve yeni geliştirilen tedavi yaklaşımları aracılığıyla sağlanmaktadır.

Florür

Florür, modern koruyucu diş hekimliğinin temel taşı olmaya devam etmektedir. Çürük sürecini üç ana mekanizma aracılığıyla etkiler (Chalmers, 2006):

Demineralizasyonu inhibe eder;

Florapatit oluşturarak mine direncini artırır ve remineralizasyonu uyarır;

Yüksek konsantrasyonlarda bakteriyel metabolizmayı inhibe eder.

Florür iyonlarının çürük oluşumunu önlemedeki ve mevcut lezyonların yönetimindeki etkisi güçlü bilimsel kanıtlarla desteklenmiş olup literatürde geniş biçimde rapor edilmiştir (Borges et al., 2011; Guzmán-Armstrong et al., 2010). Florür uygulamaları; çürük sürecinin kontrol altına alınması, erken dönem çürük lezyonlarının ilerlemesinin durdurulması ve remineralizasyon yoluyla geriletilmesi ile kavitasyon oluşmuş lezyonların stabilizasyonunun sağlanmasında etkili bir yaklaşım olarak kullanılmaktadır.

Florür, hem profesyonel uygulamalar hem de bireysel kullanım için farklı preparatlar halinde sunulmaktadır. Bu preparatlar arasında florür içeren diş macunları, ağız gargaraları, jeller, vernikler ve florürlü içme suyu yer almaktadır (Marinho et al., 1996). Özellikle topikal florür uygulamaları; uygulama kolaylığı, dozun kontrol edilebilir olması ve bireyin çürük aktivitesi ile risk düzeyine göre kişiselleştirilmiş bir koruyucu program oluşturulabilmesine olanak sağlaması nedeniyle önemli avantajlar sunmaktadır (Carounanidy & Sathyanarayanan, 2010). Düzenli

aralıklarla gerçekleştirilen florür verniği uygulamalarının çürük kontrolünde etkili olduğu bildirilmektedir. Üç ayda bir uygulanan florür verniğinin, özellikle azı ve küçük azı dişlerinin proksimal yüzeylerinde görülen çürük lezyonlarının ilerlemesini anlamlı düzeyde azalttığı gösterilmiştir (Moberg Sköld et al., 2005). Bununla birlikte, çürük progresyonundaki azalmanın en belirgin şekilde orta düzey çürük riskine sahip bireylerde ortaya çıktığı; buna karşın yüksek çürük aktivitesi bulunan hastalarda aynı düzeyde belirgin bir iyileşmenin gözlenmediği bildirilmektedir (Moberg Sköld et al., 2005).

Remineralizasyon—CPP—ACP (Kazein fosfopeptid- Amorf kalsiyumfosfat): CPP—ACP (kazein fosfopeptid—amorf kalsiyum fosfat), inek sütünden elde edilen kazeinden türetilmiş ve kalsiyum ile fosfat iyonlarını stabilize edebilen bir nanokomplekstir. Bakteri hücre duvarlarına ve diş yüzeylerine bağlanarak ağız ortamında tutunur. Asidik ataklar sırasında serbestleşen kalsiyum ve fosfat iyonları, diş yüzeyinde çökelerek remineralizasyonu destekler. Recaldent teknolojisi ile geliştirilen CPP—ACP; çiğneme sakızları, topikal kremler (Tooth Mousse / MI Paste) ve florür içeren MI Paste Plus gibi formlarda kullanılmaktadır. Klinik çalışmalar, CPP—ACP içeren sakızların erken mine lezyonlarının yönetiminde pratik ve etkili bir seçenek olabileceğini göstermektedir (Guzmán-Armstrong et al., 2010).

Recaldent içeren en bilinen ticari preparatlardan biri, hasta tarafından veya diş hekimi tarafından profesyonel olarak uygulanan bir diş kremi olan Tooth Mousse'tur. Tooth Mousse Plus, içine florür (%0,27) eklenmiş Recaldent'tir—CPP—ACPF (kazein fosfopeptid—amorf kalsiyum fosfat florür). Ayrıca CPP—ACP'nin cam iyonomer çimentolara dahil edildiğine dair raporlar da bulunmaktadır (Reynolds, 2008). Recaldent ile ilgili mevcut literatür, koronal çürüklerin ilerlemesini önemli ölçüde azalttığını, remineralizasyonu

artırdığını ve hatta lezyon gerilemesine yol açabileceğini göstermektedir (Borges et al., 2011; Cury & Tenuta, 2009).

Fonksiyonelleştirilmiş β -trikalsiyum fosfat (β -TCP) içeren ajanlar, florür formülasyonuna entegre edilmiş düşük dozda kalsiyum-fosfat kaynağı sağlayarak remineralizasyonu destekler. Fonksiyonel kaplama, kalsiyum ile florür arasındaki erken reaksiyonları önleyip iyon stabilitesini korur ve minerallerin diş yüzeyine kontrollü taşınmasını sağlar. Ancak florür ve benzeri remineralizanların koruyucu etkisinin genellikle minenin dış yaklaşık 30 μ m'lik tabakası ile sınırlı olduğu bildirilmektedir (Schmidlin et al., 2016). Bu nedenle gerçek anlamda rejeneratif bir yaklaşımın, yalnızca yüzeyde mineral birikimini sağlamakla kalmayıp çürük lezyonunun yüzey altı bölgesinde bulunan hidroksiapatit kristallerinin yeniden oluşumunu hedeflemesi gerekmektedir.

Biyomimetik Remineralizasyon — Kendiliğinden Düzenlenen Peptit P11-4

Diş minesini, çubuk benzeri prizmalar halinde düzenlenmiş yüksek derecede mineralize hidroksiapatit kristallerinden oluşur ve diş sürmesinden sonra doğal olarak yenilenemez. Bu nedenle biyomimetik remineralizasyon yaklaşımı, doğal mineralizasyon sürecini taklit eden sentetik veya biyolojik esinli moleküller kullanarak mine dokusunun yeniden mineralizasyonunu hedefler. Amelogenin türevleri, amino asitler, peptitler ve kalsiyum fosfat nanopartikülleri temelinde geliştirilen sistemler arasında Self-Assembling Peptide (SAP) özellikle umut verici bulunmuştur. Bu peptitler, biyolojik sinyallerle benzer kimyasal yapıları ve kolay sentezlenebilmeleri nedeniyle remineralizasyon ajanları arasında öne çıkmaktadır.

SAP'lerin oluşturduğu iskelet yapı, kalsiyum ve fosfat iyonlarının hedeflenen şekilde birikmesini sağlayarak mineral

çökmesini ve lezyon gövdesinde remineralizasyonu destekler (Kind et al., 2017). Bu durum mikrosertlikte artış ile mine yüzeyinin onarımını gösterir (Alkilzy et al., 2023; Kind et al., 2017). Biyomimetik yaklaşımın en önemli avantajı, geleneksel topikal ajanlardan farklı olarak de novo mineral oluşumunu destekleyebilmesidir. Schmidlin ve ark. (Schmidlin et al., 2016), P11-4 uygulamasının ardından 200 µm derinliğe kadar mine sertleşmesi bildirmiştir.

P11-4, Credientis (Windisch, İsviçre) tarafından geliştirilmiş olup Curodont Repair ve Curodont Protect ticari ürünleri şeklinde kullanılmaktadır. Curodont Repair monomerik peptit içerirken, Curodont Protect florür ve kalsiyum fosfat ile zenginleştirilmiş polimerik bir matrise sahiptir. Klinik uygulama izolasyon, %2 sodyum hipoklorit ile temizleme, %35 fosforik asitle aşındırma ve ardından peptidin uygulanıp difüzyon için bekletilmesi adımlarını içerir. Çalışmalar, P11-4'ün sitotoksosite veya immün reaksiyon oluşturmadığını ve güvenli bir profil sergilediğini göstermektedir (Schmidlin et al., 2016).

Gümüş Diamin Florür (SDF)

Aktif çürük lezyonlarını durdurmak amacıyla kullanılan topikal ve minimal invaziv bir ajandır ve özellikle restoratif tedaviye erişimin sınırlı olduğu popülasyonlarda önemli bir alternatif sunar (Horst et al., 2016). Sistematik derlemeler ve randomize kontrollü çalışmalar, SDF'nin diğer topikal florür uygulamalarına kıyasla yüksek etkinliğini desteklemekte ve toplum temelli çürük kontrol programlarında değerli bir rol oynadığını göstermektedir (Chibinski et al., 2017; Duangthip et al., 2016; Gao et al., 2016). Bununla birlikte, çalışmalar arasında etkinlik düzeyine ilişkin farklılıklar bulunmakta ve uzun dönem verilerin büyük ölçüde pediatrik popülasyonlardan elde edilmesi, yetişkinlerde kalıcı etkiler konusunda belirsizlik yaratmaktadır. Ayrıca, lezyonlarda oluşan

siyah renklenme özellikle ön bölgede estetik sorunlara yol açarak ebeveyn ve hasta kabulünü sınırlayabilmektedir.

Tüm bu sınırlamalara rağmen SDF, minimal invaziv diş hekimliğinde önemli bir araç olarak kabul edilmekte ve özellikle erken çocukluk çağı çürüğü olan veya işbirliği zayıf çocuklarda güçlü şekilde önerilmektedir (Chibinski et al., 2017; Duangthip et al., 2016; Gao et al., 2016). Bununla birlikte, yeniden uygulama aralıkları, maliyet etkinliği ve kapsamlı çürük yönetimi protokollerine entegrasyonu gibi konularda belirsizlikler sürmektedir. Bazı restoratif diş hekimliği kaynakları estetik dezavantajlar ve restoratif alternatiflerin varlığı nedeniyle rutin kullanımını önermese de, SDF yüksek çürük riski taşıyan, kök çürüğü bulunan veya medikal açıdan riskli yetişkinlerde yararlı olabilir (Horst et al., 2016). Gelecekteki araştırmaların, estetik kabul edilebilirliği artıran formülasyonlar geliştirilmesi, hasta tarafından bildirilen sonuçların değerlendirilmesi ve uzun dönem klinik etkinlik ile maliyet etkinliğinin netleştirilmesine odaklanması gerekmektedir (Chibinski et al., 2017; Duangthip et al., 2016; Gao et al., 2016).

Mikro-invaziv Teknikler

Pit ve fissürlerin örtülenmesi ile aproksimal ve düz yüzeylerde rezin infiltrasyonu, non-operatif çürük yönetimi yöntemleridir. Yapılan tek girişim; mineyi güçlendiren ve mikroorganizmalara karşı bir bariyer oluşturan düşük viskoziteli bir rezinin asitle pürüzlendirme ve adeziv bağlama işlemiyle uygulanmasıdır.

Rezin İnfiltrasyonu

Rezin infiltrasyonu, 2009'da Charité Üniversitesi (Berlin) araştırma grubu tarafından geliştirilen ve Icon ürünüyle klinik kullanıma giren mikroinvaziv, non-operatif bir çürük tedavi yöntemidir. Koruyucu yaklaşımlar ile minimal invaziv restoratif tedavi arasında bir köprü oluşturur (Kielbassa et al., 2009).

Yöntemde tek girişim asit pürüzlendirme olup, düşük viskoziteli ve yüksek penetrasyon özellikli bir rezin (infiltrant) lezyon içine infiltre edilir (Ekstrand et al., 2013). Fissür örtücüler yüzeyde difüzyon bariyeri oluştururken, rezin infiltrasyonu lezyon gövdesi içinde bariyer oluşturarak lezyonu mekanik olarak stabilize eder (Meyer-Lueckel & Paris, 2008). Başlıca endikasyonlar; mine lezyonlarının konservatif tedavisi (E1–E2) ve dentinin dış üçlüsüne (D1) kadar uzanan erken lezyonlardır. Özellikle proksimal ve düz yüzey çürüklerinde kullanılır. İşlem yaklaşık 15 dakika sürer ve temel aşamalar; temizleme-izolasyon, %15 HCl ile pürüzlendirme, kurutma (etanol), infiltrant uygulaması ve ışıkla polimerizasyon ile polisajdır. Başlangıç çürüklerinde lezyon gövdesi mikroporöz yapıdadır ve asit difüzyonuna izin verir. Yüzey tabakası ise nispeten sağlamdır ve rezin penetrasyonunu sınırlar (Ekstrand et al., 2013). Bu nedenle hidroklorik asitle pürüzlendirme, yüzey tabakasını uzaklaştırarak infiltrasyonun etkinliğini artırır (Meyer-Lueckel et al., 2007). Düşük viskoziteli özel infiltrantlar mikroporları doldurarak lezyonu asit saldırılarına karşı izole eder ve demineralize mineyi güçlendirir. İnfilte edilen lezyonların ilerlemesi, tedavi edilmeyenlere göre belirgin şekilde daha yavaştır (Meyer-Lueckel & Paris, 2008).

Restoratif Tedavi Seçenekleri

Yaşlı bireylerde restoratif tedavi yaklaşımları, yaşlanmaya bağlı olarak sert ve yumuşak dokularda meydana gelen biyolojik değişiklikler, artmış kök yüzeyi çürüğü insidansı, yüksek çürük riski ve sıklıkla eşlik eden sistemik hastalıklar ile kullanılan ilaçların oluşturduğu oral etkiler dikkate alınarak planlanmalıdır. Bu bağlamda tedavi stratejileri; minimal invaziv diş hekimliği ilkeleri doğrultusunda kalan diş dokusunun korunmasını, restorasyonların biyoyumluluğunu ve uzun dönem klinik başarısını destekleyecek materyal ve tekniklerin seçimini gerektirir.

Yaşlı bireylerde kök yüzeyi çürüklerinin tedavisinde, nem toleransı ve florür salımı avantajları nedeniyle özellikle yüksek viskoziteli cam iyonomer simanlar tercih edilirken, estetik ve aşınma direncinin önemli olduğu durumlarda adeziv sistemlerle birlikte kullanılan akışkan veya hibrit kompozit rezinler de uygun klinik seçenekler arasında yer almaktadır(Huang et al., 2021).

Cam iyonomer simanlar

Diş sert dokusundaki kalsiyuma kimyasal olarak bağlanabilmeleri, florür salıp yeniden florürle yüklenebilmeleri, diş benzer fiziksel özellikler göstermeleri ve biyouyumlu olmaları nedeniyle avantajlıdır. Ancak aşınma ve kırılma dirençlerinin düşük olması, erken dönemde neme duyarlı olmaları, mikrosızıntı riski ve estetiklerinin sınırlı olması önemli dezavantajlarıdır. Bu nedenle mekanik özelliklerini geliştirmeye yönelik çalışmalar sürmektedir (Sidhu, 2011).

Rezin modifiye cam iyonomer simanlar

Işıkla aktive olan polimerizasyon ve eş zamanlı devam eden asit-baz reaksiyonu sayesinde daha iyi mekanik özellikler gösterir; ancak ışıkla sertleştikleri için genellikle 2 mm'lik tabakalar halinde uygulanmaları gerekir. Geleneksel cam iyonomerlere göre çalışma süresinin kontrol edilebilmesi, daha iyi aşınma direnci, dentine daha stabil adezyon ve daha iyi estetik gibi avantajlar sunarlar. Ayrıca florür salımı, reşarj olabilme, biyouyumluluk ve diş dokularına kimyasal bağlanma gibi cam iyonomerlerin temel olumlu özelliklerini korurlar; ancak florür salımları geleneksel ve yüksek viskoziteli cam iyonomerlere göre daha düşüktür (Kutuk et al., 2019).

Cam hibrit restoratif sistemler

Cam iyonomer matriksini güçlendirmek amacıyla daha reaktif ve ince cam partiküllerinin eklenmesiyle geliştirilmiştir. Bu

sayede matriks yapısı güçlenmiş; elastisite modülü, bükülme dayanıklılığı, aşınma direnci ve florür salımı iyileştirilmiştir. Adeziv gerektirmeden diş dokusuna kimyasal bağlanabilmeleri, düşük nem hassasiyeti, tek tabaka halinde uygulanabilmeleri ve geliştirilmiş estetik özellikleri bu materyallerin önemli avantajlarıdır. EQUIA Forte ve EQUIA Forte HT bu gruba örnek gösterilebilir (Gurgan et al., 2020).

Giomerler: Cam iyonomerlerin florür salımı özelliğini rezin esaslı materyallere kazandırmak amacıyla geliştirilmiş ve pre-reaktif cam partikülleri içeren restoratif materyallerdir. Işıkla polimerize olurlar ve diş dokusuna bağlanmak için adeziv sistem gerektirirler. Florür salımı ve yeniden florürle yüklenebilme özellikleri sayesinde çürük önleyici etki gösterebilirler; ayrıca plak oluşumunu ve mineral kaybını azaltmaya katkı sağlayabilirler. Bununla birlikte, cam iyonomerlerden daha düşük iyon salımı yaparlar ve uzun dönemde estetik görünümünde bozulma görülebilir(Gonulol et al., 2015).

Hibrit Kompozitler

Farklı boyutlardaki doldurucu partiküllerinin bir arada kullanılmasıyla geliştirilmiş, estetik özellikler ile mekanik dayanım arasında dengeli performans sunan rezin esaslı restoratif materyallerdir. Bu kompozitler, akışkan kompozitlere göre daha yüksek doldurucu içeriğine sahip olduklarından basma ve eğilme dayanımı, aşınma direnci, yüzey sertliği ve uzun dönem klinik stabilite açısından daha avantajlıdır. Ayrıca cilalanabilirlikleri ve kabul edilebilir estetik performansları sayesinde hem anterior hem posterior bölgede geniş bir endikasyon alanına sahiptirler. Hibrit kompozitlerin viskoziteleri akışkan kompozitlere göre daha yüksek olduğu için kavite duvarlarına adaptasyonları bazı klinik durumlarda daha dikkatli yerleştirme tekniği gerektirebilir; ancak buna karşılık fonksiyonel yük taşıyan restorasyonlarda daha güvenilir sonuçlar sağlayabilirler. Bu nedenle hibrit kompozitler, mekanik dayanım ile estetik gereksinimin birlikte ön planda olduğu direkt

restorasyonlarda sıklıkla “üniversal” materyaller arasında değerlendirilmektedir (Cho et al., 2022).

Akışkan Kompozitler

Düşük viskoziteleri sayesinde kavite duvarlarına kolay adapte olabilen, özellikle küçük kavitelere, servikal lezyonlarda, pit ve fissür örtücüsü olarak, liner tabaka uygulamalarında ve minimal invaziv restoratif girişimlerde tercih edilen rezin esaslı materyallerdir. Bu materyallerin en önemli avantajları yüksek akışkanlık, kullanım kolaylığı, iyi yüzey adaptasyonu ve klinik uygulamada pratiklik sağlamalarıdır. Bununla birlikte, geleneksel akışkan kompozitlerde doldurucu oranının daha düşük olması; elastik modül, yüzey sertliği, aşınma direnci ve kırılma dayanımı gibi mekanik özelliklerin hibrit veya konvansiyonel kompozitlere kıyasla daha sınırlı olmasına yol açabilmektedir. Bu nedenle özellikle yüksek oklüzal stres taşıyan geniş posterior restorasyonlarda tek başına kullanım yerine, uygun endikasyonlarda veya destekleyici materyal olarak kullanımları daha uygundur (Baroudi & Rodrigues, 2015). Son yıllarda geliştirilen yüksek dolduruculu akışkan kompozitlerde ise mekanik ve optik özelliklerde belirgin iyileşmeler bildirilmiş olsa da, materyal seçiminin halen kavitenin yeri, büyüklüğü ve fonksiyonel yüklenme durumuna göre yapılması önerilmektedir (Tzimas et al., 2025).

Geriatric Hastalarda Kullanılabilecek Güncel Restoratif Materyaller

Yaşlı hastalarda restoratif tedavi gereksinimi, kök yüzeyi çürüğünün daha sık görülmesi, gingival çekilme, ilaç kullanımına bağlı kserostomi ve ağız hijyeninin sürdürülmesindeki güçlükler nedeniyle daha karmaşık hale gelmektedir (Lipsky et al., 2024). Bu nedenle, yalnızca kaviteyi dolduran değil aynı zamanda çevre sert dokularla terapötik etkileşim kurabilen biyoaktif materyaller, geriatric diş hekimliğinde giderek daha fazla önem kazanmaktadır

(Huang et al., 2021). Biyoaktif materyaller; florür, kalsiyum ve fosfat gibi iyonların salımı yoluyla demineralizasyonun sınırlandırılmasına, remineralizasyonun desteklenmesine ve bazı materyallerde antibakteriyel etkinin artırılmasına katkı sağlayabilmektedir (Zhang et al., 2023). Bununla birlikte, güncel yaklaşımda bir restoratif materyalin “biyoaktif” olarak tanımlanabilmesi için yalnızca iyon salımı yeterli görülmemekte; etkinin lokal, hedefe yönelik, klinik olarak yararlı ve materyalin temel restoratif işleviyle uyumlu olması gerektiği vurgulanmaktadır (Schmalz et al., 2023). Bu çerçevede cam iyonomer esaslı materyaller ve diğer iyon salabilen sistemler, özellikle kök yüzeyi lezyonlarının yönetimi ve yüksek çürük riskine sahip yaşlı bireylerde minimal invaziv tedavi yaklaşımlarının bir parçası olarak umut verici seçenekler sunmaktadır; ancak klinik kullanımda materyal seçimi, lezyonun yeri, nem kontrolü, mekanik gereksinimler ve hastanın bireysel risk profili ile birlikte değerlendirilmelidir (Huang et al., 2021).

Smart materyaller, restoratif diş hekimliğinde çevresel uyaranlara yanıt verebilen ileri biyomateryaller arasında yer almaktadır. Restoratif materyal olarak kullanılan bazı rezin kompozitler, kalan diş dokusunu destekleyerek ultra konservatif kavite preparasyonlarına olanak sağlamaları nedeniyle “smart” materyaller olarak tanımlanmaktadır (Özdemir & Çelik).

Smart kompozit rezinler; stres, sıcaklık, nem, pH, elektriksel alan ve/veya manyetik alan gibi dış uyaranlara bağlı olarak fiziksel, kimyasal veya biyolojik özelliklerini kontrollü biçimde değiştirebilen materyallerdir. Bu materyallerin bir kısmı biyomimetik özellik göstererek mine ve dentin gibi doğal diş dokularının davranışlarını taklit edebilmektedir. Piezoelektrik özellik, mekanik stres altında elektriksel yanıt oluşmasını sağlarken; şekil hafızalı polimerler, sıcaklık değişimlerine bağlı olarak yapısal dönüşüm gösterebilmektedir. Benzer şekilde termokromik ve

fotokromik özellikler, sırasıyla sıcaklık ve ışık değişimlerine yanıt olarak renk değişimi oluşturabilmektedir. Ayrıca bu materyallerin pH değişimlerine, biyofilm oluşumuna ve manyetik alana duyarlı davranış gösterebilmesi, oral çevre ile dinamik etkileşim kurmalarına olanak tanımaktadır (S. R. Jefferies, 2014).

Smart cam iyonmer simanlar, termal dalgalanmalara yanıt olarak genişleme ve daralma gösterebilen, ayrıca florür salımı ve yeniden florürle şarj olabilme kapasitesine sahip materyallerdir. Rezin modifiye cam iyonmer simanlar ile önceden reaksiyona sokulmuş cam parçacıklarının rezin matrisi içine dahil edildiği önceden doldurulmuş dolgu teknolojisine sahip giomerler bu grupta değerlendirilmektedir (Gonulol et al., 2015).

Smart bonding sistemleri, MDPB (metakrililoksidesil pirimidinyum bromid) ve/veya DMADDM içeren, özellikle streptokoklara karşı bakterisid etki gösterebilen adeziv materyallerdir. Protect Bond (Kuraray, Tokyo, Japonya) bu gruba örnek olarak verilmektedir (S. Jefferies, 2014).

Smart pit ve fissür örtücüler arasında yer alan amorf kalsiyum fosfat (ACP) içeren materyaller, remineralizasyon potansiyeli taşıyan antikaryojenik ajanlardır. Bu materyaller asidik ortamda lezyon içinde kalsiyum ve fosfat iyonlarının düzeyini artırarak apatit oluşumunu desteklemekte ve hidroksiapatit kristallerinin yeniden oluşumuna katkı sağlamaktadır. Aegis pit ve fissür örtücü bu grupta yer alan örneklerden biridir (Sauro et al., 2019).

Activa, Activa Liner, Re-Gen Flowable ve Bulk-fill gibi materyaller, mineral iyon salımı yapabilmeleri nedeniyle “minerallerle zenginleştirilmiş rezin kompozitler” olarak tanımlanmaktadır (Bhadra et al., 2019). Bu materyallerin yapısında, poliakrilik asit üretan dimetakrilat esaslı bir sıvı faz ile florealüminasilikat esaslı bir toz faz yer almaktadır. Bisfenol-A ve Bis-GMA içermemeleri, onları

geleneksel kompozitlerden ayıran başlıca özelliklerden biridir. Sertleşme mekanizmaları yalnızca rezin polimerizasyonuna dayanmaz; asit-baz reaksiyonu ile polimerizasyon süreci birlikte ilerler. Karıştırma sonrasında kemopolimerizasyon devreye girerken, reaksiyon ışıkla polimerizasyon aşamasıyla tamamlanır. Bu materyaller ağız ortamında su ve iyon alışverişine katılarak florür, kalsiyum ve fosfat iyonlarını serbest bırakabilmekte, ayrıca florürle yeniden yüklenebilme özelliği gösterebilmektedir. Florür salım düzeylerinin rezin modifiye ve yüksek viskoziteli cam iyonomer simanlardan daha düşük, buna karşın giomer ve kompomerlere yakın olduğu bildirilmektedir. Mekanik açıdan değerlendirildiğinde ise aşınma dirençlerinin hibrit kompozitlere benzediği ve bazı cam iyonomer esaslı materyallerden daha yüksek olduğu ifade edilmektedir. Bununla birlikte, klinik kullanımlarının görece yeni olması nedeniyle uzun dönem sonuçlara ilişkin kanıtlar henüz yeterli değildir(Bhadra et al., 2019).

Surefil One, self-adeziv hibrit rezin kompozit grubunda yer alan bir materyaldir. Toz kısmında rezin matrikse bağlanmış silanize cam doldurucular ve inert partiküller bulunurken, sıvı kısmında yüksek molekül ağırlıklı poliakrilik asit ile çift polimerize olabilir uçlara sahip BADEP monomeri yer almaktadır (Rathke et al., 2022). Ayrıca formülasyonunda su ile birlikte hem kimyasal hem de ışıkla polimerizasyonu başlatan bileşenler bulunmaktadır. Kısmen su içeren yapısı, oral ortamla iyon alışverişini mümkün kılmakta ve özellikle florür, kalsiyum ile alüminyum iyonlarının açığa çıkmasına katkı sağlamaktadır. Bu nedenle Surefil One, rezin modifiye cam iyonomer simanların geliştirilmiş bir devamı olarak değerlendirilmektedir. Sertleşme sürecinde, fonksiyonel poliakrilik asit ile floroalüminasilikat doldurucular arasındaki etkileşim iyon salımını başlatmakta; buna eşlik eden asit-baz reaksiyonu ve rezin polimerizasyonu materyalin nihai yapısını oluşturmaktadır (Rathke et al., 2022).

Alkasit rezin kompozitler ise hem reaktif hem de reaktif olmayan silanize doldurucular içeren, ayrıca kimyasal ve ışıkla polimerizasyon sistemleriyle sertleşebilen materyallerdir (Vallittu et al., 2018). Bu grupta klasik cam iyonomer simanlardaki anlamda bir asit-baz reaksiyonu bulunmamakta, materyalin temel işleyişi suyla etkileşime giren alkali cam fazına dayanmaktadır. Karıştırılmalarının ardından önce kemopolimerizasyon başlamakta, daha sonra fotopolimerizasyon ile sertleşme tamamlanmaktadır. Yapılarındaki doldurucu kombinasyonu nedeniyle kompozit, giomer ve kompomerlerin bazı özelliklerini birlikte taşıdıkları kabul edilmektedir. Su emilimine bağlı olarak florür ve çeşitli iyonları ortama verebilmeleri, bu materyallerin biyolojik açıdan dikkat çekici yönlerinden biridir. Ayrıca Activa BioActive'e kıyasla daha yüksek iyon salımı gösterebildikleri, sert diş dokularında remineralizasyonu destekleyebildikleri ve yüzeylerinde apatit oluşumuna katkıda bulunabildikleri bildirilmiştir (Schmalz et al., 2023; Vallittu et al., 2018) Bu özellikler nedeniyle alkasit materyaller, biyoaktif özellik gösteren restoratif materyaller arasında değerlendirilmektedir. Bu grup klinikte Cention N ve Cention Forte isimleriyle kullanılmaktadır (Schmalz et al., 2023).

Nanoteknoloji, biyomühendislik ve materyal bilimindeki ilerlemeler, biyoaktif materyallerin özellikle geriatric hastalarda daha etkili ve bireyselleştirilmiş biçimde kullanılmasına olanak sağlayacaktır. Yaşlı bireylerde kök yüzeyi çürüğü, tükürük akışında azalma, çoklu ilaç kullanımı, el becerilerinde yetersizlik ve restorasyonların uzun dönem takibindeki güçlükler gibi faktörler göz önüne alındığında, florür salabilen, remineralizasyonu destekleyen, antibakteriyel özellik gösterebilen ve biyouyumlu materyaller klinik açıdan önemli avantajlar sunmaktadır.

