

Restoratif Diş Tedavisinde Güncel Yaklaşımlar



EDİTÖR

Prof. Dr. Dilek Tağtekin

BİDGE Yayınları

Restoratif Diş Tedavisinde Güncel Yaklaşımlar

Editör: Prof. Dr. Dilek TAĞTEKİN

ISBN: 978-625-8673-56-2

1. Baskı

Sayfa Düzeni: Gözde YÜCEL

Yayınlama Tarihi: 2025-12-25

BİDGE Yayınları

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

Sertifika No: 71374

Yayın hakları © BİDGE Yayınları

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

Krc Bilişim Ticaret ve Organizasyon Ltd. Şti.

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



ÖNSÖZ

Restoratif Diş Tedavisinde güncel yaklaşımlarla 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

RESTORATİF BAKIŞ AÇISI İLE ORTODONTİ	1
--	---

HAMİT ENİS ASLAN, ELİF ALKAN, DİLEK TAĞTEKİN

ANTİBAKTERİYEL RESTORATİF MATERYALLERİN EVİRİMİ: NANOTEKNOLOJİ, BİYOPOLİMERLER VE ÇEVRE DOSTU SENTEZ YÖNTEMLERİ ÜZERİNE GÜNCEL BİR DERLEME	14
---	----

SEDA BAKTIR, SOLEY ARSLAN

DİŞ HEKİMLİĞİNDE RENK SEÇİM YÖNTEMLERİ VE GÜNCEL YAKLAŞIMLAR	65
---	----

FATMA BEYZA KOÇYİĞİT, VAHTİ KILIÇ

DİŞ BEYAZLATMA: BİLİMSEL TEMELLER, KLİNİK PROTOKOLLER, BİYOLOJİK ETKİLER VE MODERN REMİNERALİZASYON YAKLAŞIMLARI	116
--	-----

AHMET YASİN İREN

KOMPOZİT MATRİKSLERİNE ALTERNATİF MONOMER SİSTEMLERE GÜNCEL BİR BAKIŞ	153
--	-----

NİLGÜN AKGÜL, ECEMNUR ATLI

BÖLÜM 1

RESTORATİF BAKIŞ AÇISI İLE ORTODONTİ

HAMİT ENİS ASLAN¹
ELİF ALKAN²
DİLEK TAĞTEKİN³

Giriş

Modern diş hekimliğinde tedavi başarısı, yalnızca dişlerin ideal pozisyonlara taşınması ya da kayıp sert dokuların restore edilmesi ile sınırlı olmayıp; estetik, fonksiyon ve biyolojik bütünlüğün uzun dönemli olarak korunmasını hedefleyen bütüncül bir yaklaşımı zorunlu kılmaktadır. Bu bağlamda ortodonti ve restoratif diş hekimliği arasındaki etkileşim, güncel klinik uygulamalarda giderek artan bir önem kazanmış; disiplinler arası entegrasyon, öngörülebilir ve sürdürülebilir tedavi sonuçlarının elde edilmesinde belirleyici bir unsur hâline gelmiştir (Arhun ve ark., 2023; Shen ve ark., 2023).

¹ Arş. Gör. Dt., Marmara Üniversitesi, Restoratif Diş Tedavisi, İstanbul/Türkiye
Orcid: 0009-0002-4244-2758

² Dr. Öğr. Üyesi, Marmara Üniversitesi, Restoratif Diş Tedavisi, İstanbul/Türkiye,
Orcid: 0000-0001-7167-6946

³ Prof. Dr., Marmara Üniversitesi, Restoratif Diş Tedavisi, İstanbul/Türkiye,
Orcid: 0000-0002-2675-1764

Ortodontik tedaviler, diş dizilimi bozukluklarının ve maloklüzyonların düzeltilmesini sağlayarak fonksiyonel ve estetik iyileşme sunmakla birlikte, birçok klinik durumda tek başına ideal sonuçların elde edilmesi için yeterli olmamaktadır. Özellikle anterior bölgede diş boyutu uyumsuzlukları, yüzey morfolojisindeki düzensizlikler, mine–dentin kayıpları ve renk değişiklikleri, ortodontik tedavi sonrasında daha belirgin hâle gelerek restoratif gereksinimleri ortaya çıkarabilmektedir (Kuljic, 2008; Vitale ve ark., 2004). Bu nedenle ortodontik tedavinin, restoratif hedefler göz önünde bulundurularak ve minimal invaziv diş hekimliği ilkeleri doğrultusunda planlanması büyük önem taşımaktadır.

Sabit ortodontik tedaviler sırasında kullanılan braketler, bantlar ve adeziv sistemler; plak retansiyonunu artırarak mine yüzeyinde biyolojik dengenin bozulmasına, demineralizasyona ve beyaz nokta lezyonlarının (WSL) gelişimine zemin hazırlayabilmektedir. Ayrıca debonding sonrasında ortaya çıkabilen mikrohasarlar, mikroçatlaklar ve yüzey pürüzlülüğü artışı, restoratif işlemlerin uzun dönem başarısını doğrudan etkileyen klinik sonuçlar arasında yer almaktadır (Ryf ve ark., 2012; Özbek & Aksoy, 2018). Bu nedenle ortodontik tedavinin mine dokusu üzerindeki biyolojik ve yapısal etkilerinin restoratif bir bakış açısıyla değerlendirilmesi, çağdaş diş hekimliğinde temel bir gereklilik olarak kabul edilmektedir.

Dental Plak ve Beyaz Nokta Lezyonları

Sabit ortodontik tedavi sürecinde ataşmanların varlığı, braket çevresinde dental plak birikimini kolaylaştırmakta ve ağız mikrobiyotasında kariyojenik yönde değişimlere yol açmaktadır. Ortodontik ataşman çevresinde oluşan plağın daha düşük pH değerlerine sahip olduğu ve Streptococcus mutans gibi asidojenik bakterilerin düzeylerinde belirgin artış meydana geldiği bildirilmiştir

(Reichardt ve ark., 2019; Rosenbloom & Tinanoff, 1991). Bu mikrobiyal ve biyokimyasal değişimlerin, mine yüzeyinde demineralizasyon eğilimini artırarak beyaz nokta lezyonlarının gelişimine zemin hazırladığı kabul edilmektedir.

Literatürde WSL'lerin kısa sürede klinik olarak ortaya çıkabildiğı ve görülme sıklığının geniş bir aralıkta rapor edildiğı bildirilmektedir (Artun & Brobakken, 1986; Boersma ve ark., 2005; Gorelick ve ark., 1982). En yüksek risk taşıyan bölgelerin maksiller kesici dişlerin gingivaya komşu labial yüzeyleri ile mandibular kanin ve premolarlar olduğı ifade edilmektedir (Hu & Featherstone, 2005; Zachrisson & Zachrisson, 1971). Lezyon gelişiminde ağız hijyeni düzeyi, tedavi süresi, bonding protokolleri ve adeziv artıklarının kontrolü gibi faktörlerin belirleyici olduğı vurgulanmaktadır (Heymann & Grauer, 2013).

Resim 1 A) Ortodontik tedavi öncesi intraoral klinik görüntü, B) Ortodontik tedavi sonrası intraoral klinik görüntü, C) Ortodontik tedavi sonrası plak boyama ajanı uygulaması sonrası intraoral klinik görüntü, D) Ortodontik tedavi sonrası floresans esaslı çürük tespit cihazı ile alınan intraoral klinik görüntü



WSL tanısında temel yaklaşım klinik görsel değerlendirme olup, bu amaçla ICDAS sistemi yaygın olarak kullanılmaktadır (Heymann & Grauer, 2013; Manton, 2013). Nicel ışık indüklemeli floresans (QLF), optik koherens tomografi (OCT) ve lazer floresans temelli sistemler erken demineralizasyonun saptanmasında duyarlı yöntemler olarak tanımlanmakla birlikte, maliyet ve klinik uygulanabilirlik sınırlılıkları nedeniyle çoğunlukla araştırma ortamlarında kullanılmaktadır (Shankarappa ve ark., 2024). Bu nedenle klinik uygulamada risk temelli değerlendirme ve düzenli takip ön plandadır.

Ortodontik bonding sırasında kullanılan adeziv sistemlerin marjinal adaptasyonu, mine-adeziv arayüzünde mikrosızıntı oluşumunu doğrudan etkilemektedir. Mikrosızıntı; oral sıvıların, bakteriyel ürünlerin ve organik asitlerin mine altına ilerlemesini kolaylaştırarak demineralizasyon ve erken çürük gelişimini hızlandıran temel patojenetik mekanizmalardan biri olarak değerlendirilmektedir (Alkis ve ark., 2015; Masarykova ve ark., 2023).

Resim 2 Rezin artıklarının etrafında biriken dental plağın plak boyama ajanı ile görüntülenmesi



Mevcut kanıtlar, tüm adeziv sistemlerde belirli düzeyde mikrosızıntı meydana geldiğini; ancak materyal kompozisyonuna bağlı olarak bu sızıntının şiddetinin değişebildiğini göstermektedir. Kompozit esaslı adezivlerin, resin modifiye cam iyonomer simanlara kıyasla daha düşük mikrosızıntı değerleri sergilediği; özellikle gingival bölgede sızıntı eğiliminin arttığı bildirilmektedir (Uysal ve ark., 2008). Bu bulgular, adeziv sistem seçiminin yalnızca mekanik tutuculuk açısından değil, mine dokusunun biyolojik korunması açısından da kritik olduğunu ortaya koymaktadır.

Mine Hasarı ve Mikroçatlak Oluşumu

Ortodontik tedavi sırasında ve özellikle debonding aşamasında mine yüzeyinde mikroçatlak oluşumu, önemli bir iatrojenik etki olarak tanımlanmaktadır (Ryf ve ark., 2012). Braketlerin sökülmesi sırasında uygulanan mekanik kuvvetlerin, kullanılan temizlik yöntemlerinden bağımsız olarak, mine yapısında geri dönüşü olmayan mikroyapısal değişikliklere yol açabildiği bildirilmiştir (Dumbryte ve ark., 2013).

Mikroçatlakların varlığı, mine yüzey pürüzlülüğünü artırarak plak retansiyonu, renklenme ve çürük riskinde artışa neden olabilmektedir. İleri görüntüleme teknikleri kullanılarak yapılan değerlendirmeler, debonding sonrasında mevcut mikroçatlakların progresyon gösterebildiğini ve bazı durumlarda derinlik ve genişliklerinin arttığını ortaya koymuştur (Hamdan ve ark., 2024). Braket taban tasarımı ve bağlanma kuvveti düzeyi, mineye aktarılan stres dağılımını belirleyen temel faktörler arasında yer almakta; klinik olarak gerekli bağlanma kuvvetinin aşılması, mine hasarı riskini artırabilmektedir (Reynolds, 1975).

Resim 3 Santral keser dişte izlenen çatlaklar ve floresans esaslı cihazın çürük tespit modunda alınan intraoral klinik görüntüsü



Kaynak: Marmara Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi, Restoratif Diş Tedavisi Kliniği

Braket Sökümü ve Rezin Artıkları

Sabit ortodontik tedavinin aktif fazının tamamlanmasının ardından gerçekleştirilen debonding işleminin temel amacı, braketlerin güvenli şekilde uzaklaştırılması ve mine yüzeyinin yapıştırma öncesi hâline minimal hasarla geri kazandırılmasıdır. Bu süreçte ortaya çıkan mine hasarının, braket tipinden çok artık rezinin uzaklaştırılmasında kullanılan yöntemlere bağlı olduğu gösterilmiştir (Cesur ve ark., 2022; Janiszewska-Olszowska ve ark., 2014).

Rezin artıklarının uzaklaştırılmasında kullanılan aşındırıcı materyalin sertliği, uygulanan basınç ve rotasyon hızı, mine kaybı

açısından belirleyici faktörlerdir. Sert ve kontrolsüz aşındırıcıların aşırı mine kaybına yol açabildiği; daha elastik ve kontrollü sistemlerin mine korunumu açısından daha avantajlı olduğu bildirilmektedir (Bollen ve ark., 1997). Bu nedenle debonding sonrası etkili bir cila protokolünün uygulanması ve yüzey pürüzlülüğünün bakteri tutulum eşiğinin altında tutulması restoratif ve biyolojik açıdan kritik öneme sahiptir.

Resim 4 Ortodontik tedavi sonrası diş yüzeylerinde izlenen rezin artıkları



Kaynak: Marmara Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi, Restoratif Diş Tedavisi Kliniği

Ortodontik tedavi sonrasında mine renk değişikliği, asitleme işlemleri, adeziv uygulamaları ve mine içerisinde kalan rezin uzantıları ile ilişkilendirilmektedir. Bu rezin kalıntıları zamanla kimyasal yaşlanmaya ve pigment absorpsiyonuna uğrayarak estetik açıdan olumsuz sonuçlara yol açabilmektedir (Irgin, 2024).

Literatürde, kullanılan adeziv sistem ve rezin temizleme yönteminin renk değişiminin şiddetini etkilediği; total-etch sistemlerin ve agresif temizlik protokollerinin daha belirgin renk değişimleri ile ilişkili olduğu bildirilmektedir (Boncuk ve ark.,

2014). Bu nedenle restoratif açıdan renk stabilitesini koruyacak daha konservatif yaklaşımların tercih edilmesi önerilmektedir.

Restoratif Tedaviler Öncesinde Ortodontik Hazırlık

Ortodontik tedavi sonrasında dişlerin ideal pozisyonlara getirilmesi, estetik beklentileri artırmakta ve daha önce tolere edilebilen yüzeysel kusurların daha belirgin hâle gelmesine neden olabilmektedir. Peg şekilli dişler, diş boyutu uyumsuzlukları, travmaya bağlı mine–dentin kayıpları ve mine gelişim anomalileri gibi durumlarda, yalnızca ortodontik diş hareketleri ile ideal estetik ve fonksiyonun sağlanması çoğu zaman mümkün olmamaktadır (Selim & Ertan, 2005).