Bakım Bağımlı Yaşlı Hastalarda Çürük Yönetimi

Bakım bağımlı yaşlı hastalarda çürük yönetimi, bireyin fonksiyonel durumu, ağız hijyenini sürdürülebilirlik kapasitesi ve bakım ortamının özellikleri dikkate alınarak koruyucu ve minimal invaziv bir yaklaşımla planlanmalıdır (Uhlen-Strand et al., 2023; Weening-Verbree, van der Schans, et al., 2025). Huzurevlerinde yaşayan yaşlılarda yetersiz ağız hijyeni, plak birikimi, kök yüzeyi çürükleri ve protezle ilişkili sorunlar daha sık görüldüğünden, günlük mekanik plak kontrolü, florür desteği, düzenli ağız muayenesi ve kurum personelinin eğitimi temel bileşenler olarak kabul edilmektedir (Weening-Verbree, van der Schans, et al., 2025). Evde bakım hastalarında ise mobilite kısıtlılığı, çoklu ilaç kullanımı, ağız kuruluğu ve diş hekimine erişim güçlüğü çürük riskini artırmakta; bu nedenle ev ortamında sürdürülebilir, basit ve düzenli koruyucu bakım protokollerinin uygulanması büyük önem taşımaktadır (Uhlen-Strand et al., 2023). Bu süreçte bakım verenler, günlük ağız bakımının sürdürülmesi, erken lezyonların fark edilmesi, protez hijyeninin sağlanması ve hastanın profesyonel dental bakıma yönlendirilmesi açısından merkezi bir role sahip olduğundan, bakım veren eğitimi bakım bağımlı yaşlılarda çürük yönetiminin ayrılmaz bir parçası olarak değerlendirilmelidir (Zenthöfer et al., 2016).

Multidisipliner Yaklaşım

Yaşlı hastalarda çürük yönetimi, yalnızca restoratif işlemlerle sınırlı olmayan; sistemik hastalıklar, çoklu ilaç kullanımı, ağız kuruluğu, beslenme durumu, fonksiyonel bağımlılık ve günlük bakım kapasitesini birlikte değerlendirmeyi gerektiren multidisipliner bir yaklaşımla ele alınmalıdır (Wongiam et al., 2025). Diş hekimi, çürük riskinin belirlenmesi, koruyucu ve minimal invaziv tedavilerin planlanması, düzenli izlem ve bireye özgü ağız hijyeni önerilerinin oluşturulmasında temel sorumluluğu üstlenir

(Leung & Chu, 2022). Hekim ise eşlik eden kronik hastalıkların kontrolü, ilaçlara bağlı kserostomi ve genel sağlık durumundaki değişimlerin değerlendirilmesi yoluyla ağız sağlığını etkileyen sistemik belirleyicilerin yönetimine katkı sağlar. Bakım verenlerin günlük ağız hijyeninin sürdürülmesi, protez temizliği, erken belirti ve semptomların fark edilmesi ve profesyonel bakıma yönlendirme konularındaki rolleri, özellikle bakım bağımlı ve kurumsal bakım altındaki yaşlılarda tedavi başarısının sürekliliği açısından kritik önemdedir (Weening-Verbree, Douma, et al., 2025). Diyetisyen de sık fermente karbonhidrat tüketimi, yetersiz protein ve mikronutrient alımı, yutma güçlüğü ve oral frailty ile ilişkili beslenme örüntülerini düzenleyerek hem çürük riskinin azaltılmasına hem de ağız ve genel sağlığın desteklenmesine katkıda bulunur (Chan et al., 2023). Bu nedenle ileri yaşta başarılı çürük yönetimi, her disiplinin kendi katkısını hasta merkezli bir bakım planı içinde bütünleştirdiği iş birliğine dayalı bir model ile daha etkili biçimde gerçekleştirilebilir (Kaye et al., 2025).

Sonuç

Yaşlı bireylerde diş çürüğü ve özellikle kök yüzeyi çürükleri, yaşlanmaya bağlı biyolojik değişiklikler, sistemik hastalıklar, polifarmasi, tükürük fonksiyonlarındaki azalma ve davranışsal faktörlerin bir araya gelmesiyle ortaya çıkan kompleks ve çok boyutlu bir sağlık sorunu olarak değerlendirilmektedir. Bu nedenle geriatrik popülasyonda çürük yönetimi yalnızca restoratif tedaviye odaklanmamalı; kapsamlı bir çürük risk değerlendirmesi, koruyucu stratejiler, remineralizasyon temelli yaklaşımlar ve minimal invaziv tedavi yöntemlerini içeren bütüncül bir klinik yaklaşım benimsenmelidir. Özellikle florür uygulamaları, biyomimetik remineralizasyon ajanları ve mikroinvaziv tedavi teknikleri, yaşlı bireylerde diş dokusunun korunmasını hedefleyen çağdaş tedavi yaklaşımlarının temelini oluşturmaktadır. Bununla birlikte, yaşlı bireylerde ağız sağlığının sürdürülebilir şekilde korunabilmesi için

düzenli diş hekimi kontrolleri, bireyselleştirilmiş ağız hijyeni eğitimi ve multidisipliner sağlık hizmetlerinin entegrasyonu büyük önem taşımaktadır. Bu doğrultuda geliştirilecek koruyucu ve tedavi edici yaklaşımlar, geriatrik popülasyonda çürük yükünün azaltılmasına ve yaşam kalitesinin artırılmasına önemli katkılar sağlayacaktır.

Kaynakça

- Aksoy, B. (2022). *Yaşlı Bireylerin Ağız ve Diş Sağlığı Hizmetlerine Yönelik Tedavi İhtiyaçları İle Maliyet Yükleri: Hastane Bilgi Yönetim Sistemi Kapsamında Bir Araştırma* Marmara Üniversitesi (Turkey)].
- Al-Nasser, L., & Lamster, I. B. (2020). Prevention and management of periodontal diseases and dental caries in the older adults. *Periodontology 2000*, 84(1), 69-83.
- Alkilzy, M., Qadri, G., Splieth, C. H., & Santamaría, R. M. (2023). Biomimetic enamel regeneration using self-assembling peptide P11-4. *Biomimetics*, 8(3), 290.
- Almasvandi, Y., Ziaei, N., Kazeminia, M., & Abbasi, P. (2025). Global prevalence of dental caries in the older people, 1991 to 2024: a systematic review and meta-analysis. *The Saudi Dental Journal*, 37(7), 31. <https://doi.org/10.1007/s44445-025-00039-6>
- Alyamani, S., Mira, R., & Sabbah, W. (2025). Association Between Multimorbidity and Root Caries Among Older American Adults. *Dentistry Journal*, 13(6), 232.
- Arakelyan, M. G., Polyakova, M. A., Babina, K. S., Novozhilova, N. E., Margaryan, E. G., Doroshina, V. Y., Arzukanyan, A. V., & Makeeva, M. K. (2019). Qualitative and quantitative evaluation of the efficiency of the application of foams with false xerostomia. *Journal of International Society of Preventive and Community Dentistry*, 9(4), 403-408.
- Aydoğan, Ü., Onar, T., & Nerkiz, P. (2011). YAŞLILIKTA GÖRÜLEN FİZYOLOJİK DEĞİŞİKLİKLER. *GeroFam*, 2(3).
- Baroudi, K., & Rodrigues, J. C. (2015). Flowable resin composites: a systematic review and clinical considerations. *Journal of clinical and diagnostic research: JCDR*, 9(6), ZE18.
- Belibasakis, G. N. (2018). Microbiological changes of the ageing oral cavity. *Archives of Oral Biology*, 96, 230-232.
- Bhadra, D., Shah, N. C., Rao, A. S., Dedania, M. S., & Bajpai, N. (2019). A 1-year comparative evaluation of clinical performance of nanohybrid composite with Activa™

- bioactive composite in Class II carious lesion: A randomized control study. *Journal of Conservative Dentistry and Endodontics*, 22(1), 92-96.
- Bhatia, S., Gupta, V. K., Kumar, S., Mishra, G., Malhotra, S., Arif, K., Khot, A. P., Rajput, A., & Mahajan, A. (2025). Artificial intelligence based techniques for caries risk prediction and assessment: A scoping review. *Journal of Oral Biology and Craniofacial Research*, 15(6), 1497-1507.
- Bianco, A., Mazzea, S., Fortunato, L., Giudice, A., Papadopoli, R., Nobile, C. G. A., & Pavia, M. (2021). Oral health status and the impact on oral health-related quality of life among the institutionalized elderly population: A cross-sectional study in an area of southern italy. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(4), 2175.
- Borges, B. C. D., de Souza Borges, J., de Araujo, L. S. N., Machado, C. T., Dos Santos, A. J. S., & de Assunção Pinheiro, I. V. (2011). Update on nonsurgical, ultraconservative approaches to treat effectively non-cavitated caries lesions in permanent teeth. *European journal of dentistry*, 5(02), 229-236.
- Buck, D., Seong, J., Daud, A., Davies, M., Newcombe, R., & West, N. X. (2024). A randomised controlled trial to evaluate the effectiveness of personalised oral hygiene advice delivered via video technology. *Journal of Dentistry*, 149, 105243.
- Bushardt, R. L., Massey, E. B., Simpson, T. W., Ariail, J. C., & Simpson, K. N. (2008). Polypharmacy: misleading, but manageable. *Clinical interventions in aging*, 3(2), 383-389.
- Cai, J., Palamara, J., Manton, D., & Burrow, M. (2018). Status and progress of treatment methods for root caries in the last decade: a literature review. *Australian Dental Journal*, 63(1), 34-54.
- Carounanidy, U., & Sathyanarayanan, R. (2010). Dental caries: A complete changeover, PART III: Changeover in the treatment decisions and treatments. *Journal of Conservative Dentistry and Endodontics*, 13(4), 209-217.

- Chalmers, J. M. (2006). Minimal intervention dentistry: part 1. Strategies for addressing the new caries challenge in older patients. *Journal of the Canadian Dental Association*, 72(5).
- Chan, A. K. Y., Tamrakar, M., Jiang, C. M., Lo, E. C. M., Leung, K. C. M., & Chu, C.-H. (2021a). Common medical and dental problems of older adults: a narrative review. *Geriatrics*, 6(3), 76.
- Chan, A. K. Y., Tamrakar, M., Jiang, C. M., Lo, E. C. M., Leung, K. C. M., & Chu, C. H. (2021b). A systematic review on caries status of older adults. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(20), 10662.
- Chan, A. K. Y., Tsang, Y.-C., Chu, S., & Chu, C.-H. (2025). Comprehensive strategies for preventive periodontal care in older adults. *Geriatrics*, 10(3), 72.
- Chan, A. K. Y., Tsang, Y. C., Jiang, C. M., Leung, K. C. M., Lo, E. C. M., & Chu, C. H. (2023). Diet, Nutrition, and Oral Health in Older Adults: A Review of the Literature. *Dentistry Journal*, 11(9), 222. <https://www.mdpi.com/2304-6767/11/9/222>
- Chapple, I. L., Bouchard, P., Cagetti, M. G., Campus, G., Carra, M. C., Cocco, F., Nibali, L., Hujoel, P., Laine, M. L., & Lingström, P. (2017). Interaction of lifestyle, behaviour or systemic diseases with dental caries and periodontal diseases: consensus report of group 2 of the joint EFP/ORCA workshop on the boundaries between caries and periodontal diseases. *Journal of clinical periodontology*, 44, S39-S51.
- Chau, R. C. W., Thu, K. M., Chaurasia, A., Hsung, R. T. C., & Lam, W. Y.-H. (2023). A systematic review of the use of mHealth in oral health education among older adults. *Dentistry Journal*, 11(8), 189.
- Chibinski, A. C., Wambier, L. M., Feltrin, J., Loguercio, A. D., Wambier, D. S., & Reis, A. (2017). Silver diamine fluoride has efficacy in controlling caries progression in primary teeth: a systematic review and meta-analysis. *Caries research*, 51(5), 527-541.

- Cho, K., Rajan, G., Farrar, P., Prentice, L., & Prusty, B. G. (2022). Dental resin composites: A review on materials to product realizations. *Composites Part B: Engineering*, 230, 109495.
- Cummins, D., & Creeth, J. (1992). Delivery of antiplaque agents from dentifrices, gels, and mouthwashes. *Journal of dental research*, 71(7), 1439-1449.
- Cury, J. A., & Tenuta, L. M. A. (2009). Enamel remineralization: controlling the caries disease or treating early caries lesions? *Brazilian oral research*, 23(suppl 1), 23-30.
- Curzon, M., & Preston, A. (2004). Risk groups: nursing bottle caries/caries in the elderly. *Caries research*, 38, 24-33.
- Do, C., & Nguyenphu, T. (2017). A case of drug-induced xerostomia and a literature review of the management options. *Dentistry*, 7(443), 2161-1122.1000443.
- Duangthip, D., Chu, C., & Lo, E. (2016). A randomized clinical trial on arresting dentine caries in preschool children by topical fluorides—18 month results. *Journal of dentistry*, 44, 57-63.
- Ebersole, J. L., Dawson, D. A., Emecen Huja, P., Pandruvada, S., Basu, A., Nguyen, L., Zhang, Y., & Gonzalez, O. A. (2018). Age and Periodontal Health—Immunological View. *Current Oral Health Reports*, 5(4), 229-241.
<https://doi.org/10.1007/s40496-018-0202-2>
- Ekstrand, K., Martignon, S., Paris, S., & Meyer-Lueckel, H. (2013). Caries management—Science and clinical practice. In: Thieme.
- Featherstone, J. (2004). The continuum of dental caries—evidence for a dynamic disease process. *Journal of dental research*, 83(1_suppl), 39-42.
- Fjeld, K. G., Eide, H., Mowe, M., Sandvik, L., & Willumsen, T. (2018). A 1-year follow-up of a randomized clinical trial with focus on manual and electric toothbrushes' effect on dental hygiene in nursing homes. *Acta Odontologica Scandinavica*, 76(4), 257-261.
- Gandini, S., Botteri, E., Iodice, S., Boniol, M., Lowenfels, A. B., Maisonneuve, P., & Boyle, P. (2008). Tobacco smoking and

- cancer: a meta-analysis. *International journal of cancer*, 122(1), 155-164.
- Gao, S. S., Zhang, S., Mei, M. L., Lo, E. C.-M., & Chu, C.-H. (2016). Caries remineralisation and arresting effect in children by professionally applied fluoride treatment—a systematic review. *BMC oral health*, 16(1), 12.
- Gati, D., & Vieira, A. R. (2011). Elderly at greater risk for root caries: a look at the multifactorial risks with emphasis on genetics susceptibility. *International journal of dentistry*, 2011(1), 647168.
- Gavriilidou, N. N., & Belibasakis, G. N. (2019). Root caries: the intersection between periodontal disease and dental caries in the course of ageing. *British Dental Journal*, 227(12), 1063-1067.
- Gonulol, N., Ozer, S., & Sen Tunc, E. (2015). Water sorption, solubility, and color stability of giomer restoratives. *Journal of esthetic and restorative dentistry*, 27(5), 300-306.
- Gurgan, S., Kutuk, Z., Ozturk, C., Soleimani, R., & Cakir, F. (2020). Clinical performance of a glass hybrid restorative in extended size class II cavities. *Operative Dentistry*, 45(3), 243-254.
- Guzmán-Armstrong, S., Chalmers, J., & Warren, J. J. (2010). White spot lesions: Prevention and treatment. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 138(6), 690-696.
- Gürçan, A. T., Çakır, G., Özen, B., & Sandallı, N. (2018). Farklı çürük sınıflandırmalarına göre risk faktörleri. *Türkiye Klinikleri J Pediatr Dent-Special Topics*, 4, 15-20.
- Hamzah, Z. (2023). Literature Review Article: Aging in Oral Tissue. *CLINICAL MANAGEMENT IN DENTISTRY-The Application of Advanced Techniques for Dental Practice*, 54.
- Higashi, T., Onzuka, T., Satoh, G., Yoshino, H., & Okamoto, H. (1995). Collagen Formation at the Tooth-Cell Interface: Comparative Ultrastructural Study on the Effect of Partial

- Demineralization of Cementum With Dentin. *Journal of periodontology*, 66(4), 267-273.
- Hinode, D., Tanabe, S. i., Yokoyama, M., Fujisawa, K., Yamauchi, E., & Miyamoto, Y. (2006). Influence of smoking on osseointegrated implant failure: a meta-analysis. *Clinical oral implants research*, 17(4), 473-478.
- Horst, J. A., Ellenikiotis, H., & Milgrom, P. L. (2016). UCSF protocol for caries arrest using silver diamine fluoride: rationale, indications and consent. *Journal of the California Dental Association*, 44(1), 17-28.
- Hotamisligil, G. S., & Erbay, E. (2008). Nutrient sensing and inflammation in metabolic diseases. *Nature Reviews Immunology*, 8(12), 923-934.
- Huang, L.-R., Zhang, C.-Z., Gong, M.-L., Cheng, X.-Q., & Wu, H.-K. (2025). Development of a nomogram for root caries risk assessment in a Chinese elderly population. *Journal of Dentistry*, 156, 105624.
- Huang, Y., Song, B., Zhou, X., Chen, H., Wang, H., & Cheng, L. (2021). Dental Restorative Materials for Elderly Populations. *Polymers*, 13(5), 828.
<https://www.mdpi.com/2073-4360/13/5/828>
- Jackson, M. A., Kellett, M., Worthington, H. V., & Clerehugh, V. (2006). Comparison of interdental cleaning methods: a randomized controlled trial. *Journal of periodontology*, 77(8), 1421-1429.
- Jefferies, S. (2014). Bioactive and biomimetic restorative materials: a comprehensive review. Part II. *Journal of esthetic and restorative dentistry*, 26(1), 27-39.
- Jefferies, S. R. (2014). Bioactive and biomimetic restorative materials: a comprehensive review. Part I. *Journal of esthetic and restorative dentistry*, 26(1), 14-26.
- JOURDE, M. (2001). Modifications des tissus parodontaux liées à l'âge: conséquences thérapeutiques. *Actualités odontostomatologiques*(214), 209-223.

- Kaminska-Pikiewicz, K., Chalas, R., & Bachanek, T. (2017). The condition of oral mucosa in the elderly (over 65 years) of Lublin. *Current Issues in Pharmacy and Medical Sciences*, 30(1), 39-42.
- Kampanas, N.-S., & Antoniadou, M. (2018). Glass ionomer cements for the restoration of non-carious cervical lesions in the geriatric patient. *Journal of functional biomaterials*, 9(3), 42.
- Kassebaum, N. J., Bernabé, E., Dahiya, M., Bhandari, B., Murray, C., & Marcenes, W. (2015). Global burden of untreated caries: a systematic review and metaregression. *Journal of dental research*, 94(5), 650-658.
- Kaye, J., Lee, S., & Chinn, C. H. (2025). The need for effective interprofessional collaboration between nutrition and dentistry. *Frontiers in Public Health*, 13, 1534525.
- Kielbassa, A. M., Mueller, J., & Gernhardt, C. R. (2009). Closing the gap between oral hygiene and minimally invasive dentistry: a review on the resin infiltration technique of incipient (proximal) enamel lesions. *Quintessence international*, 40(8).
- Kind, L., Stevanovic, S., Wuttig, S., Wimberger, S., Hofer, J., Müller, B., & Pielas, U. (2017). Biomimetic remineralization of carious lesions by self-assembling peptide. *Journal of dental research*, 96(7), 790-797.
- Knyszalska-Karwan, Z. (2009). *Stomatologia wieku podeszłego*. Wydawnictwo Czelej.
- Kotsakis, G. A., Lian, Q., Ioannou, A. L., Michalowicz, B. S., John, M. T., & Chu, H. (2018). A network meta-analysis of interproximal oral hygiene methods in the reduction of clinical indices of inflammation. *Journal of periodontology*, 89(5), 558-570.
- Kulkarni, S., & Yeoh, S.-C. (2026). Polypharmacy and Its Impact on Oral Health. In *Lifestyle in Oral Health and Disease: A Comprehensive Guide for Oral Healthcare Providers* (pp. 343-356). Springer.

- Kutuk, Z., Ozturk, C., Cakir, F., & Gurgan, S. (2019). Mechanical performance of a newly developed glass hybrid restorative in the restoration of large MO Class 2 cavities. *Nigerian journal of clinical practice*, 22(6), 833-841.
- Leung, K. C.-M., & Chu, C.-H. (2022). Dental care for older adults. *International journal of environmental research and public health*, 20(1), 214.
- Lipsky, M. S., Singh, T., Zakeri, G., & Hung, M. (2024). Oral health and older adults: A narrative review. *Dentistry Journal*, 12(2), 30.
- Marinho, V. C., Higgins, J. P., Logan, S., Sheiham, A., & Group, C. O. H. (1996). Topical fluoride (toothpastes, mouthrinses, gels or varnishes) for preventing dental caries in children and adolescents. *Cochrane Database of Systematic Reviews*, 2010(1).
- Masnoon, N., Shakib, S., Kalisch-Ellett, L., & Caughey, G. E. (2017). What is polypharmacy? A systematic review of definitions. *BMC geriatrics*, 17(1), 230.
- Mejàre, I., Axelsson, S., Dahlén, G. a., Espelid, I., Norlund, A., Tranæus, S., & Twetman, S. (2014). Caries risk assessment. A systematic review. *Acta Odontologica Scandinavica*, 72(2), 81-91.
- Meyer-Lueckel, H., & Paris, S. (2008). Improved resin infiltration of natural caries lesions. *Journal of dental research*, 87(12), 1112-1116.
- Meyer-Lueckel, H., Paris, S., & Kielbassa, A. (2007). Surface layer erosion of natural caries lesions with phosphoric and hydrochloric acid gels in preparation for resin infiltration. *Caries research*, 41(3), 223-230.
- Moberg Sköld, U., Petersson, L. G., Lith, A., & Birkhed, D. (2005). Effect of school-based fluoride varnish programmes on approximal caries in adolescents from different caries risk areas. *Caries research*, 39(4), 273-279.
- Nakamura, J., Kitagaki, K., Ueda, Y., Nishio, E., Shibatsuji, T., Uchihashi, Y., Adachi, R., & Ono, R. (2021). Impact of

- polypharmacy on oral health status in elderly patients admitted to the recovery and rehabilitation ward. *Geriatrics & Gerontology International*, 21(1), 66-70.
- Nalçacı, R., Erdemir, E. O., & Baran, I. (2007). Evaluation of the oral health status of the people aged 65 years and over living in near rural district of Middle Anatolia, Turkey. *Arch Gerontol Geriatr*, 45(1), 55-64.
<https://doi.org/10.1016/j.archger.2006.09.002>
- Newman, H. (1986). Modes of application of anti-plaque chemicals. *Journal of clinical periodontology*, 13(10), 965-974.
- Nobre, C. V., Gomes, A. M., Gomes, A. P., Gomes, A. A., & Nascimento, A. P. (2020). Assessment of the efficacy of the utilisation of conventional and electric toothbrushes by the older adults. *Gerodontology*, 37(3), 297-302.
- Organization, W. H. (2022). *Global oral health status report: towards universal health coverage for oral health by 2030*. World Health Organization.
- Özdemir, B. E., & Çelik, Ç. Biyoaktif kompozit rezinler. *7tepe Klinik Dergisi*, 17(2), 139-147.
- Persson, G. R. (2018). Periodontal complications with age. *Periodontology 2000*, 78(1), 185-194.
- Porter, S., Scully, C., & Hegarty, A. (2004). An update of the etiology and management of xerostomia. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontology*, 97(1), 28-46.
- Prakash, P., & Bhandari, S. (2020). Demographics and age changes in geriatric population-part 1. *IP Indian J Anat Surg Head Neck Brain*, 6(3), 75-81.
- Rathke, A., Pfefferkorn, F., McGuire, M. K., Heard, R. H., & Seemann, R. (2022). One-year clinical results of restorations using a novel self-adhesive resin-based bulk-fill restorative. *Scientific reports*, 12(1), 3934.
- Rethman, M. P., Beltrán-Aguilar, E. D., Billings, R. J., Burne, R. A., Clark, M., Donly, K. J., Hujoel, P. P., Katz, B. P., Milgrom, P., &

- Sohn, W. (2011). Nonfluoride caries-preventive agents: executive summary of evidence-based clinical recommendations. *The Journal of the American Dental Association*, 142(9), 1065-1071.
- Revol, P., Devoize, L., Deschaumes, C., Barthélémy, I., Baudet-Pommel, M., & Mondié, J. (2006). Stomatologie gériatrique. EMC. In: Elsevier SAS, Paris), Stomatologie.
- Reynolds, E. C. (2008). Calcium phosphate-based remineralization systems: scientific evidence? *Australian dental journal*, 53(3), 268-273.
- Sanz, M., Herrera, D., Kerschull, M., Chapple, I., Jepsen, S., Berglundh, T., Sculean, A., Tonetti, M. S., Participants, E. W., Consultants, M., & Merete Aass, A. (2020). Treatment of stage I–III periodontitis—The EFP S3 level clinical practice guideline. *Journal of clinical periodontology*, 47, 4-60.
- Sauro, S., Makeeva, I., Faus-Matoses, V., Foschi, F., Giovarruscio, M., Maciel Pires, P., Martins Moura, M. E., Almeida Neves, A., & Faus-Llácer, V. (2019). Effects of ions-releasing restorative materials on the dentine bonding longevity of modern universal adhesives after load-cycle and prolonged artificial saliva aging. *Materials*, 12(5), 722.
- Saydam, G., Oktay, I., & Möller, I. (1990). Oral health status analysis. *WHO European Region-Ministry of Health, Ankara*, 25.
- Schmalz, G., Hickel, R., Price, R. B., & Platt, J. A. (2023). Bioactivity of dental restorative materials: FDI policy statement. *international dental journal*, 73(1), 21-27.
- Schmidlin, P., Zobrist, K., Attin, T., & Wegehaupt, F. (2016). In vitro re-hardening of artificial enamel caries lesions using enamel matrix proteins or self-assembling peptides. *Journal of Applied Oral Science*, 24, 31-36.
- Schwendicke, F., Splieth, C. H., Bottenberg, P., Breschi, L., Campus, G., Doméjean, S., Ekstrand, K., Giacaman, R. A., Haak, R., Hannig, M., Hickel, R., Juric, H., Lussi, A., Machiulskiene, V., Manton, D., Jablonski-Momeni, A., Opdam, N., Paris, S.,

- Santamaria, R.,...Banerjee, A. (2020). How to intervene in the caries process in adults: proximal and secondary caries? An EFCD-ORCA-DGZ expert Delphi consensus statement. *Clinical oral investigations*, 24(9), 3315-3321. <https://doi.org/10.1007/s00784-020-03431-0>
- Sidhu, S. (2011). Glass-ionomer cement restorative materials: a sticky subject? *Australian dental journal*, 56, 23-30.
- Takehita, T., Kageyama, S., Furuta, M., Tsuboi, H., Takeuchi, K., Shibata, Y., Shimazaki, Y., Akifusa, S., Ninomiya, T., & Kiyohara, Y. (2016). Bacterial diversity in saliva and oral health-related conditions: the Hisayama Study. *Scientific reports*, 6(1), 22164.
- Teissier, T., Boulanger, E., & Cox, L. S. (2022). Interconnections between inflammaging and immunosenescence during ageing. *Cells*, 11(3), 359.
- Tepox-Puga, S. M., Rocha-Ortiz, J. A., Medina-Solís, C. E., Castrejón-Pérez, R. C., Sánchez-García, S., & Borges-Yáñez, S. A. (2023). Prevalence, and Risk Indicators of Coronal and Root Caries in Mexican Older Adults in Nursing Homes. *Clin Cosmet Investig Dent*, 15, 333-347. <https://doi.org/10.2147/ccide.S439342>
- Tonetti, M. S., Eickholz, P., Loos, B. G., Papapanou, P., Van Der Velden, U., Armitage, G., Bouchard, P., Deinzer, R., Dietrich, T., & Hughes, F. (2015). Principles in prevention of periodontal diseases: consensus report of group 1 of the 11th European Workshop on Periodontology on effective prevention of periodontal and peri-implant diseases. *Journal of clinical periodontology*, 42, S5-S11.
- Twetman, S. (2016). Caries risk assessment in children: how accurate are we? *European Archives of Paediatric Dentistry*, 17(1), 27-32.
- Tzimas, K., Pappa, E., Fostiropoulou, M., Papazoglou, E., & Rahiotis, C. (2025). Highly filled flowable composite resins as sole restorative materials: A systematic review. *Materials*, 18(14), 3370.

- Uhlen-Strand, M.-M., Hovden, E. A. S., Schwendicke, F., Ansteinsson, V. E., Mdala, I., & Skudutyte-Rysstad, R. (2023). Dental care for older adults in home health care services-practices, perceived knowledge and challenges among Norwegian dentists and dental hygienists. *BMC oral health*, *23*(1), 222.
- Vallittu, P. K., Boccaccini, A. R., Hupa, L., & Watts, D. C. (2018). Bioactive dental materials-Do they exist and what does bioactivity mean? In (Vol. 34, pp. 693-694).
- Van der Weijden, F. A., Van der Sluijs, E., Ciancio, S. G., & Slot, D. E. (2015). Can chemical mouthwash agents achieve plaque/gingivitis control? *Dental Clinics of North America*, *59*(4), 799-829.
- Vissink, A., Spijkervet, F. K. L., & Amerongen, A. V. N. (1996). Aging and saliva: a review of the literature. *Special Care in Dentistry*, *16*(3), 95-103.
- Vyas, T., Bhatt, G., Gaur, A., Sharma, C., Sharma, A., & Nagi, R. (2021). Chemical plaque control-A brief review. *Journal of family medicine and primary care*, *10*(4), 1562-1568.
- Warnakulasuriya, S., Dietrich, T., Bornstein, M. M., Peidr , E. C., Preshaw, P. M., Walter, C., Wennstr m, J. L., & Bergstr m, J. (2010). Oral health risks of tobacco use and effects of cessation. *International dental journal*, *60*(1), 7-30.
- Watt, R. G., & Serban, S. (2020). Multimorbidity: a challenge and opportunity for the dental profession. *British Dental Journal*, *229*(5), 282-286. <https://doi.org/10.1038/s41415-020-2056-y>
- Weening-Verbree, L. F., Douma, A., van der Schans, C. P., Huisman-de Waal, G. J., Schuller, A. A., Zuidema, S. U., Krijnen, W. P., & Hobbelen, J. S. (2025). Oral health care in older people in long-term care facilities: An updated systematic review and meta-analyses of implementation strategies. *International Journal of Nursing Studies Advances*, *8*, 100289.
- Weening-Verbree, L. F., van der Schans, C. P., Huisman-de Waal, G. J., Schuller, A. A., Zuidema, S. U., Krijnen, W. P., Hobbelen, J.

- S., & Douma, A. (2025). Oral health care in older people in long-term care facilities.
- Wongiam, N., Praditpornsilpa, K., & Vacharaksa, A. (2025). Comprehensive geriatric assessment for oral care in older adults: a focus group study. *BMC geriatrics*, 25(1), 232.
- Worthington, H. V., MacDonald, L., Pericic, T. P., Sambunjak, D., Johnson, T. M., Imai, P., & Clarkson, J. E. (2019). Home use of interdental cleaning devices, in addition to toothbrushing, for preventing and controlling periodontal diseases and dental caries. *Cochrane database of systematic reviews*(4).
- Wu, B., Anderson, R. A., Pei, Y., Xu, H., Nye, K., Poole, P., Bunn, M., Lynn Downey, C., & Plassman, B. L. (2021). Care partner–assisted intervention to improve oral health for older adults with cognitive impairment: a feasibility study. *Gerodontology*, 38(3), 308-316.
- Xu, X., He, J., Xue, J., Wang, Y., Li, K., Zhang, K., Guo, Q., Liu, X., Zhou, Y., & Cheng, L. (2015). Oral cavity contains distinct niches with dynamic microbial communities. *Environmental microbiology*, 17(3), 699-710.
- Yoshihara, A., Suwama, K., Miyamoto, A., Watanabe, R., & Ogawa, H. (2021). Diet and root surface caries in a cohort of older Japanese. *Community dentistry and oral epidemiology*, 49(3), 301-308.
- Young, D. A., Nový, B. B., Zeller, G. G., Hale, R., Hart, T. C., Truelove, E. L., Ekstrand, K. R., Featherstone, J. D., Fontana, M., & Ismail, A. (2015). The American Dental Association caries classification system for clinical practice: a report of the American Dental Association Council on Scientific Affairs. *The Journal of the American Dental Association*, 146(2), 79-86.
- Zenthöfer, A., Meyer-Kühling, I., Hufeland, A.-L., Schröder, J., Cabrera, T., Baumgart, D., Rammelsberg, P., & Hassel, A. J. (2016). Carers' education improves oral health of older

- people suffering from dementia—results of an intervention study. *Clinical interventions in aging*, 1755-1762.
- Zhang, J., Leung, K. C., Chu, C. H., & Lo, E. C. (2020). Risk indicators for root caries in older adults using long-term social care facilities in Hong Kong. *Community dentistry and oral epidemiology*, 48(1), 14-20.
- Zhang, J., Sardana, D., Wong, M., Leung, K., & Lo, E. (2020). Factors associated with dental root caries: a systematic review. *JDR Clinical & Translational Research*, 5(1), 13-29.
- Zhang, O. L., Niu, J. Y., Yin, I. X., Yu, O. Y., Mei, M. L., & Chu, C. H. (2023). Bioactive materials for caries management: A literature review. *Dentistry Journal*, 11(3), 59.
- Ziyati, O., & Sidqui, M. (2024). Senescence of the Dental Organs and Management of the Elderly in Dentistry [J]. *Open Access Library Journal*, 11(6), 1-16.

BÖLÜM 3

RESTORATİF DİŞ TEDAVİSİNDE YAPAY ZEKA DESTEKLİ RADYOLOJİK TANI SİSTEMLERİ

FATİH CENGİZ¹, MUHAMMET CAN EREN²,
MERVE PELİN DUR SARIGÜZEL³

Giriş

Restoratif diş hekimliğinde tanısal doğruluk; lezyonun varlığı, lokalizasyonu ve derinliği kadar, tedavi kararının “ne zaman” ve “ne kadar invaziv” olacağı açısından da belirleyicidir (Najeeb & Islam, 2025; Schwendicke ve ark., 2022). Güncel minimal invaziv yaklaşımın temel amacı, erken lezyonların doğru sınıflanması ve tedavisi, remineralizasyon fırsatının kaçırılmaması ve gereksiz doku kaybının önlenerek madde kaybının minimize edilmesidir. Bu bağlamda radyografik görüntüleme, özellikle bitewing ve periapikal radyografiler aproksimal çürüklerin saptanması, sekonder çürük şüphesinin değerlendirilmesi ve restorasyon–diş arayüzündeki uyumsuzlukların yorumlanmasında klinik muayeneyi tamamlayan

¹ Araş. Gör., Sakarya Üniversitesi, Diş Hekimliği Fakültesi, Restoratif Diş Tedavisi Anabilim Dalı, Orcid: 0009-0007-8379-9864

² Araş. Gör., Sakarya Üniversitesi, Diş Hekimliği Fakültesi, Ağız, Diş ve Çene Radyolojisi Anabilim Dalı, Orcid: 0009-0001-0748-1594

³ Dr. Öğr. Üyesi, Sakarya Üniversitesi, Diş Hekimliği Fakültesi, Restoratif Diş Tedavisi Anabilim Dalı, Orcid: 0000-0001-9005-5694

ana araçlardan biridir (Wenzel, 2021). Bununla birlikte radyografilerin yorumlanması; klinisyenin deneyim düzeyi, yorgunluk, görüntü kalitesi, çekim protokolü, anatomik süperpozisyonlar ve restoratif materyal kaynaklı artefaktlar nedeniyle değişkenlik gösterebilir (Ossowska ve ark., 2022; Tabatabaian ve ark., 2023).

Bu değişkenliği azaltma ve karar süreçlerini standardize etme hedefi, diş hekimliğinde yapay zekâ (YZ) tabanlı karar destek sistemlerinin hızla gündeme gelmesine yol açmıştır. Özellikle derin öğrenme (deep learning) ve konvolüsyonel sinir ağları (CNN) temelli yöntemler, radyografik görüntülerde çürük lezyonlarını işaretleme, lezyon derinliğini sınıflama, restorasyon varlığını tanıma ve bazı senaryolarda klinisyen performansını destekleme açısından klinik uygulamalarda etkin yer almıştır. Restoratif diş hekimliğine odaklanan sistematik derlemelerde, YZ modellerinin çürük tanısında belirli doğruluk aralıklarına ulaştığı belirtilmektedir; ancak çalışmaların önemli bir bölümünün in vitro veya sınırlı klinik veriyle yürütüldüğü ve dış doğrulama/gerçek yaşam genellenebilirliği açısından boşluklar bulunduğu vurgulanmaktadır (Cantu ve ark., 2020; Lee ve ark., 2018; Revilla-León ve ark., 2022; Tabatabaian ve ark., 2023).

Bu kitap bölümünde amaç; restoratif diş tedavisinde YZ destekli radyolojik tanı sistemlerini radyoloji tanı ve teşhis odağı korunarak ele almak, kullanılan görüntüleme modalitelerini (bitewing, periapikal, panoramik, Konik Işınlı Bilgisayarlı Tomografi (KIBT), model yaklaşımlarını (sınıflandırma–tespit–segmentasyon), klinik kullanım senaryolarını (aproksimal çürük, sekonder çürük, restorasyon sınırları, kırık şüphesi vb.), performans ölçütlerini, tanısal tuzakları ve klinik entegrasyon/etik boyutu bütüncül biçimde tartışmaktır.

Kavramsal Çerçeve: YZ, Makine Öğrenmesi ve Görüntü Tabanlı Tanı

YZ; makinelerin belirli görevleri insan benzeri biçimde yerine getirmesini sağlayan yöntem ve sistemleri kapsar. Makine öğrenmesi, veriden öğrenen algoritmaları; derin öğrenme ise çok katmanlı sinir ağlarıyla özellikle görüntü gibi karmaşık verilerde otomatik öznitelik çıkarımı yapabilen yaklaşımı ifade eder. Diş hekimliğinde görüntü tabanlı YZ uygulamalarının yaygınlaşmasının arkasında üç temel dinamik vardır: (i) dijital görüntü arşivlerinin büyümesi, (ii) hesaplama gücünün artması ve (iii) CNN tabanlı modellerin medikal görüntüleme performansındaki hızlı gelişimi. Radyolojik tanı sistemleri açısından YZ uygulamaları pratikte üç temel görev etrafında toplanır: sınıflandırma, tespit ve segmentasyon. Bu ayrım klinik açıdan kritiktir; çünkü restoratif kararlar çoğu zaman yalnızca “lezyon var/yok” ikili kararına değil, lezyonun konumu ve derinliği gibi ayrıntılara dayanır. Örneğin mine ile sınırlı bir aproksimal lezyon için non-invaziv yaklaşım tercih edilebilecekken, dentine ilerlemiş lezyon restoratif müdahale gerektirmektedir. Bu nedenle segmentasyon ve derinlik sınıflaması, restoratif karar süreciyle daha doğrudan ilişkilidir (Carrillo-Perez ve ark., 2022; Gomez, 2015; Machiulskiene ve ark., 2020; Moharrami ve ark., 2024; Ossowska ve ark., 2022; Tabatabaian ve ark., 2023).

Tablo 1. Radyolojik YZ Görev Tipleri ve Restoratif Klinik Karşılıkları

Görev tipi	Tipik çıktı	Restoratif klinikte kullanım	Klinik avantaj	Başlıca sınırlılık
Sınıflandırma	“Var/Yok” veya sınıf etiketi	Bitewing’de aproksimal çürük var/yok	Hızlı tarama	Lokalizasyon/derinlik bilgisi kısıtlı
Tespit	Lezyon için sınır kutusu/işaretleme	Lezyonun yerini “işaretleme”	Hedefli geri bildirim	Sınır hassasiyeti segmentasyondan düşük
Segmentasyon	Piksel düzeyinde maske	Lezyon konturu, alan/derinlik tahmini	Ayrıntılı haritalama	Etiketleme maliyeti ve “altın standart” güçlüğü

Kaynakça: (Moharrami ve ark., 2024; Tabatabaian ve ark., 2023).

Radyolojik Görüntüleme Modaliteleri: YZ İçin Veri Özellikleri, Kalite ve Artefaktlar

YZ modellerinin klinik değer üretmesi, yalnızca algoritmanın gücüne değil, girdi görüntülerinin kalitesine ve verinin klinik gerçekliği temsil etme düzeyine bağlıdır. Restoratif diş hekimliğinde kullanılan başlıca modaliteler bitewing, periapikal ve panoramik radyografiler ile seçilmiş endikasyonlarda KIBT’dir. Her modalite; uzaysal çözünürlük, süperpozisyon, kontrast, distorsiyon ve metal artefaktlarına duyarlılık bakımından farklı özellikler taşır; bu farklar YZ performansını doğrudan etkiler (Revilla-León ve ark., 2022; Tabatabaian ve ark., 2023).

Bitewing radyografisi

Bitewing radyografiler, posterior bölgede aproksimal çürüklerin saptanmasında klinik pratikte en yaygın kullanılan görüntüleme yöntemlerindedir. YZ uygulamalarında da en yoğun veri birikimi bitewing tabanlı çürük tespit çalışmalarında

görülmektedir. Derin öğrenme tabanlı sistemler; başlangıç lezyonlarını yakalama ve klinisyenler arası değişkenliği azaltma potansiyeli taşısa da erken (mine ile sınırlı) lezyonlarda kontrastın düşük olması hem insan gözlemci hem de model için zorluk oluşturur. Segmentasyon temelli bir çalışmada, ileri lezyonların erken lezyonlara kıyasla daha yüksek başarıyla saptandığı; erken lezyonların daha sık yanlış sınıflandığı bildirilmiştir. Bu sonuç klinik olarak beklenen bir eğilime işaret eder: lezyon derinliği arttıkça radyografik belirginlik artar (Ahmed ve ark., 2023; Azhari ve ark., 2023; Cantu ve ark., 2020; Lee ve ark., 2021; Wenzel, 2021).

Periapikal radyografi

Periapikal radyografiler, restoratif planlamada pulpa yakınlığı, kök morfolojisi, restoratif–endodontik sınır problemleri ve kırık şüpheleri gibi durumlarda önemli olabilir. YZ açısından periapikal görüntüler, bitewing’e kıyasla daha değişken geometrik projeksiyonlar ve farklı çekim açıları içerir; bu da modelin genellenebilirliğini zorlayabilir. Ancak uygun veri ve dış doğrulamayla periapikal görüntüler üzerinde de çürük ve ilişkili bulguların otomatik saptanması hedeflenmektedir (Putra ve ark., 2022; Revilla-León ve ark., 2022; Tabatabaian ve ark., 2023).

Panoramik radyografi

Panoramik görüntüler restoratif çürük tanısı için birincil modalite olmamakla birlikte, geniş alan taraması ve genel değerlendirmede kullanılır. Ancak panoramikte süperpozisyon ve çözünürlük kısıtlamaları erken aproksimal lezyonların saptanmasını güçleştirir; bu sınırlılık YZ için de geçerlidir. Bu nedenle panoramik tabanlı sistemler, restorasyon gerekliliğinin kararını destekten ziyade çoğu zaman tarama ve otomatik işaretleme amaçlı konumlanır (Carrillo-Perez ve ark., 2022).

Konik Işınlı Bilgisayarlı Tomografi (KIBT)

KIBT, çürük tanısı için rutin bir araç değildir; kullanımı radyasyon dozu ve endikasyon ilkeleri nedeniyle seçilmiş klinik durumlarla sınırlıdır. Buna rağmen, üç boyutlu veri sağlaması nedeniyle dikey kök kırığı şüphesi veya kompleks anatomik değerlendirmeler gibi “zorlu tanı” senaryolarında değerli olabilir. Literatürde KIBT’ın bazı kırık/çatlak senaryolarında iki boyutlu görüntülere göre avantaj sağlayabileceği ve YZ modellerinin bu alanda geliştirildiği bildirilmektedir (Revilla-León ve ark., 2022; Tabatabaian ve ark., 2023).

Tablo 2. Modaliteye Göre Restoratif Radyolojide YZ Kullanımı

Modalite	Restoratif tanı hedefi	YZ için başlıca fırsat	Tipik risk/sınırlılık
Bitewing	Aproksimal çürük, sekonder çürük şüphesi	Lezyon tespiti/segmentasyonu, derinlik sınıflaması	Erken lezyonda düşük belirginlik; restorasyon süperpozisyonu
Periapikal	Derin dentin, pulpa yakınlığı, kırık şüphesi	Çoklu hedef: çürük + kırık + periapikal bulgular	Çekim açısı heterojenliği, distorsiyon
Panoramik	Tarama, restorasyon varlığı, genel durum	Otomatik işaretleme/triage	Süperpozisyon, erken lezyonda düşük duyarlılık
KIBT	Seçilmiş olgular: kırık/çatlak, kompleks değerlendirme	3B segmentasyon ve daha az süperpozisyon	Metal artefakt, veri etiketleme zorluğu, endikasyon kısıtı

Kaynakça: (Najeeb & Islam, 2025; Revilla-León ve ark., 2022; Tabatabaian ve ark., 2023).

Klinik Uygulamalar: Restoratif Radyolojik Tanıda YZ Destekli Sistemler

Aproksimal çürük tespiti ve lezyon derinliği sınıflaması

Restoratif radyolojide YZ'nin klinikte etkinliğinin en güçlü olduğu kullanım alanı aproksimal çürük tespitidir. Sistematik derlemeler, YZ modellerinin çürük tanısında belirli doğruluk aralıkları bildirdiğini ve bazı senaryolarda klinisyen performansını destekleyebileceğini göstermektedir. Bununla birlikte, “erken lezyon” tespitindeki performansı çoğu çalışmada kritik sınırlılık olarak kalır (Bayrakdar ve ark., 2022; Cantu ve ark., 2020).

Bitewing görüntüler üzerinde geliştirilen segmentasyon modellerinde, lezyon derinliğine göre performansın değiştiği; ileri lezyonların daha iyi saptandığı, erken lezyonlarda ise modelin lezyon derinliğini doğru ayırt etmede zorlanabildiği rapor edilmiştir. Benzer şekilde, çürüğü hem tespit hem sınıflama hedefleyen çalışmalarda segmentasyon kalitesi (ör. Intersection over Union (IoU) veya F1 skorları) lezyon şiddetine bağlı olarak dalgalanabilmektedir (Azhari ve ark., 2023; Mao ve ark., 2021).

Klinik açıdan bu bulgular iki anlama gelir:

- YZ sistemleri, özellikle belirgin lezyonlarda “teşhis ve tespiti kaçırma” riskini azaltabilir; ancak erken lezyonlarda aşırı işaretleme/yalancı pozitif üretme riski taşıyabilir.
- Erken lezyonlarda karar, yalnızca radyografik işaretlemeye değil; klinik risk profiline, lezyon aktivitesine ve hasta bazlı yönetim planına dayandırılmalıdır (Najeeb & Islam, 2025).

Sekonder çürük ve restorasyon–diş arayüzü değerlendirme

Sekonder çürük, restorasyon başarısızlığının önde gelen nedenlerinden biridir. Radyografik değerlendirmede sorun; restoratif materyalin radyoopasitesi, marjinal konturlar, taşkın restorasyonlar

ve süperpozisyonlar nedeniyle “lezyon–marjin” ayrımının zorlaşmasıdır. Bu alan YZ için teorik olarak çok uygun görünse de pratikte iki temel bariyer vardır: (i) yeterli sayıda ve çeşitlilikte etiketli veri elde etme, (ii) sekonder çürük için güvenilir altın standart tanımlama (Mohammad-Rahimi ve ark., 2022; Tabatabaian ve ark., 2023).

Bu nedenle güncel yaklaşım, sekonder çürük tanısını doğrudan hedeflemek yerine çok görevli (multi-task) sistemler ile önce restorasyonun segmentasyonu/tespiti, ardından marjinal bölgede lezyon olasılığının hesaplanması şeklinde katmanlı bir iş akışına yönelmektedir (Mao ve ark., 2021; Najeeb & Islam, 2025).

Restorasyon başarısızlığının öngörülmesi ve risk tabanlı karar desteği

Restoratif başarısızlık yalnızca sekonder çürükle sınırlı değildir; marjinal sızıntı, kırık, aşınma, adeziv başarısızlık ve biyolojik komplikasyonlar gibi çok faktörlü bir sonuçtur. YZ'nin bu alandaki rolü, tek bir radyografiden tanı koymaktan ziyade; geçmiş restorasyon verileri, klinik değişkenler ve görüntüleme bulgularını birleştirerek “risk” öngörüsü sunma potansiyelidir. Ancak bu tür modellerin klinik uygulamaya geçebilmesi için prospektif doğrulama, standardize veri toplama ve kararın klinik sonuçlara etkisini gösteren çalışmalar gereklidir (Liu ve ark., 2020; Mongan ve ark., 2020; Sounderajah ve ark., 2025).

Kırık/çatlak şüphesi ve restoratif–endodontik sınır senaryoları

Dikey kök kırığı gibi tanılar, iki boyutlu radyografilerde çoğu zaman zordur ve klinik karar üzerinde önemli etkiye sahiptir. KIBT'ın seçilmiş olgularda sunduğu 3 boyutlu bilgi, bu tür problemlerde tanısal avantaj sağlayabilir; dolayısıyla YZ'nin KIBT verisi üzerinde geliştirilmesi özellikle “yüksek belirsizlik”

senaryolarında klinik değeri artırabilir (Johari ve ark., 2017; Tabatabaian ve ark., 2023).

Tablo 3. Restoratif Radyolojik Senaryolarda YZ Çıktısı ve Klinik Aksiyon

Klinik senaryo	YZ çıktısı (örnek)	Klinisyen için pratik değer	Klinik risk/tuzak	Önerilen kullanım yaklaşımı
Aproksimal çürük	Lezyon işaretleme + derinlik sınıfı	Kaçırmayı azaltma, standartlaşma	Erken lezyonda yalancı pozitif	“İkinci okuyucu” + risk profiliyle birlikte
Sekonder çürük şüphesi	Marjinal bölgede olasılık haritası	Hedefli inceleme, marjin odaklı uyarı	Restorasyon artefaktı	Restorasyon segmentasyonu + klinik doğrulama
Restorasyon başarısızlık riski	Risk skoru (prognostik)	Takip planı optimizasyonu	Veri sapması, dış geçerlik	Çok merkezli doğrulama ve “kılavuz destek”
Kırık/çatlak şüphesi	Tespit/segmentasyon (2B/3B)	Zor olguda karar desteği	Endikasyon dışı KIBT kullanımı	Seçilmiş olgu, endikasyon ilkelerine uygun

Kaynakça: (Najeeb & Islam, 2025; Revilla-León ve ark., 2022; Tabatabaian ve ark., 2023).

Performans Ölçütleri ve Radyolojik Tanıda Tanısal Tuzaklar

YZ sistemlerini değerlendirirken “doğruluk (accuracy)” tek başına yeterli değildir. Özellikle restoratif kararların minimal invaziv yaklaşım gerektirdiği erken lezyonlarda, modelin duyarlılığı artarken yalancı pozitif yanıtların artması olasıdır. Bu durum, gereksiz invaziv müdahale riskini yükseltebilir. Bu nedenle performans; duyarlılık, özgüllük, Area Under the Curve (AUC), F1 skoru ve segmentasyon için IoU/Dice gibi ölçütlerle birlikte yorumlanmalıdır (Ahmed ve ark., 2023; Azhari ve ark., 2023; Schwendicke ve ark., 2022).

Radyolojik tanıda tanısal tuzaklar üç ana grupta özetlenebilir:

- **Görüntü kalitesi ve protokol heterojenliği:** Farklı sensörler, farklı pozisyonlama ve farklı işleme parametreleri, modelin “dağılım dışı” veride performans kaybetmesine neden olabilir. Bu durum, klinikte farklı cihazlar arası genellenebilirlik problemini büyütür (Ma ve ark., 2022; Putra ve ark., 2022).
- **Restoratif materyal ve metal artefaktları:** Yüksek radyoopasiteli materyaller, saçılma ve süperpozisyon yoluyla lezyon görünürlüğünü azaltabilir. Modelin lezyon yerine restorasyon kenar kontrastını “lezyon” olarak yorumlaması veya marjinal bölgede gürültü artefaktı lezyon sanması mümkündür (Putra ve ark., 2022; Schwendicke ve ark., 2022; Wenzel, 2021).
- **Altın standart (ground truth) problemi:** Çürüğün gerçek derinliğini histolojik doğrulamak klinikte çoğu zaman mümkün değildir; birçok çalışma klinisyen etiketi veya uzlaşi etiketini referans alır. Bu durum, modelin neyi öğrendiği ve hatanın kaynağının ne olduğu konusunda belirsizlik doğurur (Moharrami ve ark., 2024; Reyes ve ark., 2022; Schwendicke ve ark., 2022).

Bu tuzaklar, YZ'nin klinikte “otomatik karar verici” olmaktan çok, klinisyeni destekleyen bir ikinci değerlendirme katmanı olarak konumlandırılmasını daha güvenli kılar.

Klinik Entegrasyon: İş Akışı, İnsan–YZ Etkileşimi ve Kalibrasyon

YZ destekli radyolojik sistemler klinikte üç temel şekilde konumlanır:

- **Triaj ve tarama:** Radyografide olası lezyonları hızlı işaretleyerek klinisyenin dikkatini yönlendirme.

- **İkinci okuyucu:** Klinik karar öncesi lezyon şüphesini yeniden değerlendirme ve tutarlılığı artırma.
- **Karar destek:** Risk skoru, derinlik sınıflaması veya takip önerisi gibi çıktılarla planlamayı destekleme.

Bu yaklaşımlarda “insan–YZ etkileşimi” kritik noktadır. Model tarafından üretilen çıktılar klinisyenin değerlendirmesini hatalı bir şekilde yönlendirebilir; bu durum özellikle erken lezyonlarda yalancı pozitif sonuçların gereksiz invaziv tedavi kararlarına neden olmasına zemin hazırlayabilir. Bu nedenle eğitim ve kalibrasyon süreçleri; YZ’nin hangi koşullarda güçlü, hangi koşullarda zayıf olduğunu; görüntü kalitesi/artefakt yönetimini ve kararın klinik bağlamla nasıl birleştirileceğini kapsamalıdır (Ossowska ve ark., 2022; Recht ve ark., 2020; Schwendicke ve ark., 2022).

Bunun yanında, klinikte gerçek faydanın ölçülmesi yalnızca “tanısal doğruluk” ile sınırlı olmamalıdır. YZ’nin; randevu süresine, hastaların yeniden çağırılma oranlarına, gereksiz restoratif müdahalelerin azalmasına ve hasta hekim iletişimine olan etkileri gibi hasta merkezli sonuçlar da değerlendirilmelidir. (Arjumand, 2024; Najeeb & Islam, 2025).

Etik, Veri Güvenliği ve Adalet Boyutu

YZ sistemleri, sağlık verisi üzerinde çalıştığı için gizlilik ve veri güvenliği en temel gerekliliklerdendir. Dış radyografileri her ne kadar yüz fotoğrafı kadar doğrudan kimliklendirisi görünmese de klinik veriyle eşleştirildiğinde yeniden tanımlama riskleri oluşabilir. Ayrıca eğitim verisinin belirli bir popülasyona (tek merkez, tek cihaz, belirli yaş grubu gibi) aşırı uyum göstermesi, farklı popülasyonlarda performans düşüşüne ve adaletsiz sonuçlara yol açabilir (Geis ve ark., 2019).

Bu nedenle restoratif radyolojide YZ geliştirme ve uygulama süreçlerinde; veri seti çeşitliliği, dış doğrulama, hata analizinin alt

gruplar bazında raporlanması ve klinik sorumluluğun net tanımlanması önemlidir. Güncel derlemeler, bu başlıklarda standardizasyon ihtiyacının sürdüğünü ve klinik uygulama öncesi daha güçlü kanıtı ihtiyaç olduğunu vurgulamaktadır (Revilla-León ve ark., 2022; Tabatabaian ve ark., 2023).

Gelecek Yönelimleri

Önümüzdeki dönemde restoratif radyolojide YZ uygulamalarının aşağıdaki yönlerde ilerlemesi beklenebilir:

- **Çok modlu veri entegrasyonu:** Bitewing/periapikal gibi iki boyutlu radyografilerin; intraoral fotoğraf, klinik risk göstergeleri ve geçmiş restorasyon verisiyle aynı modelde birleştirilmesi. Bu yaklaşım, lezyonun “radyografik görünümü” ile “klinik bağlamını” birlikte değerlendirerek daha anlamlı karar desteği üretmeyi hedefler (Schwendicke ve ark., 2022).
- **Genellenebilirlik ve dış doğrulama:** Farklı merkezler, farklı sensörler ve farklı popülasyonlarda performans raporlanması; özellikle tek merkezli çalışmaların klinik genelleme gücünün sınırlı olduğu bilindiğinden, çok merkezli doğrulama daha kritik hâle gelecektir (Kelly ve ark., 2019).
- **Açıklanabilir YZ (XAI):** Klinisyenin model çıktısını “neden” boyutuyla yorumlayabilmesini sağlayan yöntemlerin (ör. ısı haritaları, belirsizlik skorları gibi) klinik tanı ve tedavideki güvenlik için daha fazla entegre edilmesi beklenir (Samek ve ark., 2019).
- **Ekonomik etki değerlendirmesi:** YZ destekli tarama/tanı sistemlerinin; klinik süre, tekrar randevu, gereksiz müdahale ve maliyet-etkililik gibi sağlık ekonomisi çıktıları üzerinden değerlendirilmesi, yaygınlaşma için belirleyici olacaktır (Topol, 2019).