Bu tür olgularda, ortodontik tedavi sürecinin restoratif gereksinimler göz önünde bulundurularak planlanması; dişlerin nihai restorasyonlara uygun konumda hizalanmasını sağlayarak gereksiz madde kaybını azaltmaktadır. Ortodontik tedaviyi takiben uygulanan konservatif restoratif yaklaşımlar, minimal invaziv diş hekimliği ilkeleriyle uyumlu şekilde estetik ve fonksiyonel rehabilitasyonun tamamlanmasına olanak tanımaktadır. Güncel kompozit rezin ve adeziv sistemler, ortodontik tedavi ile elde edilen sonuçların restoratif işlemlerle öngörülebilir biçimde desteklenmesini mümkün kılmaktadır (Korkut ve ark., 2025).

Genel Değerlendirme

Ortodontik ve restoratif diş hekimliği arasındaki etkileşim, tedavi planlamasının erken aşamalarından itibaren bütüncül bir bakış açısıyla ele alınmalıdır. Sabit ortodontik tedavilerin mine dokusu üzerindeki biyolojik ve yapısal etkileri; demineralizasyon, mikrohasar ve renk değişikliği gibi restoratif açıdan kritik sonuçlar doğurabilmektedir. Bu nedenle disiplinler arası planlama, risk temelli yaklaşım ve minimal invaziv ilkeler doğrultusunda yürütülen ortodontik tedaviler, restoratif başarının ve uzun dönem diş sağlığının korunmasında temel bir rol oynamaktadır.

Kaynakça

Shen, Y., Jiang, X., & Yu, J. (2023). The combined orthodontic and restorative treatment for patients with malocclusion and dentition defects: A randomized controlled trial. *Medicine*, 102(35), e35025.
<https://doi.org/10.1097/MD.00000000000035025>

Arhun, N., Arman-Özçırpıcı, A., Çehreli, S. B., Gülşahı, K., & Özsoy, Ö. P. (2023). The restorative dentist and orthodontist. In *Integrated clinical orthodontics* (pp. 345–410). Springer.

Vitale, M. C., Caprioglio, C., Martignone, A., Marchesi, U., & Botticelli, A. R. (2004). Combined technique with polyethylene fibers and composite resins in restoration of traumatized anterior teeth. *Dental Traumatology*, 20(3), 172–177.
<https://doi.org/10.1111/j.1600-9657.2004.00220.x>

Arhun, N., Arman Ozcırpici, A., Ungor, M., & Polat-Ozsoy, O. (2013). Dental caries, tooth fracture and exposed dental pulp: The role of endodontics in orthodontic treatment planning and mechanotherapy. In *Integrated clinical orthodontics* (pp. 283–312). Springer.

Ryf, S., Flury, S., Palaniappan, S., Lussi, A., Van Meerbeek, B., & Zimmerli, B. (2012). Enamel loss and adhesive remnants following bracket removal and various clean-up procedures in vitro. *European Journal of Orthodontics*, 34(1), 25–32.
<https://doi.org/10.1093/ejo/cjq183>

Özbek, A., & Aksoy, A. (2018). Ortodontide debonding yöntemleri. *Black Sea Journal of Health Science*, 1(2), 40–45.

Rosenbloom, R. G., & Tinanoff, N. (1991). Salivary *Streptococcus mutans* levels in patients before, during, and after orthodontic treatment. *American Journal of Orthodontics and*

Dentofacial Orthopedics, 100(1), 35–37.
[https://doi.org/10.1016/0889-5406\(91\)70051-H](https://doi.org/10.1016/0889-5406(91)70051-H)

Reichardt, E., Geraci, J., Sachse, S., Rödel, J., Pfister, W., Löffler, B., & Krey, K. F. (2019). Qualitative and quantitative changes in the oral bacterial flora occur shortly after implementation of fixed orthodontic appliances. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 156(6), 735–744.
<https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2019.05.015>

Hu, W., & Featherstone, J. D. B. (2005). Prevention of enamel demineralization: An in vitro study using light-cured filled sealant. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 128(5), 592–600.
<https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2004.05.036>

Zachrisson, B. U., & Zachrisson, S. (1971). Caries incidence and oral hygiene during orthodontic treatment. *Scandinavian Journal of Dental Research*, 79(6), 394–401.

Øgaard, B., Rølla, G., Arends, J., & ten Cate, J. M. (1988). Orthodontic appliances and enamel demineralization. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 94(2), 123–130.
[https://doi.org/10.1016/0889-5406\(88\)90322-4](https://doi.org/10.1016/0889-5406(88)90322-4)

Gorelick, L., Geiger, A. M., & Gwinnett, A. J. (1982). Incidence of white spot formation after bonding and banding. *American Journal of Orthodontics*, 81(2), 93–98.

Artun, J., & Brobakken, B. O. (1986). Prevalence of carious white spots after orthodontic treatment with multibonded appliances. *European Journal of Orthodontics*, 8(4), 229–234.

Boersma, J. G., van der Veen, M. H., Lagerweij, M. D., Bokhout, B., & Prahl-Andersen, B. (2005). Caries prevalence measured with QLF after treatment with fixed orthodontic

appliances: Influencing factors. *Caries Research*, 39(1), 41–47.
<https://doi.org/10.1159/000081655>

Heymann, G. C., & Grauer, D. (2013). A contemporary review of white spot lesions in orthodontics. *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry*, 25(2), 85–95.
<https://doi.org/10.1111/jerd.12013>

Manton, D. J. (2013). Diagnosis of the early carious lesion. *Australian Dental Journal*, 58(Suppl. 1), 35–39.
<https://doi.org/10.1111/adj.12070>

Shankarappa, S., Burk, J. T., Subbaiah, P., Rao, R. N., & Doddawad, V. G. (2024). White spot lesions in fixed orthodontic treatment: Etiology, pathophysiology, diagnosis, and management. *Journal of Orthodontic Science*, 13, 21.

Masarykova, N., Tkadlec, E., Chlup, Z., Vrbsky, J., Brysova, A., & Cernochova, P. (2023). Comparison of microleakage under orthodontic brackets bonded with different adhesive systems: An in vitro study. *BMC Oral Health*, 23, 637.
<https://doi.org/10.1186/s12903-023-03390-4>

Alkis, H., Turkkahraman, H., & Adanir, N. (2015). Microleakage under orthodontic brackets bonded with different adhesive systems. *European Journal of Dentistry*, 9(1), 117–121.

Uysal, T., Ulker, M., Ramoglu, S. I., & Ertas, H. (2008). Microleakage under metallic and ceramic brackets bonded with orthodontic self-etching primer systems. *Angle Orthodontist*, 78(6), 1089–1094.

Reynolds, I. R. (1975). A review of direct orthodontic bonding. *British Journal of Orthodontics*, 2(3), 171–178.

Dumbryte, I., Linkeviciene, L., Malinauskas, M., Linkevicius, T., & Peciuliene, V. (2013). Evaluation of enamel

micro-cracks characteristics after removal of metal brackets in adult patients. *European Journal of Orthodontics*, 35(3), 317–322.