Sonuç

Restoratif diş tedavisinde YZ destekli radyolojik tanı sistemleri; özellikle bitewing tabanlı aproksimal çürük tespiti ve derinlik sınıflaması alanında belirgin bir gelişim göstermiştir. Bununla birlikte erken lezyonların düşük kontrastlı doğası, restorasyon materyali kaynaklı artefaktlar, veri heterojenliği ve “altın standart” oluşturma zorlukları; klinik uygulamada temkinli, standardize ve kanıta dayalı bir entegrasyonu zorunlu kılmaktadır. Mevcut veriler ışığında YZ'nin en güvenli ve etkili klinik konumu; klinisyenin yerini alan bir otomasyon yerine, klinisyeni destekleyen ikinci okuyucu/karar destek katmanı olarak görünmektedir. Gelecekte çok modlu veri entegrasyonu, genellenebilirlik odaklı doğrulama ve açıklanabilirlik yaklaşımları güçlendikçe, restoratif radyolojide YZ'nin gerçek yaşam değerinin daha net ortaya konması beklenmektedir.

Kaynakça

- Ahmed, W. M., Azhari, A. A., Fawaz, K. A., Ahmed, H. M., Alsadah, Z. M., Majumdar, A., & Carvalho, R. M. (2023). Artificial intelligence in the detection and classification of dental caries. *The Journal of prosthetic dentistry*.
- Arjumand, B. (2024). The application of artificial intelligence in restorative dentistry: A narrative review of current research. *The Saudi Dental Journal*, 36(6), 835-840.
- Azhari, A. A., Helal, N., Sabri, L. M., & Abduljawad, A. (2023). Artificial intelligence (AI) in restorative dentistry: Performance of AI models designed for detection of interproximal carious lesions on primary and permanent dentition. *Digital Health*, 9, 20552076231216681.
- Bayrakdar, I. S., Orhan, K., Akarsu, S., Çelik, Ö., Atasoy, S., Pekince, A., Yasa, Y., Bilgir, E., Sağlam, H., & Aslan, A. F. (2022). Deep-learning approach for caries detection and segmentation on dental bitewing radiographs. *Oral Radiology*, 38(4), 468-479.
- Cantu, A. G., Gehrung, S., Krois, J., Chaurasia, A., Rossi, J. G., Gaudin, R., Elhennawy, K., & Schwendicke, F. (2020). Detecting caries lesions of different radiographic extension on bitewings using deep learning. *Journal of dentistry*, 100, 103425.
- Carrillo-Perez, F., Pecho, O. E., Morales, J. C., Paravina, R. D., Della Bona, A., Ghinea, R., Pulgar, R., Pérez, M. d. M., & Herrera, L. J. (2022). Applications of artificial intelligence in dentistry: A comprehensive review. *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry*, 34(1), 259-280.
- Geis, J. R., Brady, A. P., Wu, C. C., Spencer, J., Ranschaert, E., Jaremko, J. L., Langer, S. G., Borondy Kitts, A., Birch, J., & Shields, W. F. (2019). Ethics of artificial intelligence in radiology: summary of the joint European and North American multisociety statement. *Radiology*, 293(2), 436-440.
- Gomez, J. (2015). Detection and diagnosis of the early caries lesion. *BMC Oral Health*, 15(Suppl 1), S3.

- Johari, M., Esmaeili, F., Andalib, A., Garjani, S., & Saberhari, H. (2017). Detection of vertical root fractures in intact and endodontically treated premolar teeth by designing a probabilistic neural network: an ex vivo study. *Dentomaxillofacial Radiology*, *46*(2), 20160107.
- Kelly, C. J., Karthikesalingam, A., Suleyman, M., Corrado, G., & King, D. (2019). Key challenges for delivering clinical impact with artificial intelligence. *BMC medicine*, *17*(1), 195.
- Lee, J.-H., Kim, D.-H., Jeong, S.-N., & Choi, S.-H. (2018). Detection and diagnosis of dental caries using a deep learning-based convolutional neural network algorithm. *Journal of dentistry*, *77*, 106-111.
- Lee, S., Oh, S.-i., Jo, J., Kang, S., Shin, Y., & Park, J.-w. (2021). Deep learning for early dental caries detection in bitewing radiographs. *Scientific reports*, *11*(1), 16807.
- Liu, X., Rivera, S. C., Moher, D., Calvert, M. J., Denniston, A. K., Ashrafian, H., Beam, A. L., Chan, A.-W., Collins, G. S., & Deeks, A. D. J. (2020). Reporting guidelines for clinical trial reports for interventions involving artificial intelligence: the CONSORT-AI extension. *The Lancet Digital Health*, *2*(10), e537-e548.
- Ma, J., Schneider, L., Lapuschkin, S., Ahtibat, R., Duchrau, M., Krois, J., Schwendicke, F., & Samek, W. (2022). Towards trustworthy AI in dentistry. *Journal of dental research*, *101*(11), 1263-1268.
- Machiulskiene, V., Campus, G., Carvalho, J. C., Dige, I., Ekstrand, K. R., Jablonski-Momeni, A., Maltz, M., Manton, D. J., Martignon, S., & Martinez-Mier, E. (2020). Terminology of dental caries and dental caries management: consensus report of a workshop organized by ORCA and cariology research group of IADR. *Caries research*, *54*(1), 7-14.
- Mao, Y.-C., Chen, T.-Y., Chou, H.-S., Lin, S.-Y., Liu, S.-Y., Chen, Y.-A., Liu, Y.-L., Chen, C.-A., Huang, Y.-C., & Chen, S.-L. (2021). Caries and restoration detection using bitewing film based on transfer learning with CNNs. *Sensors*, *21*(13), 4613.

- Mohammad-Rahimi, H., Motamedian, S. R., Rohban, M. H., Krois, J., Uribe, S. E., Mahmoudinia, E., Rokhshad, R., Nadimi, M., & Schwendicke, F. (2022). Deep learning for caries detection: a systematic review. *Journal of dentistry*, 122, 104115.
- Moharrami, M., Farmer, J., Singhal, S., Watson, E., Glogauer, M., Johnson, A. E., Schwendicke, F., & Quinonez, C. (2024). Detecting dental caries on oral photographs using artificial intelligence: A systematic review. *Oral Diseases*, 30(4), 1765-1783.
- Mongan, J., Moy, L., & Kahn Jr, C. E. (2020). Checklist for artificial intelligence in medical imaging (CLAIM): a guide for authors and reviewers. In (Vol. 2, pp. e200029): Radiological Society of North America.
- Najeeb, M., & Islam, S. (2025). Artificial intelligence (AI) in restorative dentistry: current trends and future prospects. *BMC Oral Health*, 25(1), 592.
- Ossowska, A., Kusiak, A., & Świetlik, D. (2022). Artificial intelligence in dentistry—Narrative review. *International journal of environmental research and public health*, 19(6), 3449.
- Putra, R. H., Doi, C., Yoda, N., Astuti, E. R., & Sasaki, K. (2022). Current applications and development of artificial intelligence for digital dental radiography. *Dentomaxillofacial Radiology*, 51(1), 20210197.
- Recht, M. P., Dewey, M., Dreyer, K., Langlotz, C., Niessen, W., Prainsack, B., & Smith, J. J. (2020). Integrating artificial intelligence into the clinical practice of radiology: challenges and recommendations. *European radiology*, 30(6), 3576-3584.
- Revilla-León, M., Gómez-Polo, M., Vyas, S., Barmak, A. B., Özcan, M., Att, W., & Krishnamurthy, V. R. (2022). Artificial intelligence applications in restorative dentistry: A systematic review. *The Journal of prosthetic dentistry*, 128(5), 867-875.
- Reyes, L. T., Knorst, J. K., Ortiz, F. R., & Ardenghi, T. M. (2022). Machine learning in the diagnosis and prognostic prediction of dental caries: a systematic review. *Caries research*, 56(3), 161-170.

- Samek, W., Montavon, G., Vedaldi, A., Hansen, L. K., & Müller, K.-R. (2019). *Explainable AI: interpreting, explaining and visualizing deep learning* (Vol. 11700). Springer Nature.
- Schwendicke, F., Cejudo Grano de Oro, J., Garcia Cantu, A., Meyer-Lueckel, H., Chaurasia, A., & Krois, J. (2022). Artificial intelligence for caries detection: value of data and information. *Journal of dental research*, *101*(11), 1350-1356.
- Sounderajah, V., Guni, A., Liu, X., Collins, G. S., Karthikesalingam, A., Markar, S. R., Golub, R. M., Denniston, A. K., Shetty, S., & Moher, D. (2025). The STARD-AI reporting guideline for diagnostic accuracy studies using artificial intelligence. *Nature medicine*, *31*(10), 3283-3289.
- Tabatabaian, F., Vora, S. R., & Mirabbasi, S. (2023). Applications, functions, and accuracy of artificial intelligence in restorative dentistry: A literature review. *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry*, *35*(6), 842-859.
- Topol, E. J. (2019). High-performance medicine: the convergence of human and artificial intelligence. *Nature medicine*, *25*(1), 44-56.
- Wenzel, A. (2021). Radiographic modalities for diagnosis of caries in a historical perspective: from film to machine-intelligence supported systems. *Dentomaxillofacial Radiology*, *50*(5), 20210010.

BÖLÜM 4

DIŞ ÇÜRÜĞÜNE KARŞI İMMÜNOLOJİK YAKLAŞIMLAR VE AŞI STRATEJİLERİ

MEHMET ALPEREN ŞAHİN¹

Giriş

Diş çürüğü, önlenabilir bir hastalık olmasına karşın, dünya genelinde tüm yaş gruplarını etkileyen yaygın kronik enfeksiyon hastalıklarından biri olma özelliğini sürdürmektedir (Pitts & ark., 2017: 1). Modern ve koruyucu diş hekimliği uygulamalarındaki gelişmeler, florür kullanımının yaygınlaşması ve oral hijyene ilişkin farkındalığın artmasına rağmen, çürük insidansının özellikle çocukluk çağında ve dezavantajlı bazı popülasyonlarda hâlen yüksek seyretmesi, mevcut yaklaşımların sınırlılıklarını ortaya koymaktadır (Featherstone, 2003: 129; Watt, 2012: 44). Diş çürüğünün dental biyofilm aracılığıyla gelişen, fermente edilebilir karbonhidratlara bağlı ve multifaktöriyel yapısı; yalnızca mekanik plak kontrolüne veya kimyasal ajanlara dayalı koruyucu stratejilerin her bireyde kalıcı ve yeterli bir koruma sağlamasını güçleştirmektedir (Marsh, 2003: 279; Selwitz, Ismail & Pitts, 2007: 51).

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

Çürük etiyojisinde rol oynayan mikroorganizmaların kolonizasyonunun veya virülans niteliklerinin immünolojik yollar ile kontrol altına alınması düşüncesi, uzun yıllardır araştırmacıların ilgisini çekmektedir (Taubman & Nash, 2006: 555). Diş çürüğüne karşı aşı geliştirme çalışmaları, klasik enfeksiyon hastalıklarında olduğu gibi patojeni tamamen ortadan kaldırmayı değil; oral kavitede mikrobiyal dengenin korunmasını, karyojenik mikroorganizmaların diş yüzeylerine tutunmasının engellenmesini ve biyofilm içindeki patojenik davranışların baskılanmasını hedeflemektedir (Marsh, 2004: 204). Bu yönüyle çürük aşıları, sistemik enfeksiyonlara yönelik aşı kavramından farklı bir immünolojik yaklaşımı temsil etmektedir (Russell & ark., 2004: 230).

Ağız boşluğu, vücudun en karmaşık mikrobiyal ekosistemlerinden birine sahip olup, bu ekosistemin dengesi büyük oranda konak savunma mekanizmaları tarafından düzenlenmektedir (Dewhirst & ark., 2010: 5002). Oral kavitede mikroorganizmalara karşı gelişen bağışıklık yanıtı, temelde mukozal immün sistem aracılığıyla sağlanmaktadır (Brandtzaeg, 2013: 1). Bu sistemin en önemli bileşeni, tükürükte bulunan salgısal immünoglobulin A'dır (Brandtzaeg, 2007: 288). Salgısal IgA, oral mikroorganizmaların diş yüzeylerine tutunmasını engelleyerek, aglütinasyon oluşturarak ve bazı mikrobiyal virülans faktörlerini nötralize ederek koruyucu bir rol üstlenmektedir (Russell & ark., 2004: 230).

Mutans streptokokları başta olmak üzere karyojenik mikroorganizmaların diş yüzeylerine adezyonu ve biyofilm içinde birikimi, çürük sürecinin başlaması açısından kritik bir basamaktır (Marsh, 1994: 263; Selwitz, Ismail & Pitts, 2007: 51). Bu mikroorganizmaların yüzey adezinleri, ekstrasellüler enzimleri ve polisakkarit üretim mekanizmaları, konak tarafından oluşturulan mukozal antikorlar tarafından hedef alınabilmektedir (Smith, 2002: 335). Özellikle çocukluk döneminde, oral mikroorganizmaların kolonizasyonu ile birlikte, tükürükte özgül IgA yanıtının gelişebildiği ve bu yanıtların çürüğe karşı doğal bir koruma sağlayabileceği bildirilmiştir (Brandtzaeg, 2013: 1). Çürüğe dirençli

bireylerde, karyojenik bakterilere karşı tükürük IgA düzeylerinin daha yüksek saptanması, immün yanıtın hastalık seyrindeki rolünü destekleyen önemli bir bulgu olarak kabul edilmektedir (Rose & ark., 1994: 272).

Dişlerin anatomik ve fizyolojik özellikleri, çürük immünolojisinin klasik sistemik enfeksiyon modellerinden farklı değerlendirilmesini zorunlu kılmaktadır (Taubman & Nash, 2006: 555). Diş sert dokularının ağız boşluğunda yer alması ile dış ortamla sürekli temas halinde bulunması, epitel döngüsüyle yenilenmemesi ve doğrudan mukozal yüzeylerle ilişkili olması, çürüğe karşı geliştirilecek immün stratejilerin de ağırlıklı olarak lokal ve mukozal yanıtlar üzerinden kurgulanmasına neden olmaktadır (Mestecky & ark., 2015: 1). Bu sebeple çürük aşılara yönelik çalışmalar, serum antikor yanıtından ziyade, tükürükte etkili ve sürdürülebilir bir mukozal bağışıklık oluşturmayı amaçlamaktadır (Russell & ark., 1999: 4).

Diş çürüğüne karşı aşı geliştirme fikri, 20. yüzyılın ikinci yarısında, karyojenik mikroorganizmaların tanımlanması ve biyofilm oluşum mekanizmalarının daha iyi anlaşılmasıyla birlikte gündeme gelmiştir (Taubman & Nash, 2006: 555). İlk deneysel çalışmalar, mutans streptokokların tam hücre preparatları veya bu bakterilere ait ekstraktlar kullanılarak hayvan modellerinde gerçekleştirilmiş ve bağışıklamanın çürük lezyonlarının şiddetini azalttığı gösterilmiştir (Gibbons & Banghart, 1967: 11; Lehner, Challacombe & Caldwell, 1975: 305). Bu araştırmalar, çürüğün immünolojik yollarla modüle edilebileceğinin ortaya konması açısından önemli bir dönüm noktası olmuştur.

İlerleyen yıllarda, tam hücre aşılarının potansiyel riskleri ve özellikle bazı streptokokal antijenlerin konak dokuları ile çapraz reaksiyon gösterebilme ihtimali, araştırmacıları hedefe yönelik yaklaşımlara yöneltmiştir (Taubman & Nash, 2006: 555). Bu dönemde, mutans streptokokların diş yüzeyine tutunmasında rol oynayan yüzey proteinleri ve glukoziltransferaz enzimleri gibi spesifik virülans faktörleri ön plana çıkmıştır (Bowen & Koo, 2011: 69). Antijen I/II olarak bilinen yüzey adezinleri ile glukoziltransferazlara karşı

geliştirilen bağışıklama stratejileri, bakterilerin kolonizasyonunun ve biyofilm matriksinin oluşumunun engellenmesini hedeflemiştir (Russell & ark., 2004: 230).

90'lı yıllardan itibaren, mukozal immünizasyon kavramının gelişmesi ile birlikte, çürük aşları alanında yeni bir yaklaşım benimsenmiştir. İntranazal, oral veya tonsiller yol gibi mukozal uygulama yollarının, tükürükte özgül IgA yanıtlarını daha etkin şekilde indükleyebildiği saptanmıştır (Katz & ark., 1993: 1964; Russell & ark., 1999: 4). Hayvan çalışmalarında elde edilen başarılı sonuçlar, bu stratejilerin insanlarda da immünojenik yanıt oluşturabileceğini düşündürmüştü; fakat klinik uygulamaya geçiş sürecinde çeşitli biyolojik, etik ve metodolojik engellerle karşılaşmıştır (Russell & ark., 2004: 230). 2000'li yıllarla birlikte, genetik mühendisliği ve moleküler biyolojideki ilerlemeler, rekombinant proteinler, sentetik peptitler ve DNA temelli aşı yaklaşımlarının geliştirilmesine olanak sağlamıştır (Hajishengallis & Michalek, 1999: 1). Aynı dönemde, aktif bağışıklama dışında, monoklonal antikolar veya yumurta sarısından elde edilen özgül antikolar aracılığıyla pasif immünizasyon stratejileri de gündeme gelmiştir (Otake & ark., 1991: 162). Tüm bu yaklaşımlar, çürük gelişimini tamamen ortadan kaldırmaktan ziyade, karyojenik mikroorganizmaların patojenik etkilerini sınırlamayı ve oral ekosistemde daha dengeli bir mikrobiyal yapı oluşturmayı hedeflemiştir (Marsh & Zaura, 2017: 12). Günümüzde diş çürüğüne karşı etkili ve güvenli bir aşının klinik kullanıma sunulmamış olmasının temel sebebi, hastalığın multifaktöriyel doğası, ağız mikrobiyotasının karmaşıklığı ve uzun dönemli koruyuculuğun sağlanmasına ilişkin belirsizliklerdir (Pitts & ark., 2017: 1). Bununla birlikte, mukozal immünoloji alanındaki ilerlemeler ve çürük patogenezinin ilişkin artan bilgi birikimi, gelecekte daha hedeflenmiş ve güvenli immünolojik yaklaşımların geliştirilmesine zemin hazırlamaktadır (Taubman & Nash, 2006: 555).

Çürüğe karşı geliştirilen aşı yaklaşımlarındaki temel hedef, karyojenik mikroorganizmaların ağız ortamındaki varlığını tamamen ortadan kaldırmaktan öte bu mikroorganizmaların dental

yüzeyle tutunmasını, biyofilm içerisinde organize olmasını ve asidik metabolik aktivitelerini sınırlayabilmektir (Bowen & Koo, 2011: 69; Marsh, 2003: 279). Bu nedenle aşı tasarımında, bakterilerin yaşamsal fonksiyonlarından çok, çürük patogenezinde kritik rol oynayan virülans faktörleri ön plana çıkarılmıştır (Bowen & Koo, 2011: 69).

Mutans streptokoklara ait yüzey adezinleri, bu bağlamda en erken çalışılan hedefler arasında yer almaktadır (Russell & ark., 2004: 230). Antijen I/II olarak adlandırılan bu proteinler, bakterilerin tükürük pelikülü ile etkileşimini ve dış yüzeyine adezyonunu kolaylaştıran temel yapılar olarak tanımlanmıştır. Bu antijenlere karşı geliştirilen bağışıklık yanıtlarının, bakterilerin kolonizasyon kapasitesini azalttığı ve biyofilm oluşumunu sınırladığı gösterilmiştir (Brady & ark., 2010: 276; Smith & Taubman, 1987: 2562). Bir diğer önemli hedef grubu, mutans streptokokların ekstrasellüler polisakkarit sentezinden sorumlu olan glukoziltransferaz enzimleridir. Bu enzimler, sukroz varlığında gluklan üretimini sağlayarak biyofilm matriksinin oluşumunda kritik bir rol üstlenmektedir. Glukan üretiminin engellenmesi, biyofilmin yapısal bütünlüğünü bozarak bakterilerin dış yüzeylerinde kalıcı hale gelmesini zorlaştırmaktadır. Bu nedenle glukoziltransferazlara karşı geliştirilen aşı yaklaşımları, çürük patogenezinin erken basamaklarını hedefleyen stratejiler arasında kabul edilmektedir (Bowen & Koo, 2011: 69; Koo, Falsetta & Klein, 2013: 1065).

Son yıllarda, tek bir antijene yönelik bağışıklık oluşturmanın yeterli olmayabileceği görüşü ağırlık kazanmış ve çoklu antijen içeren aşı tasarımları gündeme gelmiştir (Russell & ark., 2004: 230). Bu yaklaşımda hedef, hem bakteriyel adezyonu hem de biyofilm matriksinin oluşumunu eş zamanlı olarak baskılayarak daha etkili bir koruyucu yanıt elde edebilmektir.

Dış çürüğüne karşı geliştirilen aşı yaklaşımları, oluşturulan immün yanıtın niteliğine bağlı olarak temelde aktif ve pasif immünizasyon stratejileri altında sınıflandırılmaktadır (Russell & ark., 2004: 230). Aktif immünizasyon, konağın kendi bağışıklık sistemini uyararak

özgül antikor yanıtı oluşturmayı hedeflerken; pasif immünizasyon, dışarıdan sağlanan antikorlar aracılığıyla kısa veya orta vadeli bir koruma sağlamayı amaçlamaktadır (Clem, 2011: 73). Aktif immünizasyon çalışmalarında, tam hücre aşıları, alt birim aşıları, sentetik peptitler ve rekombinant proteinler gibi farklı antijen formları kullanılmıştır (Russell & ark., 2004: 230). Hayvan modellerinde yapılan çok sayıda çalışmada, bu yaklaşımların çürük lezyonlarının sıklığını ve şiddetini azalttığı saptanmıştır (Lehner, Challacombe & Caldwell, 1975: 305; Russell & ark., 2004: 230). Bununla birlikte, tam hücre aşılarının bazı streptokokal antijenler aracılığıyla konak dokuları ile çapraz reaksiyon oluşturma potansiyeli, bu yaklaşımın klinik uygulamaya taşınmasını sınırlayan önemli bir faktör olmuştur (Taubman & Nash, 2006: 555). Bu sebeple çalışmalar, daha güvenli ve hedefe yönelik alt birim aşılara yönelmiştir (Lehner, Challacombe & Caldwell, 1975: 305; Taubman & Nash, 2006: 555). Pasif immünizasyon stratejileri ise, özellikle güvenlik endişelerinin ön planda olduğu durumlarda alternatif bir yaklaşım olarak değerlendirilmiştir. Monoklonal antikorlar ya da yumurta sarısından elde edilen özgül IgY antikorlarının kullanıldığı çalışmalarda, mutans streptokokların dış yüzeylerine adezyonunun geçici olarak inhibe edilebildiği gösterilmiştir (Ma & ark., 1990: 3407). Bu metodun en önemli sınırlılığı, sağlanan korumanın süreklilik göstermemesi ve tekrarlayan uygulamalar gerektirebilmesidir (Hajishengallis & Michalek, 1999: 1). Buna rağmen pasif immünizasyon, çürük riskinin yüksek olduğu dönemlerde destekleyici ve koruyucu bir strateji olarak dikkat çekmektedir (Hajishengallis & Michalek, 1999: 1; Otake & ark., 1991: 162).

Dış çürüğüne karşı geliştirilen aşı yaklaşımlarında, uygulama yolu en az antijen seçimi kadar kritik bir faktör olarak değerlendirilmektedir. Sistemik enfeksiyonlardan farklı olarak, çürük etkenlerinin ağırlıklı olarak oral kavite içinde lokalize olması, mukozal bağışıklık yanıtlarının önemini artırmaktadır. Bu sebeple parenteral uygulamalar yerine, mukozal immün yanıtı doğrudan uyaran aşılama yolları ön plana çıkmıştır (Russell & ark., 1999: 4).

İntranazal, oral ve tonsiller uygulama yolları, tükürükte özgül salgısal IgA yanıtlarının indüklenmesi açısından en sık çalışılan yöntemlerdir. Bu yollarla yapılan bağışıklamanın, yalnızca oral kavitede değil, ortak mukozal immün sistem aracılığıyla üst solunum yollarında da bağışıklık yanıtı oluşturabileceği saptanmıştır. Özellikle intranazal uygulamaların, düşük antijen dozlarıyla dahi güçlü bir mukozal yanıt oluşturabilmesi, bu metodu deneysel çalışmalarda öne çıkarmıştır (Holmgren & Czerkinsky, 2005: 45). Buna karşılık, intramüsküler veya subkutan uygulamalar ile elde edilen serum antikör yanıtlarının, ağız ortamında yeterli düzeyde koruma sağlamadığı görülmüştür. Bu bulgular, çürük aşılarının geliştirilmesinde mukozal immünizasyon stratejilerinin temel alınması gerektiğini açıkça ortaya koymaktadır (Taubman & Nash, 2006: 555).

Diş çürüğüne karşı aşı geliştirme sürecinde karşılaşılan en önemli zorluklardan biri, güvenlik konusundaki çekincelerdir. Streptokoklara ait bazı antijenlerin, konak dokuları ile yapısal benzerlik göstermesi ve teorik olarak otoimmün reaksiyonlara yol açabilme ihtimali, erken dönem araştırmalarda önemli bir endişe kaynağı olmuştur (Lehner, 1975: 125). Bir diğer önemli sorun, diş çürüğünün multifaktöriyel doğasıdır. Çürük gelişimi sadece bakteri varlığına değil; diyet alışkanlıkları, tükürük özellikleri, konak faktörleri ve davranışsal etkenlere de bağlıdır. Bu durum, aşı ile sağlanacak korumanın tek başına yeterli olmayabileceğini ve sonuçların bireyler arasında değişkenlik gösterebileceğini düşündürmektedir. Ayrıca klinik çalışmalarda, çürük gelişimini uzun dönemli ve objektif olarak değerlendirmek, metodolojik açıdan güçlükler içermektedir. Tüm bu faktörler, hayvan modellerinde elde edilen başarılı sonuçların insan çalışmalarına aktarılmasını sınırlamış ve bugüne kadar diş çürüğüne karşı ruhsatlandırılmış bir aşının geliştirilememesine sebep olmuştur (Marsh, 2003: 279).

Günümüzde diş çürüğüne karşı aşı geliştirme çalışmaları, daha seçici antijenler, yeni adjuvan sistemleri ve gelişmiş taşıyıcı platformlar üzerinde yoğunlaşmaktadır. Amaç, güçlü bir mukozal bağışıklık yanıtı oluştururken, olası yan etkileri en aza indirebilmektir (Russell

& ark., 1999: 4; Zhang, 2013: 960). Bunun yanında, aşıların tek başına bir çözüm olarak değil; florür uygulamaları, beslenme düzenlemeleri ve bireysel risk değerlendirmeleri ile birlikte, bütüncül bir koruyucu diş hekimliği yaklaşımının parçası olarak değerlendirilmesi gerektiği görüşü giderek güçlenmektedir (Featherstone, 2004: 39). Ek olarak son yıllarda, ağız mikrobiyotasının tamamen elimine edilmesi yerine, ekolojik dengenin yeniden düzenlenmesini hedefleyen yaklaşımlar ön plana çıkmaktadır. Bu bakış açısı, çürük aşılarının da patojen eradikasyonundan ziyade, mikrobiyal virülansın baskılanmasına odaklanması gerektiğini desteklemektedir (Marsh, 2003: 279).

Sonuç

Diş çürüğüne karşı aşı geliştirme çalışma ve çabaları, yaklaşık yarım yüzyıldır devam eden yoğun araştırmalara rağmen, henüz klinik rutine girmiş bir ürünle sonuçlanamamıştır. Bunun temel sebepleri arasında, hastalığın multifaktöriyel yapısı, mukozal bağışıklığın karmaşıklığı ve güvenlik konusundaki hassasiyetler yer almaktadır. Buna karşın, çürük patogenezi ile ilişkili artan bilgi birikimi ve immünoloji alanındaki ilerlemeler, gelecekte daha hedeflenmiş ve güvenli immünolojik stratejilerin geliştirilmesine olanak sağlayacaktır. Bu sebep ile diş çürüğü aşıları, günümüzde deneysel bir araştırma alanı olmayı sürdürmekle birlikte, koruyucu diş hekimliğinin uzun vadeli hedefleri arasında yer almaya devam etmektedir.

Kaynakça

Bowen, W. H. & Koo, H. (2011). Biology of Streptococcus mutans-derived glucosyltransferases: Role in extracellular matrix formation of cariogenic biofilms. *Caries Research*, 45 (1), 69-86.

Brady, L. J., Maddocks, S. E., Larson, M. R., Forsgren, N., Persson, K., Deivanayagam, C. C. & Jenkinson, H. F. (2010). The changing faces of Streptococcus antigen I/II polypeptide family adhesins. *Molecular Microbiology*, 77 (2), 276-286.

Brandtzaeg, P. (2007). Do salivary antibodies reliably reflect both mucosal and systemic immunity? *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1098 (1), 288-311.

Brandtzaeg, P. (2013). Secretory immunity with special reference to the oral cavity. *Journal of Oral Microbiology*, 5 (1), 1-13.

Clem, A. S. (2011). Fundamentals of vaccine immunology. *Journal of Global Infectious Diseases*, 3 (1), 73-78.

Dewhirst, F. E., Chen, T., Izard, J., Paster, B. J., Tanner, A. C., Yu, W. H., Lakshmanan, A. & Wade, W. G. (2010). The human oral microbiome. *Journal of Bacteriology*, 192 (19), 5002-5017.

Featherstone, J. D. B. (2003). The caries balance: Contributing factors and early detection. *Journal of the California Dental Association*, 31 (2), 129-133.

Featherstone, J. D. B. (2004). The continuum of dental caries—Evidence for a dynamic disease process. *Journal of Dental Research*, 83 (1 Suppl), 39-42.

Gibbons, R. J. & Banghart, S. B. (1967). Synthesis of extracellular dextran by cariogenic bacteria and its presence in human dental plaque. *Archives of Oral Biology*, 12 (1), 11-24.

Hajishengallis, G. & Michalek, S. M. (1999). Current status of a mucosal vaccine against dental caries. *Oral Microbiology and Immunology*, 14 (1), 1-20.

Holmgren, J. & Czerkinsky, C. (2005). Mucosal immunity and vaccines. *Nature Medicine*, 11 (Suppl 4), S45-S53.

Katz, J., Harmon, C. C., Buckner, G. P., Richardson, G. J., Russell, M. W. & Michalek, S. M. (1993). Protective salivary immunoglobulin A responses against *Streptococcus mutans* infection after intranasal immunization with *S. mutans* antigen I/II coupled to the B subunit of cholera toxin. *Infection and Immunity*, 61 (5), 1964-1971.

Koo, H., Falsetta, M. L. & Klein, M. I. (2013). The exopolysaccharide matrix: A virulence determinant of cariogenic biofilm. *Journal of Dental Research*, 92 (12), 1065-1073.

Lehner, T. (1975). Immunological aspects of dental caries and periodontal disease. *British Medical Bulletin*, 31 (2), 125-130.

Lehner, T., Challacombe, S. & Caldwell, J. (1975). An immunological investigation into the prevention of caries in deciduous teeth of rhesus monkeys. *Archives of Oral Biology*, 20 (5-6), 305-310.

Ma, J., Hunjan, M., Smith, R., Kelly, C. & Lehner, T. (1990). An investigation into the mechanism of protection by local passive immunization with monoclonal antibodies against *Streptococcus mutans*. *Infection and Immunity*, 58 (10), 3407-3414.

Marsh, P. D. (1994). Microbial ecology of dental plaque and its significance in health and disease. *Advances in Dental Research*, 8 (2), 263-271.

Marsh, P. D. (2003). Are dental diseases examples of ecological catastrophes? *Microbiology*, 149 (2), 279-294.

Marsh, P. D. (2004). Dental plaque as a microbial biofilm. *Caries Research*, 38 (3), 204-211.

Marsh, P. D. & Zaura, E. (2017). Dental biofilm: Ecological interactions in health and disease. *Journal of Clinical Periodontology*, 44 (Suppl 18), S12-S22.

Mestecky, J., Strober, W., Russell, M. W., Cheroutre, H., Lambrecht, B. N. & Kelsall, B. L. (2015). *Mucosal immunology*. London: Academic Press.

Otake, S., Nishihara, Y., Makimura, M., Hatta, H., Kim, M., Yamamoto, T. & Hirasawa, M. (1991). Protection of rats against dental caries by passive immunization with hen-egg-yolk antibody (IgY). *Journal of Dental Research*, 70 (3), 162-166.

Pitts, N. B., Zero, D. T., Marsh, P. D., Ekstrand, K., Weintraub, J. A., Ramos-Gomez, F., Tagami, J., Twetman, S., Tsakos, G. & Ismail, A. I. (2017). Dental caries. *Nature Reviews Disease Primers*, 3 (1), 1-16.

Rose, P. T., Gregory, R. L., Gfell, L. E. & Hughes, C. V. (1994). IgA antibodies to *Streptococcus mutans* in caries-resistant and susceptible children. *Pediatric Dentistry*, 16 (4), 272-275.

Russell, M. W., Hajishengallis, G., Childers, N. K. & Michalek, S. M. (1999). Secretory immunity in defense against cariogenic mutans streptococci. *Caries Research*, 33 (1), 4-15.

Russell, M. W., Childers, N. K., Michalek, S. M., Smith, D. J. & Taubman, M. A. (2004). A caries vaccine? The state of the science of immunization against dental caries. *Caries Research*, 38 (3), 230-235.

Selwitz, R. H., Ismail, A. I. & Pitts, N. B. (2007). Dental caries. *The Lancet*, 369 (9555), 51-59.

Smith, D. J. (2002). Dental caries vaccines: Prospects and concerns. *Critical Reviews in Oral Biology & Medicine*, 13 (4), 335-349.

Smith, D. J. & Taubman, M. A. (1987). Oral immunization of humans with *Streptococcus sobrinus* glucosyltransferase. *Infection and Immunity*, 55 (11), 2562-2569.

Taubman, M. A. & Nash, D. A. (2006). The scientific and public-health imperative for a vaccine against dental caries. *Nature Reviews Immunology*, 6 (7), 555-563.

Watt, R. G. (2012). Social determinants of oral health inequalities: Implications for action. *Community Dentistry and Oral Epidemiology*, 40 (Suppl 2), 44-48.

Zhang, S. (2013). Dental caries and vaccination strategy against the major cariogenic pathogen, *Streptococcus mutans*. *Current Pharmaceutical Biotechnology*, 14 (11), 960-966.

BÖLÜM 5

RESIN MATRIX SYSTEMS USED IN RESTORATIVE DENTISTRY: CURRENT ADVANCES

Özge DUMAN ÖZBİLGİ¹

Conceptual Framework and Evolution of Resin Matrix Systems

Resin-based composite restorative materials have been widely used in dentistry since the late 1950s (Al-Ibrahim et al., 2025). Methacrylate-based composites emerged in the 1960s with the development of the Bis-GMA monomer by Dr. Rafael Bowen and soon became incorporated into clinical practice (German, 2022). These materials have emerged as viable alternatives to traditional restorative materials such as amalgam owing to their superior esthetic properties, reliable adhesion to dental tissues, and wide spectrum of clinical applications (Al-Ibrahim et al., 2025; Alomran et al., 2025).

Composite resins consist primarily of three main components: a resin matrix, inorganic fillers, and a coupling agent.

¹ Assoc. Prof., Istanbul Biruni University, Faculty of Dentistry, Department of Restorative Dentistry, dtdumanozge@gmail.com, 0000-0003-0521-4318

In addition to these major constituents, small amounts of polymerization initiators and accelerators, as well as inorganic oxide pigments for shade modification, may also be incorporated (Mitchell, 2019). The organic matrix phase of most composite resins consists of a mixture of monomers with varying molecular chain lengths that can chemically bond and form a rigid structure. Contemporary composite resins primarily contain an organic matrix composed of base dimethacrylate monomers copolymerized with a low-viscosity co-monomer. This combination is essential to allow the incorporation of a high percentage of inorganic filler particles while ensuring high reactivity, favorable mechanical properties, and suitable clinical handling (Fugolin et al., 2020).

Modern composite formulations largely rely on methacrylate-based monomers, including Bis-GMA, UDMA, Bis-EMA, and TEGDMA. Although low-viscosity diluent monomers are incorporated to enhance material handling, higher concentrations of these components can contribute to increased polymerization shrinkage, which may promote marginal gap formation and microleakage. As a result, considerable research has focused on developing alternative monomer systems designed to minimize shrinkage and the associated stress during polymerization (Anusavice et al., 2012; Feng et al., 2010; Mitchell, 2019).

Moreover, recent research has increasingly focused on the development of advanced monomeric and filler technologies designed to mitigate key clinical challenges, including polymerization shrinkage, hydrolytic degradation associated with water sorption, and the initiation of secondary caries lesions (Cho et al., 2022). In a comprehensive evaluation conducted by Dantaghan et al., it was reported that 70.3% of the 543 examined resin-based dental materials contained BPA-derived monomers. Bis-GMA and Bis-EMA were identified as the most frequently used monomers, whereas UDMA, TEGDMA, and HEMA were predominantly found

in BPA-free formulations. Only 3.9% of the investigated materials were documented to be completely free of these monomers (Dantagnan et al., 2024). This diversity enables contemporary composite resin formulations to be optimized not only for mechanical performance but also for polymerization shrinkage, color stability, biocompatibility, and chemical durability.

Monomer Systems

Bis-GMA (Bisphenol A Glycidyl Methacrylate)

Bis-GMA was first introduced by Rafael Bowen in 1962 for use in dental composite materials. Compared with methyl methacrylate (MMA), its primary advantage lies in its substantially higher molecular weight (512 g/mol versus 100 g/mol) and the presence of two methacrylate double bonds per molecule, which confer a high cross-linking capability and enable the formation of a rigid, thermoset polymer network (Ferracane, 2024).

The rigid aromatic backbone of Bis-GMA enhances the mechanical properties of the material, providing greater strength and long-term durability. The monomer is synthesized either through the addition reaction of glycidyl methacrylate with bisphenol A or by reacting methacrylic acid with bisphenol A diglycidyl ether. During this process, ring-opening of the epoxide groups generates secondary alcohol groups and ether linkages. These hydroxyl groups represent a key determinant of the monomer's physicochemical behavior and have a direct influence on its viscosity (Ogliari et al., 2008).

Because of this aromatic backbone, strong and extensive intermolecular hydrogen bonding occurs between the hydroxyl groups of Bis-GMA. Consequently, the monomer exhibits a very high viscosity at room temperature (≈ 1100 Pa·s) (Fugolin et al., 2020; Kalachandra & Kusy, 1991; Stansbury, 2012). Therefore, Bis-GMA-based resins are commonly formulated with low-viscosity diluent co-monomers such as TEGDMA to facilitate adequate

double-bond conversion and allow higher filler loading (Melo et al., 2024).

However, the ability of the hydroxyl groups within the Bis-GMA structure to form hydrogen bonds with water increases the material's water sorption, which may lead to hydrolytic degradation and a loss of dimensional stability over time (Kalachandra & Kusy, 1991). In recent years, growing concern has emerged regarding the presence of bisphenol A (BPA) as a potential degradation by-product in Bis-GMA-containing dental resins. This issue is of particular importance due to its implications for biocompatibility and patient safety (Fugolin et al., 2020). Both *in vitro* and *in vivo* studies have reported that Bis-GMA may exhibit cytotoxic properties, induce inflammatory responses, and contribute to allergic reactions or contact dermatitis. Moreover, exposure to BPA has been associated with pseudoestrogenic activity and has been linked to various systemic effects, including metabolic disturbances, endocrine dysregulation, cardiovascular diseases, diabetes, DNA double-strand breaks, and an increased risk of breast and prostate cancers (Al-Ibrahim et al., 2025).

TEGDMA (Triethylene Glycol Dimethacrylate)

TEGDMA is a low-molecular weight, low-viscosity monomer that is commonly incorporated as a diluent to reduce the high viscosity of Bis-GMA-based resin matrices (Ferracane, 2006). In composite resin systems, increasing the proportion of TEGDMA lowers the overall viscosity of the formulation thereby improving molecular mobility and facilitating a higher degree of polymerization. Nevertheless, its low molecular weight and elevated density of reactive methacrylate groups promote the formation of a tightly cross-linked polymer network. This structural outcome is associated with greater volumetric shrinkage, which may induce interfacial stresses, compromise marginal integrity, and heighten the

likelihood of microleakage. Consequently, the amount of TEGDMA incorporated into a formulation plays a pivotal role in maintaining an optimal balance between conversion efficiency and polymerization-related shrinkage (Ge et al., 2005).

The flexible and weak polar bonds within the TEGDMA molecular chain facilitate tighter packing of filler particles in the composite resin, thereby improving the material's handling properties. However, TEGDMA also presents notable drawbacks. Increased TEGDMA content is associated with higher water sorption, greater polymerization shrinkage, reduced mechanical strength, and compromised color stability — all of which may negatively influence the clinical performance of the material (Kumar et al., 2016). In terms of long-term water sorption, monomers generally follow the order TEGDMA > Bis-GMA > UDMA > HMDMA. This variation is attributed to the hydrophilic ether linkages in TEGDMA, the hydroxyl groups in Bis-GMA, the urethane bonds in UDMA, and the hydrophilic ester groups present in all structures (Ferracane, 2006). In addition, evidence suggests that TEGDMA may enhance the proliferation of key oral microorganisms such as *Lactobacillus acidophilus* and *Streptococcus sobrinus* (Hansel et al., 1998).

Bis-EMA (Ethoxylated Bisphenol A-dimethacrylate)

Bis-EMA is formed by substituting one of the hydroxyl groups of the Bis-GMA monomer with ethoxy groups. Although Bis-EMA has a molecular weight comparable to that of Bis-GMA, it exhibits substantially lower viscosity. This reduction in viscosity enhances monomer mobility during polymerization, allowing Bis-EMA to achieve a higher degree of conversion and a more densely cross-linked polymer network compared with Bis-GMA (Cornelio et al., 2014). Studies have also shown that incorporating Bis-EMA into a Bis-GMA/TEGDMA/UDMA copolymer matrix reduces the

amount of TEGDMA released from the polymerized composite (Krasowski et al., 2024).

Bis-EMA may contain ethylene oxide chains of varying lengths between its aromatic core and the functional methacrylate groups, which results in monomers with different molecular weights. As the degree of ethoxylation increases, the viscosity of the monomer decreases further, leading to a higher degree of polymerization conversion; however, this modification can also elevate water sorption and negatively influence flexural strength (Alshali et al., 2015). Nevertheless, the low viscosity of Bis-EMA allows the incorporation of higher amounts of inorganic filler into the resin system, thereby enhancing the mechanical properties of composite resins (Bingül et al., 2025).

UDMA (Urethane Dimethacrylate)

UDMA is a dimethacrylate monomer with a lower molecular weight than Bis-GMA and therefore exhibits slightly greater polymerization shrinkage. However, its ability to form strong hydrogen bonds through the amide group contributes to superior mechanical strength. Today, UDMA has become one of the primary commercially available alternatives to BPA-derived monomers (Melo et al., 2024).

Compared with both Bis-GMA and TEGDMA, UDMA possesses a linear molecular structure characterized by substantial flexibility, two reactive methacrylate end groups, and an amide functionality capable of forming intermolecular hydrogen bonds. Because the N–H···O hydrogen bond in UDMA is weaker than the O–H···O hydrogen bond present in Bis-GMA, its viscosity is considerably lower than that of Bis-GMA. The viscosity of UDMA ranges between 5.00 and 23.10 Pa·s, which is higher than the 0.003–0.1 Pa·s range reported for TEGDMA, yet still provides a formulation advantage in clinical applications (Yang et al., 2025).

Owing to these properties, UDMA has become a monomer that is increasingly favored in many composite resin systems, either partially or completely replacing Bis-GMA (Khatri et al., 2003).

TCD (Tricyclodecane)–Based Monomer Systems

Urethane methacrylate derivatives containing a TCD structure are synthesized through reaction steps involving hydroxyalkyl (meth)acrylate esters with diisocyanates, followed by subsequent reactions with polyols. Similar to bisphenol-A–based structures, the TCD–urethane structure provides a rigid molecular framework, imparting high stiffness to the monomers (Reiners et al., 1990). According to manufacturer data, the low viscosity of TCD-urethane allows it to eliminate the need for diluent monomers in Bis-GMA–based composites, enabling simplified formulations while maintaining adequate handling properties. In addition, resin composites formulated with TCD-urethane have been reported to exhibit lower polymerization shrinkage and reduced shrinkage stress compared with conventional dimethacrylate systems. Due to steric restrictions limiting chain mobility, urethane derivatives of 1,3-bis(1-isocyanato-1-methylethyl)benzene display characteristics similar to those of Bis-GMA; indeed, the EP 0934926 patent specifies that such structures may serve as substitutes for Bis-GMA in dental composite formulations (Ilie & Hickel, 2011; Utterodt et al., 2008).

The mechanical reinforcement provided by TCD-based monomers in composite resins, as well as their enhanced resistance to aging, has also been demonstrated at the macroscopic level. The aliphatic nature of the TCD-urethane structure increases the reactivity of the urethane groups, thereby elevating the cross-link density within the polymer network and contributing to a more stable resin matrix. These favorable physicochemical and mechanical characteristics of TCD urethane methacrylates have encouraged the

development of more specialized monomer systems through modification with various functional groups (Durner et al., 2012; Schmidt & Ilie, 2012).

Within this context, TCD-DI-HEA—a derivative incorporating a TCD core and modified with urethane linkages—has emerged as a promising alternative monomer system for dental composite resins. The presence of carbamate (urethane) bonds provides increased resistance to enzymatic hydrolysis and biotransformation in the oral environment, resulting in superior biological stability. Furthermore, the rigid tricyclic TCD structure sterically limits chain mobility during polymerization, while the reactive urethane groups support radical polymerization kinetics and help generate a more uniform polymer network. As a result, polymerization stress develops in a more controlled manner, yielding a more balanced distribution of cross-links within the final composite structure (Boaro et al., 2010).

These structural advantages provided by the TCD core enable modified derivatives such as TCD-DI-HEA to exhibit superior characteristics compared with conventional dimethacrylate monomers, both in terms of physical performance and biological stability.

HDDMA (1,6-Hexanediol Dimethacrylate)

Although HDDMA carries reactive groups similar to those of Bis-GMA, it possesses a longer and more flexible molecular structure. Owing to these characteristics, it is commonly used as a cross-linking agent or as a functional monomer component in polymer systems. Its relatively low molecular weight of approximately 252 g/mol and linear architecture help reduce the overall viscosity of the resin system, thereby enabling the incorporation of higher amounts of inorganic fillers or additional components into the formulation (Sunarintyas et al., 2014). Because

of its favorable solubility characteristics, HDDMA can also function as a diluent monomer. Additionally, it has been reported to exhibit significantly lower water sorption compared with TEGDMA (Szczesio-Wlodarczyk et al., 2022).

The absence of benzene rings and hydroxyl groups—both of which are present in Bis-GMA—in the chemical structure of HDDMA reduces its interaction with water and limits its contribution to hydrolytic degradation. Newly developed aliphatic and aromatic urethane dimethacrylate monomers containing a phenyl methoxy group on the side chain have been shown to markedly decrease the water sorption and aqueous solubility of urethane-based dimethacrylate systems (Alomran et al., 2025). This structural advantage also contributes to reducing the amount of potentially leachable components that may diffuse from the resin matrix into surrounding tissues, thereby improving the overall biocompatibility profile of the material. Indeed, studies have demonstrated that HDDMA-based systems exhibit lower cytotoxic effects on fibroblast cell viability compared with commercial Bis-GMA-based composites (Sunarintyas et al., 2016).

Silorane

Siloranes constitute a unique monomer system formed through the reaction between oxirane and siloxane units. This hybrid structure integrates the low polymerization shrinkage characteristic of ring-opening oxirane monomers with the increased hydrophobic behavior contributed by siloxane components, resulting in notable material advantages (Ilie & Hickel, 2006). The reduced shrinkage observed in silorane systems originates from the cationic ring-opening polymerization of cyclic epoxides. This polymerization pathway is considered a highly desirable feature in modern composite resins when compared with conventional acrylate-based

matrices, owing to its ability to minimize volumetric contraction (Madhyastha et al., 2025).

The silorane molecule contains a siloxane-based core with four oxirane rings that can undergo ring opening to participate in polymerization. The opening of these oxirane rings produces a volumetric expansion that partially compensates for the contraction normally associated with covalent bond formation, thereby markedly reducing overall polymerization shrinkage. According to published data, the total volumetric shrinkage of a commercial silorane-based composite is reported to be below 1.0%, which is substantially lower than the typical 2.0–3.5% shrinkage range observed in Bis-GMA-based composites (Boaro et al., 2010).

The cyclohexene-oxide type oxirane rings present within silorane structures exhibit markedly higher reactivity compared with conventional epoxy analogs. Meanwhile, the hydrophobic siloxane backbone counteracts the inherent hydrophilicity of the polyether chains formed during ring-opening polymerization, enhancing the overall hydrophobic character of the system. Together, these structural features contribute to reduced water sorption and promote a more favorable biocompatibility profile for silorane-based composites relative to traditional methacrylate resin systems (Palin et al., 2005).

The behavior of siloranes in biological environments has been extensively examined across various experimental models. Findings indicate that silorane systems exhibit substantially lower mutagenic potential compared with structurally related oxirane compounds. Moreover, studies have shown that silorane monomers remain stable and insoluble in media designed to simulate biological fluids—such as epoxide hydrolase preparations, porcine liver esterase solutions, and dilute hydrochloric acid. This chemical stability suggests notable resistance to biotransformation and indicates that the release of degradation by-products capable of

diffusing into surrounding tissues is minimal (Eick et al., 2006; Schweikl et al., 2004). Collectively, these advantageous features—including reduced polymerization shrinkage, high hydrophobicity, pronounced biological stability, and lower mutagenic potential—position silorane monomers as a strong alternative monomer system for use in dental composite formulations.

Ormocer

Alternative resin matrices with inorganic–organic hybrid structures were introduced in the polymer industry nearly two decades ago and were later adapted for use in dental restorative composites. Unlike conventional methacrylate-based matrices, which consist entirely of organic components, these systems incorporate organic polymerizable groups—bearing carbon–carbon double bonds—chemically linked to an inorganic Si–O–Si (siloxane) backbone. The resulting hybrid network can exhibit a viscosity comparable to that of Bis-GMA, and therefore may still require the inclusion of viscosity-modifying monomers such as TEGDMA in the formulation (Van Noort & Barbour, 2023). Additionally, the Ormocer structure is inherently more rigid than methacrylate-based monomers, which may lead to increased stress at the filler–resin matrix interfacea (Augusto et al., 2022).

BADEP (Bis-Acrylic Di-Epoxy)

BADEP is a bifunctional monomer containing two polymerizable acrylate groups, allowing it to function as an effective cross-linking agent within the resin matrix during photopolymerization. Owing to this structural capability, it promotes the formation of covalent linkages between polymer chains, contributing to the development of a continuous, three-dimensional network. The cross-linked structural network formed by BADEP enhances the mechanical strength and dimensional stability of the polymer matrix, while limiting chain mobility and resulting in a

more compact and coherent structure. Consequently, BADEP is regarded as a key structural monomer for reinforcing the polymer network in resin-based dental materials (Besegato et al., 2025; Gao et al., 2025).

HEMA (Mono-methacrylate 2-Hydroxyethyl)

HEMA was incorporated into dental adhesive formulations in the late 1960s due to its pronounced water-chasing ability, which facilitated bonding to moist dentin surfaces during the early total-etch procedures. Today, HEMA is used not only in conventional adhesive systems but also in self-adhesive composites and various experimental resin formulations, largely because its hydrophilic nature enhances wetting and contributes favorably to polymerization behavior (Barcelos et al., 2020; Makishi et al., 2015).

HEMA is a distinctly hydrophilic monomer that readily absorbs water both before and after polymerization. In the pre-polymerization phase, water uptake can dilute the monomer mixture, thereby interfering with polymerization kinetics. After polymerization, HEMA retains its hydrophilic character, which may lead to undesirable outcomes such as water absorption, discoloration, and gradual deterioration of mechanical properties. Moreover, incorporating high concentrations of HEMA into a formulation tends to promote the formation of more flexible and porous polymer networks, ultimately compromising the integrity and mechanical strength of the resin matrix (Van Landuyt et al., 2007).

GPDM (Glycerolphosphate dimethacrylate)

Glycerolphosphate dimethacrylate (GPDM) is one of the acidic functional monomers commonly incorporated into dentin bonding agents. These monomers are notable for their ability to promote adhesion through both mechanical interactions and potential chemical bonding with dental tissues. GPDM is considered one of the first functional monomers capable of chemically

interacting with tooth substrates and penetrating the surface to enhance dentin adhesion (Ferracane, 2011).

GPDM and similar monomers possess a relatively short spacer chain that positions the phosphate and methacrylate terminal groups in proximity. This structural arrangement contributes to the monomer's small molecular size, low molecular weight, and inherently hydrophilic character. These features make GPDM particularly effective as a functional monomer in the etch-and-rinse (E&R) bonding approach (Delgado et al., 2025; Ferracane, 2011).

However, the literature indicates that the bonding performance of GPDM may be inferior to that of some other functional monomers, and that it may exhibit an etching-like effect rather than forming a stable chemical interaction with mineralized substrates. This behavior has been attributed to the monomer's pronounced hydrophilicity and its limited capacity for chemical interaction (Delgado et al., 2025).

10-MDP (10-Methacryloyloxydecyl Dihydrogen Phosphate)

When applied to dentin or enamel, 10-MDP interacts with the mineral phase of hydroxyapatite through its acidic phosphate group, initiating a mild demineralization process. This selective etching is characterized by the removal of limited amounts of Ca^{2+} , PO_4^{3-} , and OH^- ions from the outermost hydroxyapatite crystals. Simultaneously, the released calcium ions can bind to the unreacted phosphate moieties of 10-MDP, enabling the formation of stable 10-MDP–Ca complexes (Bista et al., 2016).

Thanks to its distinctive molecular design—particularly the long alkyl spacer chain—10-MDP can align parallel to the hydroxyapatite (HAp) surface and self-assemble into three-dimensional nanolayers. These nanolayers are stabilized by calcium-mediated phosphate bridges, while the methacrylate end groups can co-polymerize efficiently with the resin matrix. Consequently, a

highly organized, mechanically robust, and hydrolytically more stable interfacial structure is formed. Studies have shown that 10-MDP exhibits greater hydrolytic stability than other functional monomers such as 4-META, GPDM, and phenyl-P. This advantage is mainly attributed to the low solubility of 10-MDP–Ca complexes, the hydrophobic character provided by its long hydrocarbon chain, and the stronger, more durable interactions formed with Hap (Delgado et al., 2025).

10-MDP has been reported to inhibit the activity of matrix metalloproteinases—particularly MMP-9—at the bonding interface, thereby reducing collagen degradation and nano leakage. This inhibitory effect is further strengthened by the formation of stable 10-MDP–Ca complexes (Jin et al., 2022).

DX-511

DX-511 is a high-molecular weight urethane dimethacrylate monomer composed of a rigid central core and flexible terminal groups. The rigid core limits molecular mobility during polymerization, helping to reduce shrinkage, while the flexible end chains enhance monomer reactivity and improve the degree of conversion, which is often low in long-chain dimethacrylates (Fatma et al., 2020; Moradi et al., 2022). Its bulky molecular structure is reported to limit passage through cellular membranes, which contributes to its reduced toxicity potential (Sideridou et al., 2015).

The low carbon–carbon double bond density of DX-511 further limits volumetric changes during polymerization, thereby helping to reduce marginal shrinkage. The high molecular weight of this modified UDMA resin—originally developed by DuPont and incorporated into GC’s Kalore composite—allows for a markedly lower polymerization shrinkage compared with conventional Bis-GMA and UDMA monomers (Ferracane, 2011; Ilie et al., 2013).

Innovative Monomers and Advanced Resin Matrix Strategies

2EMATE-BDI (2-hydroxy-1-ethyl methacrylate)

2EMATE-BDI is a newly synthesized diurethane dimethacrylate monomer characterized by its rigid structure, relatively high molecular weight (≈ 560 g/mol), pronounced hydrophobicity ($\log P \approx 5.33$), high reactivity, and low viscosity. One of its most notable advantages is the substantial reduction in polymerization stress—reported to be around 30–50%—attributed largely to its higher molecular mass. Resin systems incorporating 2EMATE-BDI have also been shown to exhibit significantly lower molar C=C concentrations compared with Bis-GMA controls and UDMA–TEGDMA blends (approximately 23% and 30.5% lower, respectively). The reduced double-bond density contributes directly to decreased volumetric shrinkage and, consequently, lower polymerization stress (Fugolin et al., 2020).

The lower concentration of vinyl groups in 2EMATE-BDI systems results in longer cross-link distances and a comparatively more relaxed polymer network. Considering the flexibility of urethane linkages and the slower polymerization kinetics, this structural arrangement is thought to facilitate the dissipation and absorption of stress generated during polymerization (Alomran et al., 2025).

Exothane

Elastomeric urethane monomers were developed to enhance the viscoelastic behavior of composite resins, reduce elastic modulus, and improve wear and chemical resistance. Among them, Exothane-24 exhibits more favorable physicochemical characteristics compared with UDMA and Bis-GMA. Owing to its elastomeric nature and high molecular size, it increases polymer network mobility and stress-relaxation capacity. Its high elongation and toughness enable a reduction in polymerization shrinkage-induced

stress, and it has been reported to support the preservation of adhesive integrity, particularly in restorations with high C-factor cavities (de Oliveira et al., 2022; Münchow et al., 2014).

DDTU-IDI ((3,9-diethyl-1,5,7,11-tetraoxaspiro[5,5]undecane-3,9-diyl)bis(methylene) bis((2-(3-(prop-1-en-2-yl)phenyl)propan-2-yl)carbamate))

DDTU-IDI is a new-generation, high-molecular weight monomer engineered to minimize polymerization shrinkage. Its spiro-based core enables volumetric expansion through ring-opening polymerization, while the low density of carbon-carbon double bonds further contribute to reduced shrinkage. In addition, the rigid benzene rings incorporated into the structure help maintain adequate mechanical strength within the polymer network. This combination of features aims to utilize the shrinkage-reducing benefits of spiro-orthocarbonates (SOCs) without compromising the mechanical performance of the final material (Zhou et al., 2024).