Hamdan, A. H., Saleah, S. A., Seong, D., Ravichandran, N. K., Wijesinghe, R. E., & Han, S. (2024). Three-dimensional assessment of dental enamel microcrack progression after orthodontic bracket debonding using optical coherence tomography. *Journal of Functional Biomaterials*, 16(1).

Janiszewska-Olszowska, J., Szatkiewicz, T., Tomkowski, R., Tandecka, K., & Grocholewicz, K. (2014). Effect of orthodontic debonding and adhesive removal on enamel: A systematic review. *Medical Science Monitor*, 20, 1991–2001.

Cesur, E., Arslan, C., Orhan, A. I., Bilecenoglu, B., & Orhan, K. (2022). Effect of different resin removal methods on enamel after metal and ceramic bracket debonding: A micro-computed tomography study. *Journal of Orofacial Orthopedics*, 83(3), 157–171.

Bollen, C. M., Lambrechts, P., & Quirynen, M. (1997). Comparison of surface roughness of oral hard materials to the threshold surface roughness for bacterial plaque retention: A review. *Dental Materials*, 13(4), 258–269.

Irgin, C. (2024). Simulation of oral environmental conditions through artificial aging of teeth for the assessment of enamel discoloration in orthodontics. *BMC Oral Health*, 24, 1533.

Boncuk, Y., Cehreli, Z. C., & Polat-Ozsoy, O. (2014). Effects of different orthodontic adhesives and resin removal techniques on enamel color alteration. *Angle Orthodontist*, 84(4), 634–641.

Selim, A., & Ertan, E. (2005). Ortodontide estetik restorasyonlar (Olgu sunumu). *Ondokuz Mayıs Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi Dergisi*, 6(3), 185–188.

Kuljic, B. L. (2008). Merging orthodontics and restorative dentistry: An integral part of esthetic dentistry. *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry*, 20(3), 155–163.

Korkut, B., Unal, T., Murat, N., & Ozcan, M. (2025). Effect of prerestorative short-term orthodontic therapy in restorative treatment planning. *Journal of Prosthetic Dentistry*, 133(2), 455–463.

BÖLÜM 2

ANTİBAKTERİYEL RESTORATİF MATERYALLERİN EVRİMİ: NANOTEKNOLOJİ, BİYOPOLİMERLER VE ÇEVRE DOSTU SENTEZ YÖNTEMLERİ ÜZERİNE GÜNCEL BİR DERLEME

SEDA BAKTIR¹
SOLEY ARSLAN²

Giriş

Diş çürüğü, diş sert dokularının, dental plak biyofilmi içerisindeki mikroorganizmalar tarafından fermente edilebilir karbonhidratların metabolizması sonucu oluşan organik asitlerin tekrarlayan ataklarına maruz kalarak demineralize olduğu, biyofilm aracılı multifaktöriyel bir hastalık olarak tanımlanmaktadır (Selwitz, Ismail, & Pitts, 2007; Takahashi & Nyvad, 2011). Bu süreçte, plak içindeki bakterilerin karbonhidrat fermentasyonu ile açığa çıkan laktik ve diğer organik asitler mine ve dentinde mineral kaybına yol açmakta; zamanla bu demineralizasyon süreci, Streptococcus

¹ Uzm. Dt, Erciyes Üniversitesi, Diş Hekimliği Fakültesi, Restoratif Diş Tedavisi, Orcid: 0000-0002-4482-6213

² Prof. Dr., Erciyes Üniversitesi, Diş Hekimliği Fakültesi, Restoratif Diş Tedavisi, Orcid: 0000-0003-4487-2049

mutans başta olmak üzere asit üreten ve asite dirençli türlerin baskın olduğu dizbiyotik bir biyofilm yapısının oluşumu ile ilişkilendirilmektedir (Fang & ark., 2024). Bu demineralizasyon ilerledikçe yalnızca inorganik faz değil, dentinin organik matriksi de etkilenmektedir. Bakteriyel asitler dentini demineralize ederken, dentin yapısında latent halde bulunan ve konak kökenli enzimler olan matriks metalloproteinazlar (MMP'ler) ile diğer kollajenazların aktive olması, kollajen liflerinin hidrolitik degradasyonunu hızlandırmakta ve hibrit tabaka bütünlüğünü zayıflatmaktadır (Mazzoni & ark., 2015; S. C. Zhang & Kern, 2009). Sonuç olarak, restoratif materyal ile diş dokusu arasındaki adeziv arayüz zaman içinde biyokimyasal ve mekanik olarak bozulmakta; marjinal aralıklarda plak birikimi kolaylaşmakta ve bu bölgelerde sekonder çürük gelişimi için elverişli bir mikroçevre oluşmaktadır (Y. Li & ark., 2014; A. Zhang & ark., 2021).

Sekonder çürük, mevcut restorasyonların marjinal bölgelerinde gelişen yeni çürük lezyonlarıdır ve modern restoratif uygulamalardaki başarısızlıkların başlıca nedenlerinden birini oluşturur (Mjor & Toffenetti, 2000). Klinik kanıtlar, özellikle kompozit restorasyonlarda zaman içinde plak birikimi ve marjinal bozulma nedeniyle sekonder çürük gelişebildiğini göstermektedir (Opdam & ark., 2014). Ankete dayalı yapılan bir çalışmada Norveçli diş hekimlerinin %72.7'si, sınıf II kompozit restorasyonların değiştirilmesinin en yaygın nedeninin sekonder çürük olduğunu bildirmiştir; hekimlerin %58.5'i, sekonder çürüğün kompozit restorasyonlarda amalgama göre daha sık görüldüğünü ifade etmiştir (Kopperud & ark., 2016). Ayrıca yapılan bu çalışmada, nem kontrolü (%58.9) ve hastanın çürük aktivitesi (%52.1) sekonder çürük gelişiminde kritik faktörler olarak değerlendirilmiştir (Kopperud & ark., 2016). Restorasyon marjiniinde başlayan bu lezyonlar, marjinal sızıntıyı artırarak adeziv arayüzün bütünlüğünün zayıflamasına ve dentine doğru ilerleyen yapısal kayıplara yol açmakta; bu süreç

sonunda restorasyonun yerinden çıkmasına veya yeniden yapılmasını gerektirecek düzeyde başarısızlığa neden olabilmektedir (Gordan & ark., 2015). Restorasyonun tamamen yenilenmesi ise hem maliyeti artırmakta hem de her yenilemede sağlıklı diş dokusunda ilave kayba yol açmaktadır (Santos & ark., 2024). Bu nedenle sekonder çürüğün önlenmesi, restoratif tedavilerin uzun dönemli başarısı ve diş dokusunun korunması açısından kritik öneme sahiptir.