MDPB (Methacryloyloxylododecyl Pyridinium Bromide)

MDPB is a new-generation monomer synthesized by combining a polymerizable methacryloyl group with the antibacterial moiety dodecylpyridinium. Unlike conventional antibacterial systems, MDPB copolymerizes with other methacrylates within the resin matrix and becomes chemically integrated into the polymer network. As a result, no antibacterial agent is released from the material (Imazato et al., 1995). MDPB has been shown to exhibit broad-spectrum antibacterial activity against various oral streptococcal species, including *Streptococcus mutans*. When incorporated at concentrations of 0.1%–0.2%, it effectively inhibits bacterial accumulation on the material surface through a contact-killing mechanism, without compromising key mechanical properties of the composite such as compressive, tensile, or flexural strength (Imazato, 2003; Zalega & Bociong, 2024).

DMAHDM (Dimethylaminohexadecyl Methacrylate Dimethacrylate)

DMAHDM has been investigated as an antibacterial monomer incorporated into composite resins in laboratory studies, where it has demonstrated a notable ability to reduce biofilm formation (Al-Ibrahim et al., 2025). In vitro studies have shown that the minimum inhibitory concentration of DMADDM is 6.25 µg/mL, while its minimum bactericidal concentration is 25 µg/mL. Dental materials modified with this monomer have been reported to significantly inhibit biofilm formation by various bacteria—particularly *Helicobacter pylori*—in restorative applications. Although the antibacterial efficacy of DMADDM appears strong and promising, comprehensive investigations on cytotoxicity, biocompatibility, and long-term stability are required before it can be safely translated into clinical practice (Zalega & Bociong, 2024).

HMTIB (2-hydroxy-3-methacryloyloxypropyl-(2,3,5-triiodobenzoate))

HMTIB is a functional methacrylate monomer developed to enhance the radiopacity of resin-based composites due to its high iodine content. The triiodobenzoate group in its structure enables effective attenuation of X-rays, as iodine possesses a high atomic number and electron density. Studies by He et al. reported that HMTIB, when incorporated into E-glass fiber-reinforced composites formulated with Bis-GMA and MMA, significantly increased radiopacity. Additionally, composites containing HMTIB demonstrated higher flexural strength and elastic modulus, along with reduced water sorption, compared with control groups. These findings indicate that HMTIB not only imparts radiopacity but also favorably improves the mechanical and physicochemical properties of composites, highlighting its potential as a promising next-generation monomer (He et al., 2012).

POSS (Polyhedral Oligomeric Silsesquioxane)

POSS refers to organosilicon hybrid materials composed of a three-dimensional, chemically substituted, and thermally stable inorganic silicon–oxygen core to which organic substituents are covalently bonded (Wang et al., 2022). In recent years, POSS has gained attention in dental composite research due to its favorable biocompatibility, customizable chemical structure, and nano-reinforcement potential. When incorporated into resin systems, POSS can help lower polymerization shrinkage and associated stress, while also enhancing mechanical performance and reducing water sorption. Nevertheless, at higher loading levels, particle aggregation may lead to undesirable effects, and its integration into commercially available dental composites is still limited (Ozimek et al., 2023).

BisDMA (Bisphenol a Dimethacrylate)

Among BPA-derived monomers, BisDMA is the only one known to undergo salivary esterase–mediated degradation directly into BPA. Due to this degradation pathway, the use of BisDMA in dental resin materials has been almost entirely phased out (Vervliet et al., 2019).

Fundamental Considerations in Monomer Selection for Dental Composite Resins

The structure and selection of monomers are among the key determinants of the polymerization behavior, mechanical performance, and clinical longevity of dental composites. Parameters such as molecular weight, the number of functional groups, and molecular architecture directly influence polymerization shrinkage, cross-link density, water sorption, and long-term dimensional stability. In general, high–molecular-weight and rigid monomers (such as Bis-GMA and UDMA) provide lower polymerization shrinkage and greater mechanical strength, whereas

low-viscosity diluent monomers (e.g., TEGDMA) enhance handling properties but are associated with increased shrinkage and higher water uptake. For this reason, contemporary composite resin formulations typically rely on tailored combinations of monomers to achieve a balance between viscosity and workability on the one hand, and dimensional stability and mechanical durability on the other (Stansbury, 2012).

In cross-linked polymer networks, water-induced swelling and the diffusion-driven release of residual unreacted monomers are critical factors that can influence the long-term mechanical performance and biological behavior of the material (Sideridou & Achilias, 2005). In this context, the implementation of effective polymerization protocols is as crucial as the appropriate selection of monomers for achieving clinical success. Consequently, the use of monomer systems that exhibit high degrees of conversion, low shrinkage potential, and chemical stability is regarded as a key determinant of the long-term clinical performance of dental composites (Dantagnan et al., 2024; Tkáčiková & Sabo, 2023).

References

Al-Ibrahim, I., Shono, N., Al-Saud, L., et al. (2025). Five years of restorative resin-based composite advancements: A narrative review. *BMC Oral Health*, 25(1), 1061.

<https://doi.org/10.1186/s12903-025-05816-7>

Alomran, W. K., Nizami, M. Z. I., Xu, H. H., et al. (2025). Evolution of dental resin adhesives—A comprehensive review.

Journal of Functional Biomaterials, 16(3), 104.

<https://doi.org/10.3390/jfb16030104>

Alshali, R. Z., Salim, N. A., Sung, R., et al. (2015). Qualitative and quantitative characterization of monomers of uncured bulk-fill and conventional resin-composites using liquid chromatography/mass spectrometry. *Dental Materials*, 31(6), 711–720.

<https://doi.org/10.1016/j.dental.2015.03.010>

Anusavice, K. J., Shen, C., & Rawls, H. R. (2012). *Phillips' science of dental materials* (12th ed.). Elsevier Health Sciences.

Augusto, M. G., de Andrade, G. S., Mathias-Santamaria, I. F., et al. (2022). Comparison of polishing systems on the surface roughness of resin-based composites containing different monomers. *Journal of Composites Science*, 6(5), 146.

Barcelos, L. M., Borges, M. G., Soares, C. J., et al. (2020). Effect of the photoinitiator system on the polymerization of secondary methacrylamides of systematically varied structure for dental adhesive applications. *Dental Materials*, 36(3), 468–477.

<https://doi.org/10.1016/j.dental.2020.01.020>

Besegato, J. F., Freire, A., Zaniboni, J. F., et al. (2025). Clinical performance of self-adhesive resin composite direct restorations in permanent teeth: A systematic review and meta-analysis. *Clinical Oral Investigations*, 29(8), 375. <https://doi.org/10.1007/s00784-025-06451-w>

- Bingül, A., Nezir, M., Atilla, A. O., et al. (2025). A review: Resin-based dental materials and their characterization. *Polymers for Advanced Technologies*, 36(6), e70239.
- Bista, B., Nakashima, S., Nikaido, T., et al. (2016). Adsorption behavior of methacryloyloxydecyl dihydrogen phosphate on an apatite surface at neutral pH. *European Journal of Oral Sciences*, 124, 195–203. <https://doi.org/10.1111/eos.12254>
- Boaro, L. C. C., Gonçalves, F., Guimarães, T. C., et al. (2010). Polymerization stress, shrinkage and elastic modulus of current low-shrinkage restorative composites. *Dental Materials*, 26(12), 1144–1150. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2010.08.003>
- Cho, K., Rajan, G., Farrar, P., et al. (2022). Dental resin composites: A review on materials to product realizations. *Composites Part B: Engineering*, 230, 109495. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.109495>
- Cornelio, R. B., Wikant, A., Mjøsund, H., et al. (2014). The influence of bis-EMA versus bis-GMA on the degree of conversion and water susceptibility of experimental composite materials. *Acta Odontologica Scandinavica*, 72(6), 440–447. <https://doi.org/10.3109/00016357.2013.856467>
- Dantagnan, C. A., Babajko, S., Nassif, A., et al. (2024). Analysis of resin-based dental materials' composition depending on their clinical applications. *Polymers*, 16(8), 1022. <https://doi.org/10.3390/polym16081022>
- Delgado, A. H., Ahmed, M. H., Ferreira, M. N., et al. (2025). Physico-chemical properties and performance of functional monomers used in contemporary dental adhesive technology. *The Journal of Adhesive Dentistry*, 27, 175. https://doi.org/10.3290/j.jad.c_2297
- de Oliveira, R. F., Abuna, G. F., Roulet, J. F., et al. (2022). Effect of an elastomeric urethane monomer on BisGMA-free resin

composites containing different co-initiators. *Clinical Oral Investigations*, 26(1), 957–967. <https://doi.org/10.1007/s00784-021-04078-1>

Durner, J., et al. (2012). Correlation of the degree of conversion with the amount of elutable substances in nano-hybrid dental composites. *Dental Materials*, 28(11), 1146–1153. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2012.08.006>

Eick, J. D., Smith, R. E., Pinzino, C. S., et al. (2006). Stability of silorane dental monomers in aqueous systems. *Journal of Dentistry*, 34, 405–410. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2005.09.004>

Fatma, D. Ö., Ergin, E., Attar, N., et al. (2020). Comparison of laser- and bur-prepared class I cavities restored with two different low-shrinkage composite resins: A randomized controlled 60-month clinical trial. *Clinical Oral Investigations*, 24(1), 357–368. <https://doi.org/10.1007/s00784-019-02931-y>

Feng, L., Suh, B. I., & Shortall, A. C. (2010). Formation of gaps at the filler–resin interface induced by polymerization contraction stress: Gaps at the interface. *Dental Materials*, 26(8), 719–729. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2010.03.004>

Ferracane, J. L. (2006). Hygroscopic and hydrolytic effects in dental polymer networks. *Dental Materials*, 22(3), 211–222. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2005.05.005>

Ferracane, J. L. (2011). Resin composite—State of the art. *Dental Materials*, 27(1), 29–38. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2010.10.020>

Ferracane, J. L. (2024). A historical perspective on dental composite restorative materials. *Journal of Functional Biomaterials*, 15(7), 173. <https://doi.org/10.3390/jfb15070173>

Fugolin, A. P., de Paula, A. B., Dobson, A., et al. (2020). Alternative monomer for BisGMA-free resin composite

formulations. *Dental Materials*, 36(7), 884–892.
<https://doi.org/10.1016/j.dental.2020.04.009>

Gao, F., Chadwell, G., Hong, Q., et al. (2025). Fluoride release and strength change of self-adhesive filling materials after storage in water. *Dental Materials Journal*, 44(5), 471–478.
<https://doi.org/10.4012/dmj.2024-21>

Ge, J., Trujillo, M., & Stansbury, J. (2005). Synthesis and photopolymerization of low shrinkage methacrylate monomers containing bulky substituent groups. *Dental Materials*, 21(12), 1163–1169. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2005.02.002>

German, M. J. (2022). Developments in resin-based composites. *British Dental Journal*, 232(9), 638–643.
<https://doi.org/10.1038/s41415-022-4240-8>

Hansel, C., Leyhausen, G., Mai, U. E. H., et al. (1998). Effects of various composite resin (co)monomers and extracts on two caries-associated microorganisms in vitro. *Journal of Dental Research*, 77, 60–67. <https://doi.org/10.1177/00220345980770010601>

He, J., Söderling, E., Lassila, L. V. J., et al. (2012). Incorporation of antibacterial and radiopaque monomer into dental resin system. *Dental Materials*, 28(8), e110–e117.
<https://doi.org/10.1016/j.dental.2012.04.026>

Ilie, N., & Hickel, R. (2006). Silorane-based dental composite: Behavior and abilities. *Dental Materials Journal*, 25(3), 445–454.
<https://doi.org/10.4012/dmj.25.445>

Ilie, N., & Hickel, R. (2011). Resin composite restorative materials. *Australian Dental Journal*, 56(Suppl 1), 59–66.
<https://doi.org/10.1111/j.1834-7819.2010.01296.x>

Ilie, N., Rencz, A., & Hickel, R. (2013). Investigations towards nano-hybrid resin-based composites. *Clinical Oral Investigations*, 17(1), 185–193. <https://doi.org/10.1007/s00784-012-0689-1>

Imazato, S. (2003). Antibacterial properties of resin composites and dentin bonding systems. *Dental Materials*, 19(6), 449–457. [https://doi.org/10.1016/S0109-5641\(02\)00102-1](https://doi.org/10.1016/S0109-5641(02)00102-1)

Imazato, S., Russell, R. R. B., & McCabe, J. F. (1995). Antibacterial activity of MDPB polymer incorporated in dental resin. *Journal of Dentistry*, 23(3), 177–181. [https://doi.org/10.1016/0300-5712\(95\)93576-N](https://doi.org/10.1016/0300-5712(95)93576-N)

Jin, X., Han, F., Wang, Q., et al. (2022). The roles of 10-methacryloyloxydecyl dihydrogen phosphate and its calcium salt in preserving the adhesive–dentin hybrid layer. *Dental Materials*, 38, 1194–1205. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2022.06.007>

Kalachandra, S., & Kusy, R. P. (1991). Comparison of water sorption by methacrylate and dimethacrylate monomers and their corresponding polymers. *Polymer*, 32(13), 2428–2434.

Khatri, C. A., Stansbury, J. W., Schultheisz, C. R., et al. (2003). Synthesis, characterization and evaluation of urethane derivatives of Bis-GMA. *Dental Materials*, 19(7), 584–588. [https://doi.org/10.1016/S0109-5641\(02\)00108-2](https://doi.org/10.1016/S0109-5641(02)00108-2)

Krasowski, M., Ciesielska, S., Śmielak, B., et al. (2024). Preparation of an experimental dental composite with different Bis-GMA/UDMA proportions. *Materials and Manufacturing Processes*, 39(8), 1044–1051.

Kumar, S. R., Patnaik, A., & Bhat, I. K. (2016). Physical and thermo-mechanical characterizations of resin-based dental composite reinforced with silane-modified nanoalumina filler particles. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 230(2), 504–514.

Madhyastha, P. S., Naik, D. G., Natarajan, S., et al. (2025). Influence of time interval, temperature, and storage condition on fluoride release and recharge from silorane-based restorative

materials. *Dentistry Journal*, 13(5), 197.
<https://doi.org/10.3390/dj13050197>

Makishi, P., Pacheco, R. R., Sadr, A., et al. (2015). Assessment of self-adhesive resin composites: Nondestructive imaging of resin–dentin interfacial adaptation and shear bond strength. *Microscopy and Microanalysis*, 21(6), 1523–1529.
<https://doi.org/10.1017/S1431927615015354>

Melo, M., Dumitrache, B., Ghilotti, J., et al. (2024). Effect of bleaching agents on composite resins with and without Bis-GMA: An in vitro study. *Journal of Functional Biomaterials*, 15(6), 144.
<https://doi.org/10.3390/jfb15060144>

Mitchell, C. (2019). *Dental materials in operative dentistry*. Quintessenz Verlag.

Moradi, K., Mahmoudinezhad, S. S., & Mapar, M. (2022). Microleakage evaluation of two methacrylate-based composites (GC Kalore and Luna SDI) in class II restorations: A laboratory study. *International Journal of Biomaterials*, 2022, 3835694.
<https://doi.org/10.1155/2022/3835694>

Münchow, E. A., de Barros, G. D., Alves, L. D. S., et al. (2014). Effect of elastomeric monomers as polymeric matrix of experimental adhesive systems: Degree of conversion and bond strength characterization. *Applied Adhesion Science*, 2(1), 3.

Ogliari, F. A., Ely, C., Zanchi, C. H., et al. (2008). Influence of chain extender length of aromatic dimethacrylates on polymer network development. *Dental Materials*, 24(2), 165–171.
<https://doi.org/10.1016/j.dental.2007.03.007>

Ozimek, J., Łukaszewska, I., & Pielichowski, K. (2023). POSS and SSQ materials in dental applications: Recent advances and future outlooks. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(5), 4493.
<https://doi.org/10.3390/ijms24054493>

Palin, W. M., Fleming, G. J. P., Burke, F. J. T., et al. (2005). The influence of short- and medium-term water immersion on the hydrolytic stability of novel low-shrink dental composites. *Dental Materials*, 21(9), 852–863.

<https://doi.org/10.1016/j.dental.2005.01.004>

Reiners, J., Podszun, W., & Winkel, J. (1990). *(Meth)acrylic acid derivatives containing urethane groups of tricyclo[5.2.1.0^{2,6}]decane*s (European Patent No. EP0254185).

Bayer AG.

Schmidt, C., & Ilie, N. (2012). The mechanical stability of nano-hybrid composites with new methacrylate monomers for matrix compositions. *Dental Materials*, 28(2), 152–159.

<https://doi.org/10.1016/j.dental.2011.11.007>

Schweickl, H., Schmalz, G., & Weinmann, W. (2004). The induction of gene mutations and micronuclei by oxiranes and siloranes in mammalian cells in vitro. *Journal of Dental Research*, 83, 17–21. <https://doi.org/10.1177/154405910408300104>

Sideridou, I. D., & Achilias, D. S. (2005). Elution study of unreacted Bis-GMA, TEGDMA, UDMA, and Bis-EMA from light-cured dental resins and resin composites using HPLC. *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials*, 74(1), 617–626. <https://doi.org/10.1002/jbm.b.30252>

Sideridou, I. D., Vouvoudi, E. C., & Keridou, I. V. (2015). Sorption characteristics of oral/food simulating liquids by the dental light-cured nanohybrid composite Kalore GC. *Dental Materials*, 31(9), e179–e189.

<https://doi.org/10.1016/j.dental.2015.06.002>

Stansbury, J. W. (2012). Dimethacrylate network formation and polymer property evolution as determined by the selection of monomers and curing conditions. *Dental Materials*, 28(1), 13–22.

<https://doi.org/10.1016/j.dental.2011.09.005>

Sunarintyas, S., Siswomihardjo, W., Irnawati, D., et al. (2014). Evaluation of residual monomer of HDDMA matrix system on fiber reinforced composites (FRC). *Dentika: Dental Journal*, 18, 153–157.

Sunarintyas, S., Siswomihardjo, W., & Matinlinna, J. P. (2016). Biological property of HDDMA-based resin matrix system for dentistry. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 11(12), 2673–2677.

Szczeszio-Włodarczyk, A., Polikowski, A., Krasowski, M., et al. (2022). The influence of low-molecular-weight monomers (TEGDMA, HDDMA, HEMA) on the properties of selected matrices and composites based on Bis-GMA and UDMA. *Materials*, 15(7), 2649. <https://doi.org/10.3390/ma15072649>

Tkáčiková, S., & Sabo, J. (2023). Release of monomers from dental composite materials into saliva and the possibility of reducing the toxic risk for the patient. *Medicina*, 59, 1204. <https://doi.org/10.3390/medicina59071204>

Utterodt, A., et al. (2008). *Dental composites with tricyclo[5.2.1.0^{2,6}]decane derivatives* (European Patent No. EP1935393). Heraeus Kulzer GmbH.

Van Landuyt, K. L., Snauwaert, J., De Munck, J., et al. (2007). Systematic review of the chemical composition of contemporary dental adhesives. *Biomaterials*, 28(26), 3757–3785. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2007.04.044>

Van Noort, R., & Barbour, M. E. (2023). *Introduction to dental materials* (5th ed.). Elsevier Health Sciences.

Vervliet, P., Van Den Plas, J., De Nys, S., et al. (2019). Investigating the in vitro metabolism of the dental resin monomers BisGMA, BisPMA, TCD-DI-HEA and UDMA using human liver microsomes and quadrupole time-of-flight mass spectrometry. *Toxicology*, 420, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.tox.2019.03.007>

Wang, C., Zhou, L., Du, Q., et al. (2022). Synthesis, properties and applications of well-designed hybrid polymers based on polyhedral oligomeric silsesquioxane. *Polymer International*, 71(4), 379–392. <https://doi.org/10.1002/pi.6317>

Yang, S., Zhao, T., Liu, X., et al. (2025). Design and development of infiltration resins: From base monomer structure to resin properties. *Chemistry – An Asian Journal*, 20(2), e202401157. <https://doi.org/10.1002/asia.202401157>

Zalega, M., & Bociong, K. (2024). Antibacterial agents used in modifications of dental resin composites: A systematic review. *Applied Sciences*, 14(9), 3710.

Zhou, Z., Li, A., Sun, K., et al. (2024). Synthesis of a novel monomer “DDTU-IDI” for the development of low-shrinkage dental resin composites. *Dental Materials*, 40(4), 608–618. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2024.02.007>

BÖLÜM 6

Diş Hekimliğinde Mikro ve Nanoplastikler: Klinik Kaynaklar, Olası Biyolojik Riskler ve Çevresel Sürdürülebilirlik

ŞURA BOYRAZ¹

Giriş

Çevre; insanların ve diğer canlıların hayatları boyunca ilişkilerini sürdürdükleri ve karşılıklı olarak etkileşim içinde buldukları fiziki, biyolojik, sosyal, ekonomik ve kültürel ortamdır (1). 20. Yüzyılda doğal kaynakların hızla tüketilmesi, teknolojik gelişmeler ve sanayileşmenin yaygınlaşmasıyla insan ile çevre arasındaki ilişkinin giderek bozulması sonucu çevre kirliliği sorunları ortaya çıkmıştır. Çevre kirliliği literatürü uzun ve köklü bir geçmişe sahiptir. Çevre kirliliği sorunlarına yönelik artan ilginin temel motivasyonu, çevrede sürdürülebilir kalkınmanın sağlanarak hayata geçirilmesi gerekliliğidir. Bu doğrultuda, dünya genelindeki birçok ülke çevre kirliliğinin önlenmesine yönelik politikaları güçlendirme konusunda kararlılığını artırmış ve bu alanda yoğun çaba göstermeye başlamıştır.

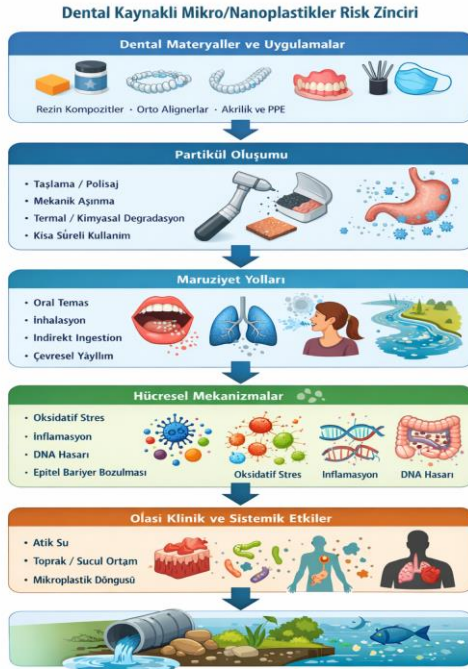
¹ Dr. Öğretim Üyesi, Yozgat Bozok Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi, Klinik Bilimler Bölümü, Orcid ID: 0000-0002-0580-03441

Gelişen teknolojiyle plastik materyallerin daha kolay elde edilmesi, ucuz olması, kolay taşınabilir olması, esnek ve hijyenik olması gibi nedenlerden dolayı 20. yüzyıldan itibaren kullanımları yaygınlaşmıştır. 1950-2019 yılları arasında dünya çapında 8 milyar ton plastiğin üretildiği belirtilmektedir (2). Buna göre dünyada plastik üretimi 1950'den beri her yıl değişik oranlarda artarak devam etmiştir. Plastiğin bugünkü kullanım seviyesine gelmesini sağlayan nedenlerden biri de İkinci Dünya Savaşı yıllarında polietilen adında bir plastik türünün icat edilmesidir. Polietilen, oda sıcaklığında çözünmeyen, sağlam ve gaz geçişine dayanıklı bir madde olduğu için II. Dünya Savaşı esnasında silahlar ve diğer araç gereçlerin yapımında kullanılan önemli bir plastik maddedir (3). Plastiğin bir türü olan polietilen günümüzde çöp poşetlerinde, gıda ürünlerini paketlemede, saklama kaplarında, oyuncaklarda ve şişe yapımında kullanılmaktadır (3). Ancak plastik atıkların artmasıyla başta insanlar olmak üzere tüm canlılar ve çevre için tehlike arz etmeye başlamıştır.

Büyük plastik atıkların fiziksel, kimyasal ve biyolojik etkenlerle daha küçük parçalara ayrılarak mikroplastik (<5 mm) ve nanoplastiklere (<1 µm) dönüşmesiyle oluşan atıklar yalnızca çevresel bir sorun değil aynı zamanda insan sağlığı açısından da bir endişe kaynağıdır. Çevrede yaygın olarak bulunan mikro/nanoplastikler insan vücuduna farklı maruziyet yolları aracılığıyla girmektedir.

Diş hekimliği hem mikroplastik üretimi için bir kaynak oluşturmak hem de hastalar ile klinisyenler için doğrudan bir maruz kalma yoludur. Bu durum mikroplastiklerle ilişkili risklerin şekillenmesinde ağız sağlığı uygulamalarının önemini vurgulamaktadır (4-8). Günlük klinik uygulamalarda yoğun şekilde kullanılan tek kullanımlık ürünler, plastik içerikli dental materyaller ve klinik atıklar, diş hekimliğinin çevresel ayak izini artırmaktadır.

Son yıllarda “yeşil diş hekimliği” kavramı çerçevesinde enerji ve su tasarrufu, atık yönetimi ve çevre dostu uygulamalara yönelik farkındalık artmış olsa da mikroplastik ve nanoplastiklerin diş hekimliği bağlamındaki rolü bütüncül şekilde ele alınmamaktadır. Bu bağlamda, mikroplastik ve nanoplastiklerin çevre kirliliği ve sürdürülebilirlik çerçevesinde diş hekimliği uygulamalarıyla ilişkisini değerlendirmek hem çevresel hem de halk sağlığı açısından giderek artan bir gereklilik haline gelmiştir. Bu derleme, mikroplastik ve nanoplastiklerin temel özelliklerini, diş hekimliği kaynaklı potansiyel oluşum yollarını ve olası biyolojik etkilerini güncel literatür ışığında ele alarak, diş hekimliği alanında sürdürülebilir uygulamalara yönelik farkındalığın artırılmasına katkı sunmayı amaçlamaktadır.



Şekil 1. Dental uygulamalardan kaynaklanan mikro ve nanoplastiklerin oluşum mekanizmaları, maruziyet yolları ve potansiyel biyolojik ile çevresel etkilerini gösteren şematik risk zinciri.

Dental Materyaller ve İşlemlerden Kaynaklanan MP/NP Oluşumu

Restoratif Dental Materyaller:

Restoratif dental materyaller diş hekimliğinde en yaygın kullanılan polimer esaslı materyallerdir. Bu materyallerden olan kompozit rezinler estetik ve biyouyumlu olmaları ile ön plana çıkmıştır ancak yapılan çalışmalar MP/NP salımında kompozit rezinlerin önemli bir kaynak olduğunu bildirmiştir. Bu materyallerin temel bileşenleri arasında Bis-GMA, UDMA ve TEGDMA gibi reaksiyona girmemiş dimetakrilat monomerlerini nanosized silika veya zirkonya bazlı doldurucularla birlikte içermektedir (9). Mulligan ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada kompozit rezinlerin MP/NP sızıntısı ve bu materyallerin diş hekimliği işlemleri yoluyla çevresel kirliliğe katkısı incelenmiştir (10). Çalışmanın sonuçları, kompozit rezinlerin MP boyut aralığında (6.4–10 µm) partiküller ürettiğini göstermiştir. Kompozit rezinlerdeki nanodoldurucu miktarının artmasıyla partikül boyutunun küçüldüğünü ancak agregasyonun esas olarak MP oluşumuna yol açtığını bildirmişlerdir.