Günümüzde kullanılan konvansiyonel restoratif materyaller (kompozit rezinler, amalgam, geleneksel cam iyonomer simanlar) pasif yapıdadırlar ve oral bakterilere karşı intrinsik bir antibakteriyel özellik taşımazlar. Özellikle estetik açıdan yaygın kullanılan kompozit rezinler, plak birikimini veya bakteriyel üremeyi engelleyici bir etki sunmadığından, restorasyon sınırlarında plak retansiyonu ve asit üreten biyofilm oluşumu sekonder çürük riskini artırmaktadır (Busscher & ark., 2010). Klinik plak analizleri, kompozit restorasyonların etrafında amalgam veya cam iyonomerlere kıyasla daha kalın biyofilm tabakası ve daha yüksek düzeyde laktik asit üreten bakteri bulunduğunu göstermiştir (Svanberg, Mjör, & Orstavik, 1990). Florür salabilen cam iyonomer simanlar (GİS) ve rezin modifiye cam iyonomer simanlar her ne kadar belirli düzeyde antikaryojenik etki gösterse de, bu etkinlik klinik açıdan sınırlı kalmakta ve söz konusu materyaller mekanik dayanıklılık bakımından kompozit rezinlerle kıyaslandığında yetersiz performans sergilemektedir (Xie & ark., 2000). Bu nedenlerle güncel materyaller ya biyofilm kontrolünde yetersiz kalmakta ya da mekanik olarak sınırlı endikasyon alanlarına sahip olmaktadır. Bu sınırlılıklar, antibakteriyel restoratif materyal geliştirme çabalarını teşvik eden temel etkenlerdir.

Antibakteriyel Restoratif Materyallerin Tarihsel Evrimi

Sekonder çürüğün restorasyon ömrünü kısaltan etkisinin anlaşılmasıyla birlikte, restoratif materyallerin yalnızca pasif bir

dolgu değil, biyofilm kontrolüne katkı sağlayan aktif sistemler haline getirilmesi yönünde araştırmalar başlamıştır. 1980'lerin sonu ve 1990'larda ilk girişimler, kompozit rezinlere sodyum florür, klorheksidin, benzalkonyum klorür ve gümüş bileşikleri gibi çözünebilir antimikrobiyal ajanların eklenmesiyle gerçekleşmiştir (Bapna, Murphy, & Mukherjee, 1988; Jedrychowski, Caputo, & Kerper, 1983). Bununla birlikte, bu erken dönem materyallerin önemli bir sınırlılığı, antibakteriyel ajanların hızlı ve kontrolsüz şekilde salınması sonucu hem biyomalzemenin mekanik bütünlüğünün zayıflaması hem de potansiyel sitotoksositeye ilişkin endişelerin artmasıydı. Nitekim, yaklaşık 1–5 µm çapındaki metal veya metal oksit partiküllerinin rezin matrisine dahil edilmesi, yalnızca yaklaşık 6 saate kadar süren kısa süreli bir bakteriyostatik etki sağlamış ve bu etkisiz salınım profili uzun dönem antibakteriyel etkinliği ciddi şekilde kısıtlamıştır (Tanagawa & ark., 1999). Ayrıca antibakteriyel etkinlik sağlayan florür konsantrasyonları, hidroksiapatit çözünürlüğünü azaltmak için gereken düzeylerin üzerine çıkmakta ve bu da klinik açıdan istenmeyen bir durum oluştırmaktaydı (Benelli & ark., 1993). Tüm bu zorluklar, dental materyallerde daha dayanıklı ve biyouyumlu antibakteriyel teknolojilerin geliştirilmesi yönünde bir eğilim doğurmuştur.

Kuaterner amonyum monomerlerinin (QAM'ler) araştırılması, ilk nesil bileşiklerden daha ileri bir aşamaya geçişi mümkün kılmıştır. Önde gelen bir QAM olan metakriloyloksidodesilpiridinyum bromür (MDPB), antibakteriyel rezin tasarımında önemli bir yenilik olarak öne çıkmıştır (L. Cheng & ark., 2017). Florür ve gümüş iyon salınımına dayalı bir mekanizma ile etki gösterirken, MDPB rezin matriksi içinde kovalent olarak bağlanmakta ve sızıntı olmaksızın sürekli antibakteriyel aktivite sağlamaktadır. Bu durum, rezin matriksinin mekanik ve fiziko-kimyasal özelliklerini minimal düzeyde etkileyerek mikrobiyal inhibisyon sağlayabilen sızıntısız bir bileşik

sınıfının ortaya çıkmasına olanak vermiştir (Makvandi & ark., 2018). QAM'ler, rezin yüzeyinde bakteriyel kolonizasyonu engelleyen temas-aktif ajanlar olarak tasarlanmıştır (Zhu & ark., 2022).

Aynı dönemde, 1990'ların sonu ve 2000'lerin başında, nanoteknoloji uygulamaları dental rezinlerin antibakteriyel nanoparçacıklarla yeniden formüle edilmesini mümkün kılmıştır. Geleneksel antibakteriyel ajanların aksine, nano-ölçekli yapılar çok daha yüksek bir antibakteriyel aktivite-mekanik özellik oranı sağlayarak antimikrobiyal etkinliğin materyalin temel fiziksel özelliklerinden ödün verilmeden elde edilmesine imkân tanımaktadır (Balhaddad & ark., 2021). Yüksek yüzey alanı/hacim oranları sayesinde nanopartiküller bakteriyel inhibisyon için daha düşük konsantrasyonlarda yeterli olmakta, böylece etkin performans sürdürülürken gerekli antimikrobiyal madde miktarı azalmaktadır (L. Cheng & ark., 2015). Ayrıca nano-yapılar doğrudan hücre membranının bozulması, oksidatif stres indüksiyonu ve hücre içi süreçlerin bozulması gibi birden fazla inaktivasyon mekanizması sunmaktadır (Melo & ark., 2013).

Antibakteriyel nano-yapıların bir diğer önemli avantajı, *Streptococcus mutans*, *Streptococcus sanguinis* ve *Porphyromonas gingivalis* gibi çeşitli oral patojenlere karşı etkili olmalarıdır (Almoudi & ark., 2018). Gümüş (AgNP), çinko oksit (ZnO), titanyum dioksit (TiO₂) ve grafen temelli materyaller gibi metal ve metal oksit nanopartiküllerinin hem Gram-pozitif hem de Gram-negatif bakterileri inhibe edebildiği gösterilmiştir (Balhaddad & ark., 2021).

Bununla birlikte, antibakteriyel amaçla metal veya metal oksit nanopartiküllerinin kullanımında temel endişelerden biri kontrolsüz salınımdır (Ebenezer & ark., 2025). Bu durumda nanopartiküller uygulamanın erken dönemlerinde “ilk patlama etkisi” sergileyerek kısa sürede yüksek miktarda antimikrobiyal

ajanın açığa çıkmasına neden olur. Bu olgu, antibakteriyel etkinliği kısa vadeyle sınırlandırmakta ve materyalin uzun dönem performansını azaltmaktadır (Ebenezer & ark., 2025). Ayrıca nanopartiküllerin sitotoksikite ve biyouyumluluk açısından oluşturduğu riskler hâlen önemli bir tartışma konusudur; özellikle metal nanopartiküllerinin kan-beyin bariyerini geçebilmesi veya dokularda birikebilmesi olasıdır (Wang & ark., 2023). Gümüş ve çinko oksit gibi bazı nanopartiküllerin oksidatif stres ve inflamatuvar yanıt oluşturabildiği bildirilmiş olup, bu durum dental uygulamalarda uzun vadeli güvenlik açısından endişe yaratmaktadır (Manke, Wang, & Rojanasakul, 2013).