Bis-GMA, dental kompozitlerde yaygın olarak kullanılan yüksek moleküler ağırlıklı bir dimetakrilat monomeridir ve bisfenol A (BPA) türevli yapısı nedeniyle biyolojik açıdan özel önem taşımaktadır. Moleküler yapısındaki hidroksil grupları, Bis-GMA'ya yüksek viskozite kazandırırken, aynı zamanda polimer matriks içerisinde hidrojen bağları oluşturarak mekanik dayanımı artırmaktadır (11). Bununla birlikte, bu yapısal özellikler, tam polimerizasyonun sağlanmasını güçleştirmekte ve rezidüel monomerlerin materyal içinde kalmasına yol açabilmektedir. Klinik koşullarda Bis-GMA içeren kompozitlerde monomer dönüşüm

derecesi nadiren %75'in üzerine çıkmakta; özellikle oksijenle inhibe olmuş yüzey tabakasında ve restorasyonun derin bölgelerinde polimerizasyon yetersiz kalmaktadır. Bu durum, zamanla mekanik aşınma, termal stres ve tükürük esterazlarının etkisiyle Bis-GMA'nın veya BPA türevlerinin ağız ortamına salınmasına neden olabilmektedir. İn vitro çalışmalar, kompozit uygulamasını takiben ilk günlerde Bis-GMA salınımının daha yoğun olduğunu, ancak düşük düzeyde de olsa uzun süre devam edebildiğini göstermiştir (12). Biyolojik etkiler açısından Bis-GMA, oral keratinositler, gingival fibroblastlar ve dental pulpa kök hücreleri üzerinde sitotoksik ve genotoksik etkiler sergileyebilmektedir (13, 14). Hücresel düzeyde, Bis-GMA maruziyetinin reaktif oksijen türleri (ROS) üretimini artırdığı, mitokondriyal membran potansiyelini bozduğu ve apoptotik yolları aktive ettiği bildirilmiştir (15). Ayrıca Bis-GMA'nın odontojenik farklılaşmayı baskıladığı ve alkalin fosfataz aktivitesini azalttığı gösterilmiştir (19). BPA türevli yapısı nedeniyle endokrin bozucu potansiyel taşıması, özellikle pediatrik ve adolesan popülasyonlar açısından ek bir endişe kaynağı oluşturmaktadır (16, 17)

UDMA, Bis-GMA'ya kıyasla daha düşük viskoziteye sahip bir dimetakrilat monomer olup, dental rezin formülasyonlarında sıklıkla Bis-GMA ile birlikte kullanılmaktadır (8). Bu monomer daha esnek bir polimer ağı oluşumuna katkı sağlamakta ve mekanik özellikleri iyileştirmektedir. Ancak UDMA'nın daha düşük moleküler ağırlığı ve zincir yapısı, oral ortamda daha kolay difüze olabilmesine ve biyolojik dokularla etkileşimine zemin hazırlayabilmektedir (11). Çeşitli in vitro çalışmalar, polimerize edilmiş dental rezinlerden dahi UDMA salınımının mümkün olduğunu göstermiştir (18). Özellikle mekanik stres, restorasyonların aşınması ve uzun süreli su emilimi, UDMA'nın polimer matriksten serbestleşmesini kolaylaştırmaktadır. Bu durum, UDMA'nın MP/NP oluşumuna dolaylı olarak katkıda bulunabileceğini düşündürmektedir (8).

Biyolojik açıdan UDMA, konsantrasyona bağlı olarak sitotoksik etki göstermektedir (13). Makrofajlar ve oral epitel hücreleri üzerinde yapılan çalışmalarda, UDMA maruziyetinin DNA hasarı, kaspaz-3, -8 ve -9 aktivasyonu ve mitokondriyal disfonksiyon ile ilişkili olduğu gösterilmiştir. Ayrıca UDMA'nın inflamatuvar sitokin salınımını artırarak lokal doku reaksiyonlarına ve potansiyel immün disfonksiyona katkıda bulunabileceği bildirilmektedir (8).

TEGDMA, dental rezinlerde seyreltici monomer olarak kullanılan düşük moleküler ağırlıklı bir dimetakrilattır ve yüksek difüzyon kapasitesi nedeniyle biyolojik etkileri en fazla tartışılan monomerlerden biridir. Düşük viskozitesi sayesinde rezin matrisin işlenebilirliğini artırmakla birlikte, polimerizasyon sonrası materyalden salınma potansiyeli yüksektir (8, 19). HPLC analizleri, dental kompozitlerden salınan başlıca monomerin sıklıkla TEGDMA olduğunu ortaya koymuştur. Bu monomer, ağız mukozası ve dental pulpa ile temas ettiğinde hücrel redoks dengesini bozabilmektedir (20, 21). Hücrel düzeyde TEGDMA, glutatyon (GSH) tükenmesine yol aarak oksidatif stresin artmasına neden olmakta; bu durum DNA hasarı, hücre döngüsü duraklaması ve apoptoz ile sonuçlanabilmektedir (10, 21). Ayrıca TEGDMA'nın östrojen benzeri aktivite gösterebildiğine dair bulgular, endokrin bozucu potansiyeline işaret etmektedir (10). Bu etkiler, TEGDMA'yı özellikle kronik düşük doz maruziyet açısından klinik olarak önemli bir monomer hâline getirmektedir.

HEMA, düşük moleküler ağırlığı ve hidrofilik yapısı nedeniyle dental adeziv sistemlerde yaygın olarak kullanılan bir monomerdir. Hibrit tabaka içerisine derin penetrasyon gösterebilmesi, dentin bağlanmasını güçlendirirken, aynı zamanda biyolojik dokularla daha yakın temas kurmasına neden olmaktadır (22). HEMA'nın oral dokular üzerindeki biyolojik etkileri, çoğunlukla oksidatif stres ve hücrel antioksidan savunma mekanizmalarının baskılanması

üzerinden gerçekleşmektedir. İn vitro çalışmaları, HEMA maruziyetinin hücresel glutasyon seviyelerini azalttığını, ROS üretimini artırdığını ve hücre proliferasyonunu olumsuz etkilediğini göstermiştir (23). Bu etkiler, özellikle uzun süreli ve tekrarlayan maruziyet durumlarında klinik önem kazanabilir.

Protetik Dental Materyaller:

Protetik diş hekimliğinde kullanılan materyaller, uzun süreli intraoral kullanım, mekanik stres ve kimyasal etkileşimler nedeniyle mikropplastik (MP) ve nanoplastik (NP) salımı açısından önemli bir risk profili oluşturmaktadır. Özellikle polimetil metakrilat (PMMA), polietilen tereftalat (PET), poliüretan (PU) ve CAD/CAM tabanlı pre-polimerize rezinler hem partikül oluşum potansiyelleri hem de biyolojik etkileri açısından ayrı ayrı değerlendirilmelidir.

Polimetil Metakrilat (PMMA), protez kaideleri, geçici kronlar, overdenture sistemleri ve çeşitli protetik bileşenlerde en yaygın kullanılan polimerdir (24). Termoplastik yapısı ve görece düşük maliyeti nedeniyle tercih edilmekle birlikte, oral ortamda maruz kaldığı mekanik yükler, termal dalgalanmalar ve kimyasal ajanlar PMMA'nın zamanla degradasyonuna yol açabilmektedir (25). PMMA bazlı protezlerin taşlanması, uyumlandırılması ve polisajı sırasında mikro ve nano boyutta partiküller açığa çıkabilmektedir. Ayrıca simüle çiğneme ve temizlik protokolleri altında PMMA yüzeylerinde mikro çatlakların oluştuğu ve bu çatlaklardan partikül kopmasının arttığı gösterilmiştir (25). Uzun süreli kullanımda bu partiküller tükürükle yutulurak gastrointestinal sisteme ulaşabilmekte veya oral mukozal yüzeylerle uzun süreli temas edebilmektedir (26). Biyolojik açıdan PMMA kaynaklı MP'lerin oral epitel hücrelerinde oksidatif stres oluşturabildiği ve inflamatuvar yanıtları tetikleyebildiği bildirilmiştir (24). Ayrıca rezidüel metil metakrilat monomerlerinin mukozal iritasyon ve

protez stomatiti gelişimine katkıda bulunabileceği bilinmektedir. PMMA kaynaklı partiküllerin sistemik biyodağılımı ve uzun dönem toksikolojik etkileri ise henüz yeterince aydınlatılmamıştır (27).

CAD/CAM teknolojilerinde kullanılan pre-polimerize rezin bloklar, yüksek polimerizasyon dereceleri sayesinde geleneksel akriliklere kıyasla daha stabil kabul edilmektedir. Ancak bu materyallerin subtraktif frezeleme işlemleri sırasında önemli miktarda MP ve NP ürettiği gösterilmiştir (10). Frezeleme sırasında ortaya çıkan partiküller, soğutma sıvılarıyla birlikte atık sistemlerine karışmakta veya havada aerosolize olabilmektedir. Bu partiküllerin biyolojik etkileri büyük ölçüde boyut ve yüzey özelliklerine bağlıdır. Nanometrik partiküllerin yüksek yüzey alanları, protein adsorpsiyonunu ve hücrel etkileşimleri artırabilmektedir (28).

Poliyeten Tereftalat (PET), özellikle implant üstü overdenture'larda kullanılan retansiyon kapsülleri ve bazı protetik bileşenlerde yaygın olarak tercih edilmektedir (29, 30). Mekanik dayanımı yüksek olmakla birlikte, tekrarlayan takma-çıkarma hareketleri ve sürtünme, PET bazlı materyallerin yüzey aşınmasına ve partikül salımına yol açabilmektedir. PET kaynaklı mikroplastiklerin biyolojik etkileri üzerine yapılan çalışmalar, bu partiküllerin hücrel düzeyde oksidatif stres ve inflamasyon oluşturabileceğini göstermektedir. Ayrıca PET partiküllerinin gastrointestinal sistemde sınırlı biyolojik parçalanmaya uğraması, uzun süreli maruziyet açısından dikkat çekici bir risk faktörü oluşturmaktadır (31).

Poliüretan (PU) esneklik ve darbe dayanımı gerektiren protetik uygulamalarda kullanılmaktadır. Ancak PU bazlı materyaller, hidrolojik ve mekanik degradasyona yatkın yapıları nedeniyle MP ve NP oluşumuna zemin hazırlayabilmektedir (32). PU degradasyonu sırasında ortaya çıkan partiküllerin, özellikle izosiyanat türevleri içerebileceği ve bu bileşenlerin duyarlı

bireylerde alerjik veya inflamatuvar reaksiyonlara yol açabileceği bildirilmiştir. Bu durum, PU bazlı protetik materyallerin biyouyumluluk açısından dikkatle değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir (33,34).

Ortodontik Dental Materyaller:

Ortodontik dental materyaller; seramikler, metaller, polimerler veya kompozitler gibi farklı materyallerden oluşur. Polimerler, estetik görünüm, biyouyumluluk, esneklik ve düşük maliyetleri nedeniyle ortodontide yaygın olarak kullanılır. Ancak ortodontik tedavilerde kullanılan materyaller, uzun süreli intraoral kullanım, sürekli mekanik stres ve kimyasal etkileşimler nedeniyle mikroplastik (MP) ve nanoplastik (NP) salımı açısından özel bir risk grubu oluşturmaktadır. Özellikle ortodontik tedavilerin sıklıkla pediatrik ve adölesan popülasyonda uygulanması, bu maruziyetin biyolojik önemini artırmaktadır.

Elastomerik ligatürler ve lastik zincirler, ortodontik kuvvetlerin iletilmesinde yaygın olarak kullanılan poliüretan veya kauçuk bazlı materyallerdir. Bu materyaller, ağız ortamında sürekli gerilme, sürtünme ve tükürükle temas hâlinindedir ve bu koşullar polimer degradasyonunu hızlandırabilmektedir. Yakın tarihli çalışmalar, yeni ve kullanılmış elastomerik ligatürlerin yüzey morfolojilerini karşılaştırmış; kullanım süresi arttıkça yüzey pürüzlülüğünün ve mikro çatlakların belirgin şekilde arttığını göstermiştir. Bu yüzey değişiklikleri, MP ve NP kopmasını kolaylaştırmakta ve partiküllerin doğrudan oral kaviteye salınmasına yol açmaktadır. Raman spektroskopisi ile yapılan analizler, salınan partiküllerin büyük ölçüde kauçuk veya poliüretan bazlı mikroplastikler olduğunu doğrulamıştır (35). Modelleme çalışmalarında, bir elastomerik ligatürün günde milyonlarca mikroplastik partikül salabileceği tahmin edilmiştir. Her ne kadar bu verilerin in vitro koşullarda elde

edilmiş olsa da ortodontik tedavinin aylar hatta yıllar sürebildiği göz önüne alındığında, kümülatif maruziyetin biyolojik açıdan anlamlı olabileceği düşünülmektedir (35).

Şeffaf alignerlar, estetik avantajları ve hasta konforu nedeniyle son yıllarda ortodontik tedavide giderek daha yaygın kullanılmaktadır. Bu apareyler çoğunlukla polietilen tereftalat glikol (PET-G), poliüretan (PU) veya çok katmanlı kopolimerlerden üretilmektedir. Alignerlar, günde ortalama 20–22 saat ağız içinde kalacak şekilde tasarlanmış olup, her biri genellikle 1–2 hafta süreyle kullanılmaktadır (13, 36, 37). Aligner materyalleri, ağız ortamında mekanik sürtünme, termal döngüler, pH değişimleri ve enzimatik etkilere maruz kalmaktadır. İn vitro yaşlandırma çalışmaları, bu koşullar altında aligner yüzeylerinde mikro çatlaklar ve pürüzlülük artışı meydana geldiğini; bunun da MP ve NP salımını artırdığını göstermiştir. Salınan partiküllerin önemli bir kısmının 5–20 µm aralığında olduğu, ancak bazı çalışmalarda <5 µm boyutunda partiküllerin de tespit edildiği bildirilmiştir (28, 38, 39). Invisalign alignerlarıyla yapılan yakın tarihli bir in vitro çalışma, mekanik sürtünmenin MP salımını önemli ölçüde artırdığını göstermiştir (40). Alignerlar yapay tükürük içine yerleştirilmiş ve 3, 5 ve 7 saatlik sürtünme döngülerine tabi tutulmuştur. Raman mikrospektroskopisi ve SEM analizleri, sürtünmenin kontrol grubuna kıyasla belirgin şekilde daha fazla MP salımına yol açtığını ortaya koymuştur. Biyolojik açıdan bakıldığında, küçük boyutlu MP'lerin oral ve gastrointestinal epitel bariyerlerini geçebilme potansiyeli, aligner kaynaklı kronik düşük doz maruziyetin önemini artırmaktadır. PET-G bazlı alignerların genellikle daha düşük sitotoksikite profili gösterdiği bildirilirken, bazı PU bazlı materyallerde daha belirgin hücresel stres ve inflamatuvar yanıtlar gözlemlenmiştir (28).

Klinik Koruyucu ve Ağız Hijyeni Ürünleri

Ağız hijyeninin korunması ve oral hastalıkların önlenmesi amacıyla kullanılan diş macunları, diş fırçaları, diş ipleri ve ağız gargaraları, modern toplumlarda en yaygın ve en sık kullanılan tüketici sağlık ürünleri arasındadır. Bu ürünlerin büyük çoğunluğu, doğrudan veya dolaylı olarak sentetik polimerler içermekte olup mikroplastik (MP) ve nanoplastik (NP) maruziyeti açısından hem bireysel hem de çevresel ölçekte dikkate değer bir kaynak oluşturmaktadır. Özellikle günlük kullanım sıklığı ve yaşam boyu maruziyet süresi göz önüne alındığında, ağız hijyeni ürünleri düşük dozda ancak kronik ve kümülatif MP/NP maruziyetinin özgün bir bileşeni olarak değerlendirilmektedir.

Tarihsel olarak birçok diş macunu ve profesyonel polisaj patı, aşındırıcı ve parlaticı etkinliği artırmak amacıyla polietilen (PE) bazlı mikroboncuklar içermiştir. Bu mikroboncuklar genellikle <1 mm çapında olup, primer mikroplastik sınıfında değerlendirilmektedir. Ticari ürünlerde %1–2'ye varan konsantrasyonlar rapor edilmiş; bu durum, tek bir fırçalama sırasında dahi binlerce plastik partikülün ağız ortamına ve atık su sistemlerine salınabileceğini düşündürmüştür (41, 42). Her ne kadar birçok ülkede bu tür mikroboncukların kullanımı yasaklanmış olsa da eski ürünlerin dolaşımında kalması ve bazı kozmetik/personal care ürünlerinde benzer partiküllerin hâlen kullanılması, bu sorunun tamamen ortadan kalkmadığını göstermektedir. Fırçalama esnasında serbest kalan bu MP'ler; bir yandan ağız boşluğunda kısa süreli temas ve ingestiyon potansiyeli oluştururken, diğer yandan evsel atık su sistemlerine karışarak konvansiyonel arıtma tesislerinin büyük bir bölümünü aşmakta ve sucul ekosistemlere ulaşmaktadır. Hindistan'da yapılan bir tahmin, yalnızca diş macunları kaynaklı yıllık MP salımının yaklaşık 1,4 milyar gram olduğunu ortaya koymuştur (43). Klinik açıdan bakıldığında, bu mikroboncukların

büyük bir kısmının gastrointestinal sistemden atıldığı varsayılmakla birlikte, <20 µm boyutundaki partiküllerin bağırsak bariyerini geçme potansiyeli ve özellikle NP fraksiyonunun sistemik dolaşıma katılabilme ihtimali, biyolojik açıdan kaygı uyandırmaktadır (7). Ayrıca bu partiküllerin yüzeylerinde toksik kimyasalları veya mikroorganizmaları adsorbe edebilme özelliği, potansiyel biyolojik etkileri daha da karmaşık hâle getirmektedir.

Geleneksel diş fırçalarının kılları çoğunlukla naylon veya termoplastik elastomerlerden üretilmektedir. Günlük fırçalama sırasında uygulanan mekanik kuvvet, zamanla kıl uçlarında aşınmaya ve mikroskobik plastik parçacıkların kopmasına yol açabilmektedir. Bu partiküller doğrudan ağız boşluğunda kalabilir, tükürükle birlikte yutulabilir veya lavabo drenajı aracılığıyla çevreye taşınabilir (39). Dünya genelinde her yıl milyarlarca diş fırçasının kullanıldıktan sonra atık hâline gelmesi, bu ürünleri yalnızca bireysel maruziyet açısından değil, aynı zamanda ikincil mikroplastik oluşumu açısından da önemli bir çevresel sorun hâline getirmektedir. Klinik maruziyet düzeyi tek bir birey için düşük görünse de yaşam boyu kullanım süresi ve nüfus ölçeğindeki yaygınlık dikkate alındığında, diş fırçaları ağız hijyeni kaynaklı MP yükünün en önemli bileşenlerinden biri olarak değerlendirilmektedir. Alternatif olarak önerilen bambu saplı veya doğal lif bazlı fırçalar, çevresel açıdan avantaj sunsa da bu ürünlerde dahi sentetik kıl veya bağlayıcı polimerlerin sıklıkla kullanıldığı göz önünde bulundurulmalıdır. Dolayısıyla “plastiksiz” olarak pazarlanan ürünlerin bile MP/NP açısından dikkatle değerlendirilmesi gerekmektedir (44).

Diş ipleri, özellikle interproksimal plak kontrolünde vazgeçilmez araçlar olup; yaygın olarak naylon, polietilen veya politetrafloroetilen (PTFE) gibi sentetik polimerlerden üretilmektedir. Çok telli veya balmumu/fluor içeren kaplamalara

sahip diş iplerinde, kullanım sırasında lif kopmaları ve mikrofiber salınımı meydana gelebileceği öne sürülmektedir (34). Bu mikrofiberlerin bir kısmı ağız ortamında kısa süreli temas sonrası yutulabilirken, büyük bir kısmı çevresel döngüye katılmaktadır. Sayısal veriler sınırlı olsa da diş iplerinin günlük ve yaygın kullanımı nedeniyle özellikle uzun vadede kümülatif bir MP kaynağı oluşturabileceği düşünülmektedir. Klinik etkiler açısından doğrudan kanıtlar henüz yetersiz olmakla birlikte, oral mukozada tekrarlayan mikrotemasın biyolojik sonuçları gelecekteki çalışmalar için önemli bir araştırma alanıdır.

Ağız gargaraları, doğrudan mikroplastik içeren ürünler olarak tasarlanmamış olsa da plastik ambalajları ve bazı formülasyon bileşenleri nedeniyle dolaylı MP kaynağı olarak değerlendirilmektedir. Ayrıca, gargaraların diş macunu ve fırçalama sonrası ağız ortamında kalan partiküllerin süspansiyonunu artırarak ingestiyonunu kolaylaştırabileceği ileri sürülmüştür (34). Hindistan'da yapılan bir çalışmada ağız gargaralarının MP salımı açısından diş macunları ve diş fırçalarına kıyasla daha düşük risk taşıdığını göstermektedir (7). Bununla birlikte, özellikle uzun süreli ve günde birden fazla kullanım alışkanlığı olan bireylerde, kümülatif maruziyet açısından tamamen göz ardı edilmemelidir.

Ağız hijyeni ürünlerinden kaynaklanan MP/NP'ler; oral mukozayla doğrudan temas, ingestiyon ve çevresel geri dönüşüm döngüsü yoluyla dolaylı maruziyet açısından çok boyutlu bir risk profili oluşturmaktadır (7). Bu maruziyet genellikle düşük dozda olmakla birlikte, yüksek kullanım sıklığı ve uzun süreli tekrar nedeniyle biyolojik açıdan anlamlı olabilecek bir kümülatif yük yaratabilir. Mevcut literatür, bu maruziyetin doğrudan klinik sonuçlarını net biçimde ortaya koymak için henüz yetersizdir. Ancak oral mukozal irritasyon, oral mikrobiyotada olası disbiyoz, sistemik dolaşıma geçebilen NP'lerin inflamatuvar ve endokrin bozucu etkileri gibi

biyolojik olarak makul mekanizmalar, konunun klinik açıdan ciddiyetle ele alınmasını gerektirmektedir (33, 45, 46).

Mikro ve Nanoplastiklerin İnsan Vücutuna Giriş Yolları

Mikroplastikler (MP'ler, <5 mm) ve nanoplastikler (NP'ler, <1 µm), günümüzde yalnızca çevresel kirletici olarak değil aynı zamanda insan vücuduna çoklu maruziyet yollarıyla girebilen biyolojik olarak aktif partiküller olarak değerlendirilmektedir. İnsan vücuduna giriş açısından temel maruziyet yolları ingestiyon, inhalasyon ve oral/mukozal temas olarak sınıflandırılmaktadır (47). Diş hekimliği uygulamaları ve ağız hijyeni ürünleri bağlamında, özellikle ingestiyon ve inhalasyon öne çıkan yollar olarak dikkat çekmektedir.

İnhalasyon Yoluyla Maruziyet

İnhalasyon, özellikle hava kaynaklı MP/NP'ler için önemli bir giriş yoludur. Sentetik liflerden veya plastik materyallerin mekanik aşınmasından kaynaklanan MP'ler solunum havasında askıda kalabilmekte ve alt solunum yollarına kadar ulaşabilmektedir. <10 µm çapındaki partiküller alveoler bölgeye kadar ilerleyebilirken, nano boyuttaki partiküllerin alveol–kapiller bariyeri aşarak sistemik dolaşıma katılabileceği öne sürülmektedir (27). Diş hekimliği açısından inhalasyon; kompozit restorasyonların taşlanması, polisaj işlemleri, akrilik veya rezin bazlı materyallerin frezlenmesi ve ortodontik apareylerin sökülmesi gibi işlemler sırasında ortaya çıkan aerosolize plastik partiküller yoluyla gerçekleşebilir (48). Bu partiküller dental personel için mesleki maruziyet, hastalar için ise işlem sırasında kısa süreli fakat yoğun inhalasyon riski oluşturabilir.

İngestiyon (Oral Alım) Yoluyla Maruziyet

İngestiyon, MP/NP'lerin insan vücuduna girişinde en yaygın ve sürekli maruziyet yollarından biridir. Ağız hijyeni ürünleri, dental materyaller ve ortodontik apareyler ağız boşluğunda MP/NP salınımına yol açabilir ve bu partiküller tükürükle birlikte yutulabilir. Diş macunları, diş fırçaları, diş ipleri ve polisaj patlarından salınan MP'ler; ayrıca kompozit restorasyonlar, ortodontik elastomerler ve şeffaf alignerlar gibi polimer bazlı materyallerden kopan partiküller, gastrointestinal sisteme doğrudan geçiş sağlayabilir (33, 34). 20 µm'den büyük partiküllerin büyük kısmı gastrointestinal sistemden atılabilir de <5 µm boyutundaki nanoplastikler bağırsak epiteline penetre olabilmekte ve dokularda birikebilmektedir (8). Bu durum, MP/NP'lerin yalnızca lokal gastrointestinal etkilerle sınırlı kalmayıp; inflamasyon, mikrobiyota dengesizliği ve sistemik immün yanıtlar gibi daha geniş biyolojik sonuçlara yol açabileceğini düşündürmektedir.

Oral ve Mukozal Bariyerler Yoluyla Geçiş

Ağız boşluğu, MP/NP'ler için yalnızca bir giriş kapısı değil, aynı zamanda uzamış temasın gerçekleştiği bir biyolojik arayüzdür. MP/NP'lerin oral mukozayla sürekli temas hâlinde olmasının, mukozal irritasyon, epitel bütünlüğünde bozulma ve hücresel düzeyde genotoksik etkilerle ilişkili olabileceği belirtilmiştir (27). Tükürük proteinleriyle etkileşime giren NP'lerin agregasyon özelliklerinin değişebileceği ve bu durumun mukozal penetrasyonu kolaylaştırabileceği öne sürülmektedir (49, 50). Diş hekimliği uygulamaları sırasında oluşan mikroabrazyonlar, gingival sulkus ve periodontal cepler gibi alanlar; MP/NP'lerin oral dokularla daha derin ve uzun süreli temasını mümkün kılacak potansiyel giriş noktaları olarak düşünülmektedir.

Mikroplastik ve Nanoplastiklerin Biyolojik Etkileri ve Potansiyel Sağlık Riskleri

Mikroplastik ve nanoplastiklerin insan sağlığı üzerindeki etkileri, son yıllarda artan bilimsel ilgiye rağmen henüz tam olarak aydınlatılamamıştır. Mikroplastik/nanoplastiklerin tespit ve kantifikasyonu teknik olarak güç olduğundan yaygınlıkları ve etkilerine dair kanıtlar sınırlıdır (51, 24). Mevcut bilgiler büyük ölçüde in vitro deneyler ve hayvan modellerine dayanmaktadır. Bununla birlikte, bu partiküllerin biyolojik sistemlerle etkileşime girebilme potansiyeli, potansiyel sağlık riskleri açısından dikkatle değerlendirilmesi gereken bir konudur.

Mikroplastik ve nanoplastiklerin hücrelerle etkileşimi; partikül boyutu, yüzey özellikleri ve kimyasal bileşim gibi faktörlere bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Özellikle nanoplastiklerin küçük boyutları sayesinde hücre membranını geçebileceği ve hücre içi yapılara ulaşabileceği öne sürülmektedir. In vitro çalışmalarda, mikroplastik ve nanoplastik maruziyetinin hücre canlılığında azalma, membran bütünlüğünde bozulma ve mitokondriyal fonksiyonlarda değişikliklere yol açabileceği bildirilmiştir (52). Oksidatif stres, mikroplastik ve nanoplastiklerin biyolojik etkilerinin temel mekanizmalarından biri olarak öne çıkmaktadır. Bu partiküllerin reaktif oksijen türlerinin (ROS) üretimini artırarak hücre hasara neden olabileceği, lipit peroksidasyonu ve DNA hasarı gibi süreçleri tetikleyebileceği gösterilmiştir. (53, 54). Ayrıca inflamatuvar yanıtların aktivasyonu ve proinflamatuvar sitokinlerin salınımında artış, mikroplastik maruziyetiyle ilişkilendirilen diğer önemli biyolojik mekanizmalar arasında yer almaktadır (27).

Nanoplastiklerin tight junction proteinlerini etkileyerek epitel bariyer bütünlüğünü zayıflatabileceği öne sürülmektedir. Bu durum, lokal inflamasyonu artırabileceği gibi partiküllerin daha derin

dokulara penetrasyonunu da kolaylaştırabilir (55). MP/NP'lerin hidrofobik yüzey özellikleri, mikroorganizmalar için uygun kolonizasyon alanları oluşturarak "plastisfer" gelişimine katkıda bulunabilir (32). Bağırsak mikrobiyotası üzerine yapılan çalışmalar, mikroplastik maruziyetinin disbiyoz ve proinflamatuvar değişikliklerle ilişkili olabileceğini göstermiştir (56). Benzer mekanizmaların oral mikrobiyota üzerinde gerçekleşip gerçekleşmediği net değildir; ancak teorik olarak kronik inflamatuvar süreçleri destekleyebileceği düşünülmektedir.

Küçük boyutlu partiküllerin gastrointestinal veya solunum epiteli üzerinden sistemik dolaşıma geçebildiğine dair deneysel kanıtlar mevcuttur. Hayvan modellerinde karaciğer, böbrek ve beyin dokusunda birikim gösterilmiş; bu durum inflamasyon ve metabolik değişikliklerle ilişkilendirilmiştir (57). Nanoplastiklerin biyolojik bariyerleri aşabilme kapasitesi plasental ve kan-beyin bariyer geçişi bulgularıyla desteklenmektedir (58-60). Bununla birlikte, dental kaynaklı maruziyetin insanlarda sistemik hastalıklarla doğrudan ilişkisini gösteren güçlü epidemiyolojik veriler henüz mevcut değildir. MP/NP'lerin sağlık riskleri yalnızca fiziksel partikül etkileriyle sınırlı değildir. Plastikler; BPA, ftalatlar ve diğer katkı maddelerini içerebilir ve bu bileşikler endokrin bozucu özellik gösterebilir. MP/NP'lerin bu kimyasalları adsorbe ederek veya matriksten salarak biyoyararlanımı artırabileceği öne sürülmektedir. "Truva atı" mekanizması olarak tanımlanan bu durum, kümülatif toksisite riskini artırabilir (61-62).