Biyopolimerler, özellikle kitosan, pozitif yüklü yapısı sayesinde oral patojenlerin membran bütünlüğünü bozarak güçlü antibakteriyel etki göstermekte ve aynı zamanda biyouyumluluk avantajı sunmaktadır (S. Yang & ark., 2022). Düşük konsantrasyonlarda kompozitlere eklenen kitosan, plak birikimini azaltırken bağlanma dayanımı gibi kritik mekanik özellikleri koruyabilmektedir; ek olarak, kitosanın kalsiyum–fosfat etkileşimleri yoluyla dentin remineralizasyonunu destekleyebilmesi, bu materyalleri çok işlevli hale getirmektedir (Khan & ark., 2020).

Antimikrobiyal peptitler (AMP) de yeni nesil antibakteriyel yaklaşımlar içinde ilgi çekmektedir. İnsan vücudunun doğal savunma mekanizmalarında da yer alan bu küçük pozitif yüklü peptitler, bakteriyel zarları hedef alarak güçlü ve seçici bir antimikrobiyal etki gösterebilir. Günümüzde bazı sentetik antimikrobiyal peptitlerin implant yüzeylerine kaplanması veya kompozit materyallere kovalent bağlarla eklenmesi üzerine çalışmalar yapılmaktadır (Esteves & ark., 2022). Amaç, restorasyon yüzeyinde uzun süreli bir biyofilm direnci elde etmektir. Örneğin, spesifik oral patojenleri hedef alan peptit tasarımları sayesinde, genel mikrobiyotaya çok zarar vermeden çürük yapıcı bakterilerin inhibe edilmesi teorik olarak mümkündür. Antimikrobiyal peptitler,

bakteriyel quorum-sensing sinyal yollarının inhibisyonu veya hücre membranının bütünlüğünü bozarak etki gösteren, bu nedenle biyofilm oluşumunu yüzey-temaslı mekanizmalarla baskılayan çok yönlü biyolojik ajanlar olarak öne çıkmaktadır (Ramburrun & ark., 2021). Literatürde bu peptitlerin dental kompozitlere veya adezivlere entegre edilmesiyle ilgili henüz sınırlı sayıda çalışma olsa da, geleceğin biyomateryalleri arasında değerlendirilmektedir (Nair & ark., 2024). Ancak peptitlerin polimerizasyon sırasında stabil kalması, zamanla aktivitelerini yitirmemeleri ve maliyet etkin üretilebilmeleri gibi zorluklar aşılması beklemektedir.

Yeni nesil antibakteriyel stratejilerin belirleyici unsurlarından biri, kullanılan antimikrobiyal ajanların çevre dostu ve sürdürülebilir nitelikte olmasıdır. Bu bağlamda, bitkisel kökenli özütler ve doğal bileşikler son yıllarda restoratif diş hekimliği araştırmalarında dikkat çekici bir yer edinmiştir. Çay polifenoller, flavonoidler ve propolis gibi fenolik bileşikler uzun süredir antimikrobiyal özellikleriyle bilinmekte olup ağız gargaralarında kısa süreli temas sağlayan yardımcı ajanlar olarak kullanılmaktadır (W. Xu & ark., 2025). Bu doğal bileşiklerin restoratif materyallere doğrudan eklenmesiyle, bu ajanların restorasyon sınırlarında daha uzun süreli, lokalize ve klinik olarak anlamlı bir antimikrobiyal etki göstermesi hedeflenmektedir (Nair & ark., 2024). Yakın tarihli çalışmalar, fenolik fitokimyasalların restoratif materyallere dahil edilmesinin ikincil çürüğü önlemede kayda değer bir potansiyel sunduğunu ve doğal kaynaklı bu ajanların antibakteriyel restorasyon kavramını güçlendirebileceğini bildirmektedir (Nair & ark., 2024).

Bitkisel kaynaklı ajanların yanı sıra, yeşil sentez yöntemleriyle üretilen nanopartiküller de biyoyumlu ve ekolojik olarak duyarlı antimikrobiyal sistemlerin gelişiminde önemli bir yer edinmiştir. Biyolojik yöntemlerle sentezlenen nanopartiküller, hem toksik kimyasal kullanımını azaltmakta hem de yüzeylerindeki doğal organik kaplamalar sayesinde biyolojik aktiviteyi artırabilmektedir.

Örneğin üzüm çekirdeği ekstresi kullanılarak yeşil sentez yöntemiyle elde edilen TiO₂ nanopartiküllerinin %10–20 oranlarında kompozit rezinlere eklenmesi, *S. mutans* ve laktik asit bakterilerine karşı belirgin antibakteriyel etki göstermiştir (Abozaid, El-Aal, & ark., 2025). Aynı sistemde, polifenollerin indirgeme ve stabilizasyon ajanı olarak işlev görmesi nanopartiküllerin biyolojik etkinliğini artırmış; bu yapı, kompozitin bükülme dayanımı ve mikrosertlik gibi mekanik özelliklerini iyileştirirken polimerizasyon büzülmesini de azaltmıştır (Abozaid, El-Aal, & ark., 2025). Moleküler modelleme çalışmaları, bu nanopartiküllerin bakterilerin çürük yapıcı enzimlerine bağlanarak inhibitör etki oluşturduğunu ve biyofilm gelişimini doğrudan engellediğini ortaya koymuştur (Abozaid, El-Aal, & ark., 2025).

Çevre dostu antimikrobiyal sistemlerin bu bütüncül yaklaşımı, restoratif materyallerde hem biyolojik güvenliği hem de klinik performansı artırma potansiyeli taşımaktadır. Güncel eğilimler, tek bir antibakteriyel ajana dayalı çözümlerden ziyade çok bileşenli, entegre ve fonksiyonel sistemlerin geliştirilmesine yönelmiştir. Bu yeni sistemlerde amaç; biyofilm direnci, yeniden mineralizasyon kapasitesi ve mekanik dayanıklılığın klinik gereksinimler doğrultusunda dengelenmesidir (Zalega & Bociong, 2024). Bununla birlikte literatürde kullanılan antimikrobiyal modifikasyonların çeşitliliği, sonuçların standardizasyonunu güçleştirmekte ve klinik açıdan en etkili stratejilerin belirlenmesi için daha uzun süreli araştırmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca materyale eklenen her yeni bileşenin bağlanma dayanımı, aşınma direnci ve renk stabilitesi gibi uzun dönem özelliklere etkisi kapsamlı şekilde değerlendirilmelidir. Mevcut bilimsel kanıtlar, iyi tasarlanmış antibakteriyel restoratif materyallerin ikincil çürük görülme sıklığını azaltabileceğini ve restorasyonların klinik ömrünü uzatabileceğini göstermektedir (Zalega & Bociong, 2024). Gelecekte standartlaştırılmış protokollerle geliştirilecek bu

materyallerin klinik uygulamalara entegre edilmesi, restoratif tedavilerin uzun dönem başarısını önemli ölçüde artıracaktır.

Antibakteriyel Restoratif Materyallerin Etki Mekanizmaları

- **Salınabilir Ajanlarla Antibakteriyel Etki**

Restoratif materyaller, içeriklerine eklenen antimikrobiyal ajanların kontrollü şekilde salınmasıyla çevredeki patojenlere karşı koruyucu etki gösterebilir. Salınabilir ajanlar arasında klorheksidin (CHX), gümüş nanopartiküller (AgNP) ve florür iyonları öne çıkmaktadır.

CHX; gram-negatif, gram-pozitif bakteriler, bazı virüsler ve mantarlara karşı geniş spektrumlu bir antiseptiktir (Boaro & ark., 2019). Rezin matris içinde mikro-kapsüllere veya nanotüplere yüklenerek yavaş salındığında, CHX hem *Streptococcus mutans* gibi çürük etkenlerini hem de periodontal bakterileri etkili biçimde inhibe eder (Tejas Barot, Rawtani, & Kulkarni, 2020). Ayrıca, kompozit rezine %5 oranında eklenen CHX/ACP çekirdek-kabuk nanoparçacıklarının, klorheksidin antibakteriyel etkisi ile amorf kalsiyum fosfatın yapısal özelliklerini bir araya getirerek *Streptococcus mutans* büyümesini belirgin ve güçlü bir şekilde baskıladığı gösterilmiştir (Y. Yang & ark., 2021). Kil veya nanotüp gibi taşıyıcılar, CHX'in mekanik özellikleri zayıflatmadan matrise entegre edilmesini mümkün kılmaktadır (Zalega & Bociong, 2024).

Gümüş içeren materyaller de salınabilir antibakteriyel sistemlerin önemli bir örneğidir. AgNP'ler düşük düzeyde Ag⁺ iyonu salarak bakteri zarına bağlanır, hücre içi protein ve DNA'yı etkileyerek çok yönlü bir öldürücü etki oluşturur. Örneğin hidroksiapatit nanotaneceklerine yüklenmiş AgNP'ler ile modifiye edilen kompozitlerde *S. mutans* biyofilminin belirgin azalması rapor edilmiştir (Ai & ark., 2017). Ayrıca antibiyotik bağlı AgNP'ler (ör. siprofloksasin-AgNP) hem *S. mutans* hem *E. faecalis* üzerinde yüksek bakterisidal etki göstermektedir (Arif & ark., 2022). Klinik

bir örnek olarak gümüş-diamin florür (SDF) hem yüksek florür içeriğiyle mine/dentin güçlendirir hem de Ag⁺ salınımı ile çürük lezyonlarındaki bakterileri hızlı şekilde elimine eder (N. Zhang & ark., 2018).

Florür salan cam iyonomer simanlar ve rezin modifiye cam iyonomerler, uzun yıllardır ikincil çürüğü azaltmak amacıyla kullanılmaktadır. Florür iyonları diş dokusuna bağlanarak demineralizasyonu azaltır, aynı zamanda bakterilerin glikolitik enzimlerini (özellikle enolaz ve F-ATPaz) inhibe ederek asit üretimini düşürür (ten Cate & Featherstone, 1991). Bu mekanizma S. mutans biyofilminin erken evre gelişimini bozar. Ancak florürün antibakteriyel etkisi doğrudan bakterisidal olmaktan çok anti-karyojenik niteliktedir (ten Cate & Featherstone, 1991).

Salınabilir sistemlerin başlıca üstünlüğü, antimikrobiyal etkinin restorasyon kenarında özelleşmiş olmasıdır; böylece sistemik yan etki riski düşer ve direnç gelişimi olasılığı azalır (Mitwalli & ark., 2020). Bununla birlikte ajan rezervi tükendikçe etkinlik azalır ve materyalde oluşan boşluklar zamanla mekanik zayıflamaya yol açabilir (Mitwalli & ark., 2020). Bu nedenle sürekli ve kontrollü salınım sağlayabilen, aynı zamanda yapısal dayanımı koruyan yeni tasarımlar üzerinde çalışılmaktadır.

• **Kontakt Öldürme Mekanizmaları**

Salınabilir sistemlerden farklı olarak, “kontakt öldürme” stratejisinde antibakteriyel etkinin ortaya çıkması için ortam sıvısına herhangi bir antimikrobiyal ajanın difüzyonu gerekmez. Bunun yerine, antimikrobiyal etkinlik rezin matrisine kovalent olarak bağlanmış, kalıcı pozitif yüklü katyonik gruplar aracılığıyla gerçekleşir. Bu yaklaşımın en bilinen örnekleri kuaterner amonyum bileşikler (QAC ve QAM) içeren monomerlerdir.

QAC’lar, yüzeylerinde negatif yük taşıyan bakterilerle elektrostatik etkileşime girerek hücre zarının bütünlüğünü bozar,

membran geçirgenliğini artırır ve sitoplazmik içeriğin sızmasına neden olur (Mitwalli & ark., 2020). Bu mekanizma, bakteri hücresinin hızlı ve geri dönüşümsüz şekilde ölümüyle sonuçlanır. Örneğin DMAHDM gibi 12 karbon zincirli QAM monomerlerinin kompozit rezinlere %5–10 oranında eklenmesi, Streptococcus mutans başta olmak üzere çeşitli oral patojenlere karşı güçlü temasla öldürme etkisi oluşturmuştur (Fanfoni & ark., 2021). Benzer şekilde, ticari adezivlerde kullanılan MDPB, dentin yüzeyinde kalan bakterilerin uzun süreli olarak inaktive edilmesini sağlayan başarılı bir kontakt öldürücü örneğidir.

Kontakt öldürme etkinliği, yalnızca monomer bazlı QAM yapılarıyla sınırlı değildir. QAM modifiye nanopartiküller, bis-kuaterner dimetakrilatlar ve kuaterner amonyum silanlarla yüzey fonksiyonlandırılmış materyaller, pozitif yük yoğunluğunu artırarak bakterisidal etkiyi daha da güçlendirmektedir (Fanfoni & ark., 2021). Nitekim bazı bis-QAC monomerlerinin yalnızca 1 mg/mL düzeyinde bile tam bakterisidal aktivite gösterebildiği rapor edilmiştir (Fanfoni & ark., 2021).

Bu mekanizmanın dikkat çekici bir yönü, etkisinin yalnızca çürük etkenleriyle sınırlı olmayıp periodontal patojenler (P. gingivalis), endodontik enfeksiyon bakterileri (E. faecalis) ve hatta mantarlara (C. albicans) kadar uzanan geniş bir mikrobiyal spektrumunu kapsamasıdır (Mitwalli & ark., 2020). Bu durum, kontakt öldürme sistemlerinin karmaşık dental biyofilmlerle mücadelede çok yönlü bir potansiyel taşıdığını göstermektedir.

Kontakt öldürme stratejisinin en önemli avantajı etkinin kalıcı olmasıdır. Zira aktif antimikrobiyal gruplar matrikse kovalent olarak bağlıdır; bu nedenle zamanla tükenmez ve materyalin ömrü boyunca aktif kalabilir, ayrıca dış ortama difüze olan bir ajan bulunmadığından, bakterilerin düşük doz maruziyeti sonucu direnç geliştirme riski oldukça düşüktür (Mitwalli & ark., 2020).