Kronik inflamasyon ve oksidatif stresin karsinogenez sürecindeki rolü göz önüne alındığında, MNP maruziyetinin teorik olarak tümör gelişimine katkıda bulunabileceği düşünülmektedir (63). Mikroplastiklerin bazı insan dokularında ve ateromatöz plaklarda tespit edilmesi, inflamatuvar mikroçevre üzerindeki potansiyel

etkilerine işaret etmektedir; ancak nedensel ilişki henüz kanıtlanmamıştır (64).

Çevresel ve Sürdürülebilirlik Boyutu

Modern diş hekimliği, rezin esaslı restoratif materyallerden ortodontik alignerlara ve kişisel koruyucu ekipmanlara kadar geniş bir yelpazede polimer bazlı materyallere bağımlıdır. Bu ürünler klinik performans açısından önemli avantajlar sağlamakla birlikte, kullanım süresince ve sonrasında mikroplastik oluşumuna katkıda bulunma potansiyeline sahiptir. Küresel plastik üretiminin artışı ve plastik atıkların çevresel kalıcılığı göz önüne alındığında, diş hekimliğinin plastik ayak izi artık yalnızca klinik güvenlik açısından değil sürdürülebilirlik perspektifinden de değerlendirilmelidir.

Dental materyallerin çevresel etkisi yalnızca klinik kullanım sırasında ortaya çıkan partikül salımıyla sınırlı değildir. Kompozitlerin taşlanması ve uzaklaştırılması, CAD/CAM bloklarının frezlenmesi ve laboratuvar işlemleri sırasında oluşan polimerik partiküller uygun şekilde kontrol edilmediğinde atık suya veya çevreye karışabilmektedir. Bu durum, dental plastiklerin üretimden bertarafa kadar tüm yaşam döngüsünde çevresel risk oluşturduğunu göstermektedir. Ortodontik alignerlar bu bağlamda dikkat çekicidir. Kısa aralıklarla değiştirilen termoplastik plaklar, kullanım sonrası genellikle geri dönüşüm sistemine entegre edilmeden bertaraf edilmekte ve çevrede ikincil mikroplastik oluşumuna katkıda bulunmaktadır. Benzer şekilde diş fırçaları, diş ipleri ve geçmişte mikroboncuk içeren ağız bakım ürünleri de küresel plastik döngüsünde pay sahibidir.

Pandemi sonrası artan kişisel koruyucu ekipman kullanımı, dental kliniklerde plastik tüketimini belirgin şekilde artırmıştır (65). Maske, önlük ve eldiven gibi ürünlerin çoğu geri dönüştürülmeden

bertaraf edilmekte ve zamanla mikroplastiklere dönüşebilmektedir. Bu durum, enfeksiyon kontrol gereklilikleri ile sürdürülebilirlik hedefleri arasındaki dengeyi yeniden değerlendirmeyi gerektirmektedir. Atık yönetimi süreçleri bu bağlamda kritik öneme sahiptir. Dental plastiklerin ayrıştırılması, filtrasyon sistemlerinin kullanılması ve kontrollü bertaraf stratejileri mikroplastik oluşumunun azaltılmasına katkı sağlayabilir. Bununla birlikte sürdürülebilirlik, yalnızca atık azaltımıyla sınırlı değildir; daha dayanıklı, düşük partikül salımı gösteren ve mümkünse geri dönüştürülebilir veya biyobozunur materyallerin geliştirilmesini de içermelidir.

Mevcut Literatürün Sınırlılıkları

Dental kaynaklı MP/NP'lere ilişkin literatür hızla artmakla birlikte, mevcut kanıt tabanı önemli metodolojik ve kavramsal sınırlılıklar içermektedir. Bu durum, bulguların klinik ve çevresel bağlamda yorumlanmasını ve güvenilir risk değerlendirmesi yapılmasını güçleştirmektedir. Çalışmaların büyük bölümü in vitro tasarıma dayanmaktadır. Yapay tükürük veya hücre kültürü modelleri mekanistik bilgi sağlasa da ağız ortamının dinamik pH değişimleri, enzimatik aktivite, mekanik kuvvetler ve mikrobiyal biyofilm gibi karmaşık özelliklerini tam olarak yansıtamamaktadır. Bu nedenle bildirilen partikül salım miktarlarının ve biyolojik etkilerin klinik gerçekliği ne ölçüde temsil ettiği belirsizdir.

Analitik yöntemlerdeki heterojenlik de önemli bir sorundur. SEM, Raman, FTIR ve diğer teknikler arasında tespit limitleri ve örnek hazırlama protokolleri standart değildir. Özellikle nanoplastiklerin güvenilir şekilde karakterize edilmesi teknik olarak zordur ve kontaminasyon riski sonuçları etkileyebilmektedir. Bu farklılıklar çalışmalar arası karşılaştırmayı ve meta-analitik sentezi sınırlamaktadır. Gerçek maruziyet düzeylerinin nicel olarak

belirlenememiş olması bir diğer temel eksikliklerdir. Klinik ortamda ölçülen partikül konsantrasyonları sınırlı ve çoğunlukla kısa süreli verilere dayanmaktadır. Hastaların kümülatif ingestiyon yükü veya dental profesyonellerin uzun dönem inhalasyon maruziyeti konusunda güvenilir epidemiyolojik veriler bulunmamaktadır. Ayrıca mevcut toksikolojik çalışmalar genellikle yüksek doz ve kısa süreli maruziyet modelleri kullanmakta olup, düşük doz kronik maruziyet senaryolarını yeterince temsil etmemektedir. Kimyasal katkı maddeleri açısından da belirsizlikler sürmektedir. BPA ve benzeri bileşiklerin uzun dönemli elüsyon dinamikleri ile “Truva atı” mekanizmasının klinik önemi büyük ölçüde teorik düzeydedir. Çevresel boyutta ise yaşam döngüsü analizi, geri dönüşüm potansiyeli ve bertaraf sonrası dağılım gibi konular sınırlı incelenmiştir. Son olarak, terminoloji ve sınıflandırmadaki tutarsızlıklar ile popülasyon temelli hassasiyet farklılıklarının yeterince değerlendirilmemiş olması, alandaki bilgi boşluklarını derinleştirmektedir.

Gelecek Araştırmalar İçin Öneriler

Dental kaynaklı MP/NP'lere ilişkin mevcut kanıtlar erken aşamadır ve disiplinlerarası, sistematik bir araştırma yaklaşımına ihtiyaç vardır. Gelecek çalışmaların yalnızca partikül varlığını göstermekle kalmayıp, maruziyet-etki-risk ilişkisini bütüncül biçimde ortaya koyması gerekmektedir. Öncelikle gerçekçi maruziyet modelleri geliştirilmelidir. İn vitro çalışmalar mekanistik bilgi sağlasa da ağız ortamının dinamik yapısını tam olarak yansıtamamaktadır. Tükürük enzimleri, pH değişimleri, mekanik kuvvetler ve mikrobiyal biyofilm etkileşimlerini içeren gelişmiş simülasyon sistemleri oluşturulmalı; uzun süreli aligner kullanımı ve restoratif materyallerin degradasyonu klinik gerçekliğe yakın protokollerle değerlendirilmelidir.

Standartlaştırılmış analitik yöntemlerin geliştirilmesi de kritik öneme sahiptir. Nanoplastiklerin güvenilir biçimde tespiti için örnek hazırlama, boyut sınıflandırması ve tespit limitlerinin uluslararası düzeyde harmonize edilmesi gerekmektedir. Bu standardizasyon olmadan çalışmalar arası karşılaştırılabilirlik ve güvenilir risk analizi mümkün değildir.

Klinik düzeyde ise uzun dönem insan verileri büyük ölçüde eksiktir. Dental profesyonellerde mesleki inhalasyon maruziyetini ve hastalarda kümülatif oral maruziyeti değerlendiren prospektif kohort çalışmaları planlanmalıdır. Düşük doz ve kronik maruziyet senaryolarına odaklanan araştırmalar, inflamasyon, oksidatif stres ve olası endokrin etkilerin klinik anlamını netleştirebilir. Çevresel boyutta, dental materyaller için yaşam döngüsü analizlerinin (LCA) yaygınlaştırılması gerekmektedir. Üretimden bertarafa kadar tüm aşamaların mikroplastik yükü ve karbon ayak izi açısından değerlendirilmesi, sürdürülebilir malzeme geliştirme stratejilerine bilimsel temel sağlayacaktır. Daha düşük partikül salımı gösteren, geri dönüştürülebilir veya biyobozunur polimerlerin geliştirilmesi de öncelikli araştırma alanları arasındadır. Ayrıca MNP'lerin mikrobiyal ekosistemlerle etkileşimi ve "plastisfer" oluşumunun dental ortamdaki rolü translasyonel çalışmalarla aydınlatılmalıdır. Son olarak, mikro ve nanoplastik salımının düzenleyici değerlendirmelere entegre edilmesi için bilimsel veri üretimi gereklidir. Genel olarak, bu alanın ilerlemesi; standart metodoloji, uzun dönem klinik doğrulama ve çevresel sürdürülebilirliği entegre eden bütüncül bir araştırma yaklaşımı gerektirmektedir. Bu sayede biyolojik olasılıktan kanıta dayalı risk değerlendirmesine geçiş mümkün olacaktır.

Sonuç

Mikro ve nanoplastikler yalnızca çevresel kirleticiler değil, potansiyel biyolojik etkileri olan partiküller olarak değerlendirilmektedir. Diş hekimliğinde yaygın olarak kullanılan rezin esaslı materyaller, ortodontik alignerlar ve tek kullanımlık plastikler; kullanım ve bertaraf süreçlerinde mikro/nanoplastik salımına katkıda bulunabilmektedir. Bu durum, dental uygulamaların yalnızca klinik performans açısından değil, çevresel ve sistemik etkiler bağlamında da ele alınmasını gerektirmektedir.

DeneySEL veriler MP/NP maruziyetinin oksidatif stres, inflamasyon ve hücreSEL hasarla ilişkili olabileceğini göstermektedir; ancak dental kaynaklı maruziyetin insanlarda uzun dönem klinik sonuçlarını ortaya koyan güçlü epidemiyolojik kanıtlar henüz sınırlıdır. Bu nedenle mevcut bulgular biyolojik olasılığı desteklemekle birlikte kesin risk değerlendirmeleri için daha kapsamlı klinik ve translyasyonel çalışmalara ihtiyaç vardır.

Çevresel açıdan, dental plastiklerin yaşam döngüsü boyunca mikropplastik yüküne katkıda bulunduğu açıktır. Sürdürülebilir diş hekimliği yaklaşımı, materyal seçimi ve partikül salımını da kapsayan daha bütüncül bir çerçeve gerektirmektedir. Mevcut belirsizlikler ışığında, temkinli fakat proaktif bir yaklaşım benimsenmeli; standartlaştırılmış araştırmalar ve sürdürülebilir materyal inovasyonu teşvik edilmelidir.

Sonuç olarak, dental bağlamda mikro ve nanoplastikler henüz tam olarak tanımlanmamış ancak ihmal edilmemesi gereken bir araştırma alanıdır. Bu konunun netleştirilmesi hem hasta güvenliği hem de çevresel sorumluluk açısından stratejik önem taşımaktadır.

Kaynakça/References

1. (<https://webdosya.csb.gov.tr/db/bolu/icerikler/cevre-20180222082618.pdf>)
2. Yılmaz, C. (2019). *Plastiksiz Denizler Hareketi: Plastiksiz Bir Gelecek Rehberi*/Erişim Tarihi:5.02.2019, <https://www.greenpeace.org/turkey/blog/plastiksiz-denizler-hareketi-plastiksiz-bir-gelecek-rehberi/>
3. Güler, Ç. ve Çobanoğlu, Z. (1997). *Plastikler*. Ankara: Sağlık Bakanlığı Yay.
4. Mulligan S, Hatton PV, Martin N. Resin-based composite materials: elution and pollution. *Br Dent J* 2022;232:644-52. doi:10.1038/s41415-022-4241-7.
5. Chandran T, Vishnu U, Warriier AK. Microplastics in Dentistry—A Review. Subramanian Senthilkannan Muthu, eds. *Microplastic Pollution*. 1st ed. Singapore: Springer Nature; 2021. p. 157-74.
6. Ferracane JL. Resin composite – State of the art. *Dent Mater* 2011;27:29-38. doi:10.1016/j.dental.2010.10.020.
7. Protyusha GB. Correction to: Ubiquitous microplastics. *Br Dent J* 2025;239:12. doi:10.1038/s41415-025-8949-z.
8. Saha U, Jena S, Simnani FZ, Singh D, Choudhury A, Naser SS, et al. The unseen perils of oral-care products generated micro/nanoplastics on human health. *Ecotoxicol Environ Saf* 2025; 290:117526. doi:10.1016/j.ecoenv.2024.117526.
9. Van Landuyt, K.L.; Hellack, B.; Van Meerbeek, B.; Peumans, M.; Hoet, P.; Wiemann, M.; Kuhlbusch, T.A.J.; Asbach, C. Nanoparticle Release from Dental Composites. *Acta Biomater*. 2014, 10, 365–374. [CrossRef]
10. Mulligan S, Ojeda JJ, Kakonyi G, Thornton SF, Moharamzadeh K, Martin N. Characterisation of microparticle waste from dental resin-based composites. *Materials*. 2021;14(16):4440.

11. Bowen, R.L., 1982. Composite and sealant resins-past, present, and future.
12. Kingman, A., Hyman, J., Masten, S.A., Jayaram, B., Smith, C., Eichmiller, F., Arnold, M. C., Wong, P.A., Schaeffer, J.M., Solanki, S., Dunn, W.J., 2012. Bisphenol A and other compounds in human saliva and urine associated with the placement of composite restorations. *J. Am. Dent. Assoc.* 143, 1292–1302. <https://doi.org/10.14219/jada.archive.2012.0090>.
13. Kosuth M, Mason SA, Wattenberg EV. Anthropogenic contamination of tap water, beer, and sea salt. *PLoS ONE.* 2018;13(4):e0194970.
14. Schneider, T.R., Hakami-tafreshi, R., Tomasino-perez, A., Tayebi, L., Lobner, D., 2019. Effects of dental composite resin monomers on dental pulp cells. *Dent. Mater. J.* 38, 579–583. <https://doi.org/10.4012/dmj.2018-163>.
15. Zhu, Y., Gu, Y., Mo, J., Shi, J., Qiao, S., Lai, H., 2015. N-acetyl cysteine protects human oral keratinocytes from Bis-GMA-induced apoptosis and cell cycle arrest by inhibiting reactive oxygen species-mediated mitochondrial dysfunction and the PI3K/Akt pathway. *Toxicol Vitro.* 29, 2089–2101. <https://doi.org/10.1016/j.tiv.2015.09.002>.
16. Rathee, M.; Malik, P.; Singh, J. Bisphenol A in Dental Sealants and Its Estrogen like Effect. *Indian J. Endocrinol. Metab.* 2012, 16, 339. [\[CrossRef\]](#)
17. Bontempo, P.; Mita, L.; Doto, A.; Miceli, M.; Nebbioso, A.; Lepore, I.; Franci, G.; Menafra, R.; Carafa, V.; Conte, M.; et al. Molecular Analysis of the Apoptotic Effects of BPA in Acute Myeloid Leukemia Cells. *J. Transl. Med.* 2009, 7, 48. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
18. Ginzkey, C., Zinnitsch, S., Steussloff, G., Koehler, C., Hackenberg, S., Hagen, R., Kleinsasser, N.H., Froelich, K., 2015. Assessment of HEMA and TEGDMA induced DNA damage by multiple genotoxicological endpoints in human lymphocytes. *Dent. Mater.* 31, 865–876. <https://doi.org/10.1016/J.DENTAL.2015.04.009>.

19. Rey, C., Combes, C., Drouet, C., Somrani, S., 2008. Tricalcium phosphate-based ceramics. *Bioceram. their Clin. Appl.* 326–366. [1.https://doi.org/10.1533/9781845694227.2.326](https://doi.org/10.1533/9781845694227.2.326). 2.
20. Moharamzadeh, K., Brook, I.M., Scutt, A.M., Thornhill, M.H., Van Noort, R., 2008. Mucotoxicity of dental composite resins on a tissue-engineered human oral mucosal model. *J. Dent.* 36, 331–336. <https://doi.org/10.1016/J.JDENT.2008.01.019>.
21. Krifka, S., Spagnuolo, G., Schmalz, G., Schweikl, H., 2013. A review of adaptive mechanisms in cell responses towards oxidative stress caused by dental resin monomers. *Biomaterials* 34, 4555–4563. <https://doi.org/10.1016/J.BIOMATERIALS.2013.03.019>.
22. Sun, S., Wang, G. -l, Huang, Y., Diwu, H. -l, Luo, Y. -c, Su, J., Xiao, Y. -h, 2018. The effects of 2-hydroxyethyl methacrylate on matrix metalloproteinases 2 and 9 in human pulp cells and odontoblast-like cells in vitro. *Int. Endod. J.* 51. [1.https://doi.org/10.1111/ 2.iej.12812](https://doi.org/10.1111/2.iej.12812).
23. Morisbak, E., Ansteinsson, V., Samuelsen, J.T., 2015. Cell toxicity of 2-hydroxyethyl methacrylate (HEMA): the role of oxidative stress. *Eur. J. Oral. Sci.* 123, 282–287. <https://doi.org/10.1111/eos.12189>.
24. Chen, Y.; Chen, J.; Guo, J.; Yao, M.; Liu, Y.; Qian, J.; Ma, Q. Release of Microplastics during Dental Procedures and Denture Wear: Impact on Dental Personnel and Patients. *J. Hazard. Mater.* 2025, 494, 138463. [\[CrossRef\]](#)
25. Saiyed, F.; Aga, M.; Subasree, S. Microplastics in Dentistry: A Narrative Review on Sources, Risks, and Sustainable Practices. *J. Chem. Health Risks* 2025, 15, 221–233.
26. Jorge, J.H.; Giampaolo, E.T.; Machado, A.L.; Vergani, C.E. Cytotoxicity of Denture Base Acrylic Resins: A Literature Review. *J. Prosthet. Dent.* 2003, 90, 190–193. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
27. Di Spirito, F., Folliero, V., Di Palo, M. P., De Benedetto, G., Aulisio, L., Martina, S., ... & Franci, G. (2025). Micro- and nanoplastics and the oral

- cavity: implications for oral and systemic health, dental practice, and the environment—a narrative review. *Journal of Functional Biomaterials*, 16(9), 332.
28. Quinzi V, Orilisi G, Vitiello F, Notarstefano V, Marzo G, Orsini G. A spectroscopic study on orthodontic aligners: first evidence of secondary microplastic detachment after seven days of artificial saliva exposure. *Sci Total Environ.* 2023; 866: 161356.
 29. Galo Silva, G., Valente, M.L., da, C., Bachmann, L., dos Reis, A.C., 2019. Use of polyethylene terephthalate as a prosthetic component in the prosthesis on an overdenture implant. *Mater. Sci. Eng. C.* 99, 1341–1349. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2019.01.136>.
 30. Valente, M.L., da, C., da Silva, G.G., de Castro, D.T., Marinho, V.T., Bachmann, L., Agnelli, J.A.M., dos Reis, A.C., 2022. Analysis of the physical, mechanical and morphological properties of polyethylene terephthalate polymer in the manufacture of dentistry prosthetic components. *Polym. Bull.* <https://doi.org/10.1007/s00289-022-04621-4>.
 31. Pironi, C., Notarstefano, V., Ricciardi, M., Motta, O., Giorgini, E., Montano, L., 2023. First evidence of microplastics in human urine, a preliminary study of intake in the human body. *Toxics* 11. <https://doi.org/10.3390/toxics11010040>.
 32. Umrai Shariff, K., Le, A., Goodwin-Loughton, E., Chung, M., Ali, A., Farella, M., & Venugopal, A. (2025). Microplastics and nanoplastics in clinical dentistry and orthodontics: leaching, health implications, and future directions: a narrative review. *Progress in orthodontics*, 26(1), 49.
 33. Motta, G.; Gualtieri, M.; Bengalli, R.; Saibene, M.; Belosi, F.; Nicosia, A.; Cabellos, J.; Mantecca, P. An Integrated New Approach Methodology for Inhalation Risk Assessment of Safe and Sustainable by Design Nanomaterials. *Environ. Int.* 2024, 183, 108420. [CrossRef]

34. Tanna, D.; Bhandary, S. The Hidden Hazards: The Silent Invasion of Microplastics in Dentistry (Review). *World Acad. Sci. J.* 2025, 7, 35. [CrossRef]
35. Fang C, Awoyemi OS, Luo Y, Naidu R. Investigating microplastics and nano-plastics released from a rubber band used for orthodontic treatment with improved raman imaging algorithms. *Environ Health (Washington, DC)*. 2023; 1(1):63-71.
36. Cox KD, Covernton GA, Davies HL, Dower JF, Juanes F, Dudas SE. Human consumption of microplastics. *Environ Sci Technol*. 2019;53(12):7068–74.
37. Liebezeit G, Liebezeit E. Non-pollen particulates in honey and sugar. *Food Addit Contaminants Part Chem Anal Control Exposure Risk Assess*. 2013;30(12):2136–40.
38. Šimunović, L.; Jurela, A.; Sudarević, K.; Bačić, I.; Meštović, S. Differential Stability of One-Layer and Three-Layer Orthodontic Aligner Blends under Thermocycling: Implications for Clinical Durability. *Acta Stomatol. Croat*. 2023, 57, 286–299. [CrossRef] [PubMed]
39. Šimunović, L.; Miličević, A.M.; Brenko, L.; Haramina, T.; Meštović, S. Absorption and Desorption Dynamics of Thermoformed and 3-Dimensional-Printed Orthodontic Aligners. *Am. J. Orthod. Dentofac. Orthop*. 2025, in press. [CrossRef] [PubMed]
40. Hemamalini D, Vinothini T, Yamini T, Viswanath B. Evaluation of microplastic release from orthodontic clear aligner—a spectroscopic study. *APOS Trends Orthod*. 2025. <https://doi.org/10.25259/APOS3122024>
41. Vaz, V.T.P.; Jubilato, D.P.; Oliveira, M.R.M.; Bortolatto, J.F.; Floros, M.C.; Dantas, A.A.R.; Oliveira Junior, O.B. Whitening Toothpaste Containing Activated Charcoal, Blue Covarine, Hydrogen Peroxide or Microbeads: Which One Is the Most Effective? *J. Appl. Oral Sci*. 2019, 27, e20180051. [CrossRef]

42. Lei, K.; Qiao, F.; Liu, Q.; Wei, Z.; Qi, H.; Cui, S.; Yue, X.; Deng, Y.; An, L. Microplastics Releasing from Personal Care and Cosmetic Products in China. *Mar. Pollut. Bull.* 2017, 123, 122–126. [[CrossRef](#)]
43. Malea, A.; Tzotzis, A.; Manavis, A.; Kyratsis, P. Innovative and Sustainable Toothpaste Packaging Design. *J. Graph. Eng. Des.* 2020, 11, 19–30. [[CrossRef](#)]
44. Guan, M., Li, Y., Xu, X., & Fu, R. (2022). Anti-mold and hydrophobicity of cutinized bamboo prepared via different annealing processes. *Industrial Crops and Products*, 187, 115399.
45. Deng, X.; Gui, Y.; Zhao, L. The Micro(Nano)Plastics Perspective: Exploring Cancer Development and Therapy. *Mol. Cancer* 2025, 24, 30. [[CrossRef](#)]
46. Zha, H.; Lv, J.; Lou, Y.; Wo, W.; Xia, J.; Li, S.; Zhuge, A.; Tang, R.; Si, N.; Hu, Z.; et al. Alterations of Gut and Oral Microbiota in the Individuals Consuming Take-Away Food in Disposable Plastic Containers. *J. Hazard. Mater.* 2023, 441, 129903. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
47. Yee MS-L, Hii L-W, Looi CK, Lim W-M, Wong S-F, Kok Y-Y, Tan B-K, Wong C-Y, Leong C-O. Impact of microplastics and nanoplastics on human health. *Nanomaterials (Basel Switzerland)*. 2021;11(2):496.
48. Ding, J., Li, J., Qi, J., Fu, L., 2023. Characterization of dental dust particles and their pathogenicity to respiratory system: a narrative review. *Clin Oral Investig.* <https://doi.org/10.1007/s00784-023-04910-w>.
49. Przekop, R.; Michalczuk, U.; Penconek, A.; Moskal, A. Effect of Microplastic Particles on the Rheological Properties of Human Saliva and Mucus. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2023, 20, 7037. [[CrossRef](#)]
50. Khan, A.; Jia, Z. Recent Insights into Uptake, Toxicity, and Molecular Targets of Microplastics and Nanoplastics Relevant to Human Health Impacts. *iScience* 2023, 26, 106061. [[CrossRef](#)]
51. Xu, Y.; Ou, Q.; Jiao, M.; Liu, G.; Van Der Hoek, J.P. Identification and Quantification of Nanoplastics in Surface Water and Groundwater by

- Pyrolysis Gas Chromatography-Mass Spectrometry. *Environ. Sci. Technol.* 2022, 56, 4988–4997. [CrossRef] [PubMed]
52. Lee Y, Cho J, Sohn J, Kim C. Health effects of microplastic exposures: current issues and perspectives in South Korea. *Yonsei Med J.* 2023;64(5):301–8.
53. Ilea, A., Băbțan, A. M., Boșca, B. A., Crișan, M., Petrescu, N. B., Collino, M., ... & Câmpian, R. S. (2018). Advanced glycation end products (AGEs) in oral pathology. *Archives of Oral Biology*, 93, 22-30.
54. Jiao, Y., Ma, S., Wang, Y., Li, J., Shan, L., Liu, Q., Liu, Y., Song, Q., Yu, F., Yu, H., Liu, H., Huang, L., Chen, J., 2016. N-Acetyl cysteine depletes reactive oxygen species and prevents dental monomer-induced intrinsic mitochondrial apoptosis in vitro in human dental pulp cells. *PLoS One* 11. <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0147858>.
55. Du, J.; Wang, X.; Tao, T.; Zhang, X.; Jin, B.; Zhao, J.; Lv, Y.; Zhang, Q.; Hu, K.; Qv, W.; et al. Polystyrene Size-Dependent Impacts on Microbial Decomposers and Nutrient Cycling in Streams. *Sci. Total Environ.* 2023, 905, 167032. [CrossRef] [PubMed]
56. Xu, R.; Cao, J.W.; Lv, H.L.; Geng, Y.; Guo, M.Y. Polyethylene Microplastics Induced Gut Microbiota Dysbiosis Leading to Liver Injury via the TLR2/NF-κB/NLRP3 Pathway in Mice. *Sci. Total Environ.* 2024, 917, 170518. [CrossRef]
57. Yang, Y.-F.; Chen, C.-Y.; Lu, T.-H.; Liao, C.-M. Toxicity-Based Toxicokinetic/Toxicodynamic Assessment for Bioaccumulation of Polystyrene Microplastics in Mice. *J. Hazard. Mater.* 2019, 366, 703–713. [CrossRef]
58. Luo, T.; Wang, C.; Pan, Z.; Jin, C.; Fu, Z.; Jin, Y. Maternal Polystyrene Microplastic Exposure during Gestation and Lactation Altered Metabolic Homeostasis in the Dams and Their F1 and F2 Offspring. *Environ. Sci. Technol.* 2019, 53, 10978–10992. [CrossRef]

59. Cannatà, D.; Giordano, F.; Bartolucci, M.L.; Galdi, M.; Bucci, R.; Martina, S. Attitude of Italian dental practitioners toward bruxism assessment and management: A survey-based study. *Orthod. Craniofac. Res.* 2024, 27, 228–236. [[CrossRef](#)]
60. Su, L.; Deng, H.; Li, B.; Chen, Q.; Pettigrove, V.; Wu, C.; Shi, H. The Occurrence of Microplastic in Specific Organs in Commercially Caught Fishes from Coast and Estuary Area of East China. *J. Hazard. Mater.* 2019, 365, 716–724. [[CrossRef](#)]
(58-60)
61. Wang, J.; Liu, X.; Li, Y.; Powell, T.; Wang, X.; Wang, G.; Zhang, P. Microplastics as Contaminants in the Soil Environment: A Mini-Review. *Sci. Total Environ.* 2019, 691, 848–857. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
62. Hildebrandt, L.; Nack, F.L.; Zimmermann, T.; Pröfrock, D. Microplastics as a Trojan Horse for Trace Metals. *J. Hazard. Mater. Lett.* 2021, 2, 100035. [[CrossRef](#)]
63. Pan, W.; Hao, J.; Zhang, M.; Liu, H.; Tian, F.; Zhang, X.; Jiang, Z.; Chen, C.; Gao, M.; Zhang, H. Identification and Analysis of Microplastics in Peritumoral and Tumor Tissues of Colorectal Cancer. *Sci. Rep.* 2025, 15, 16130. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
64. Marfella R, Prattichizzo F, Sardu C, Fulgenzi G, Graciotti L, Spadoni T, D’Onofrio N, Scisciola L, La Grotta R, Frigé C, et al. Microplastics and nanoplastics in atheromas and cardiovascular events. *N Engl J Med.* 2024;390(10):900–10.
65. World Health Organization (WHO). Rational Use of Personal Protective Equipment for Coronavirus Disease (COVID-19) and Considerations during Severe Shortages; WHO: Geneva, Switzerland, 2020.