Öte yandan bazı sınırlılıklar bulunmaktadır. Öncelikle, yüksek konsantrasyonlarda kullanılan QAC türevleri sito-toksisite riski taşıyabileceğinden, etkinlik ile biyouyumluluk arasındaki dengenin dikkatle optimize edilmesi gerekir (Zalega & Bociong, 2024). Bunun yanı sıra katyonik gruplar rezinin su alma kapasitesini artırarak uzun dönem mekanik dayanım üzerinde olumsuz etki oluşturabilir (Zalega & Bociong, 2024). Bir diğer önemli sorun ise, temasla öldürülen bakterilerin zamanla yüzeyde birikerek aktif fonksiyonel grupları maskeleyesi ve etkili yüzey temasını azaltmasıdır (Imazato, 2003). Bu nedenle güncel çalışmalar, yüzeyde biriken ölü bakterilerin uzaklaştırılmasını sağlayan, yani yüzeyin “kendi kendini temizleyebilmesini” mümkün kılan hibrit yaklaşımlar geliştirmeye odaklanmıştır. Bu kapsamda kontakt öldürmeyi kontrollü salınım sistemleriyle birleştiren çift etki mekanizmaları da geliştirilmektedir (Mitwalli & ark., 2020).

Sonuç olarak, kontakt öldürme yaklaşımı, kalıcı, geniş spektrumlu ve salınıma bağlı olmayan bir antibakteriyel mekanizma sunması nedeniyle restoratif materyal tasarımında önemli bir yere sahiptir. Ancak klinik açıdan ideal performans için sitotoksisite, su emilimi, yüzeyde biyolojik kirlenme ve uzun dönem stabilite gibi parametrelerin dikkatle optimize edilmesi gerekmektedir.

- **Yüzey Topografisi ve Nano-Yapılarla Biyofilm Engelleme**

Restoratif materyallerin yüzey topografisi, mikrobiyal kolonizasyonun ilk basamağı olan adezyon sürecini doğrudan etkilediğinden, biyofilm gelişiminin kontrolünde kritik bir rol oynar. Geleneksel olarak pürüzsüz ve iyi parlatılmış yüzeylerin plak birikimini azalttığı bilinmekle birlikte, güncel biyomalzeme araştırmaları yüzeyi sadece düzleştirmek yerine, mikro ve nano ölçekli desenler oluşturarak aktif antibiyofilm özellikler kazandırmaya odaklanmaktadır.

Doğadan ilham alan mikrodeseñler bu yaklaşımın önemli bir örneğidir. Köpekbalığı derisinden esinlenilen Sharklet mikropaternaleri, yüzey temas alanını azaltarak bakteriyel yapışmayı %90–99 oranında azaltabilmektedir (Mann & ark., 2014). Bu etkili biyofilm azaltımı, herhangi bir kimyasal ajan kullanılmaksızın yalnızca fiziksel topografi ile sağlanmaktadır. Benzer şekilde, cicada ve yusuşuk (dragonfly) kanatlarında bulunan nanoskopik sütun yapıları, bakterilerin hücre zarını temas anında mekanik olarak yırtarak öldürebilmektedir (Elliott, Wiggins, & Dua, 2021). Bu biyomimetik nanopillar veya nanospike yüzeylerin dental materyallere uyarlanması hâlâ erken araştırma aşamasında olsa da, teorik olarak restorasyon yüzeylerinde plak birikimini anlamlı şekilde azaltma potansiyeli taşımaktadır.

Süperhidrofobik yüzeyler de fiziksel olarak biyofilmi engelleyen bir diğerk stratejidir. Yüzeyde oluşturulan nanometrik pürüzler, yüksek temas açılı su damlacıkları oluşturarak bakterilerin tutunması yerine damlacıklarla birlikte yüzeyden uzaklaşmasını teşvik eder. Ancak ağız ortamında tükürük ve pelikül oluşumu gibi faktörler bu etkinin uzun vadede stabilitesini sınırlayabilmektedir.

Topografiye dayalı bu yaklaşımların temel avantajı, kimyasal bir ajan gerektirmeden pasif biyofilm direnci sağlamasıdır. Ancak pasif yapıların bakterileri öldürmek yerine yalnızca tutunmayı azalttığı unutulmamalıdır. Bu nedenle yüzey paternleri genellikle aktif antimikrobiyal mekanizmalarla birleştirilmektedir. Örneğın, kuaterner amonyum monomerleri ile kontakt öldürme sağlayan yüzeylerin, MPC gibi anti-fouling polimerlerle kaplandığında daha güçlü antibakteriyel etki gösterdiği bildirilmiştir (Cherchali & ark., 2017).

Bu stratejilerin klinik kullanıma geçmesindeki en önemli zorluklar; yüzey desenlerinin ağız içi aşınmaya dayanıklılığı, tükürük proteinlerinin nano-yapıları kaplayarak etkinliği azaltma riski ve intraoral polimerizasyon koşullarının patern bütünlüğünü

bozabilmesidir. Tüm sınırlamalara rağmen yüzey topografisine dayalı antibakteriyel tasarımlar, toksik ajanlara ihtiyaç duymadan uzun süreli biyofilm kontrol potansiyeli sunduğu için gelecekte restoratif materyal geliştirme çalışmalarında önemli bir araştırma alanı olmaya devam edecektir.

- **pH-Duyarlı ve Uyarana Cevap Veren Sistemler**

Ağız ortamı, özellikle dental plak içinde mikrobiyal metabolizma nedeniyle sürekli pH değişimlerinin yaşandığı dinamik bir yapıdır. Çürük yapıcı bakterilerin fermente ettiği şekerler asit oluşumuna yol açar; pH'nin düşmesiyle diş sert dokuları çözünmeye başlar. Bu nedenle, ortam değişikliklerini algılayarak yalnızca gerekli koşullarda aktifleşen “akıllı” restoratif materyaller, son yıllarda önemli bir araştırma alanı hâline gelmiştir.

pH-duyarlı sistemler, asidik ortamda antibakteriyel etkinliği artıracak şekilde tasarlanır. Örneğin çinko içeren akıllı cam partikülleri nötr pH'de minimal iyon salgılamak, pH düştüğünde hızla Zn^{2+} serbest bırakarak *S. mutans* üzerinde öldürücü etki gösterir (Deng & ark., 2022). Benzer şekilde, düşük pH'de çözünürlüğü artan florür salan materyaller asit atağı sırasında hem mine koruması hem de bakteriyel asit üretiminin baskılanmasını sağlar. Bir diğer strateji ise polimer matris içine yerleştirilen pH-duyarlı mikro/nanokapsüllerdir; bu kapsüller yalnızca asidik ortamda açılarak antibakteriyel ajanları serbest bırakır.

pH dışında sıcaklık, ışık veya mekanik kuvvet gibi uyaranlara cevap veren sistemler de geliştirilmektedir (Cloutier, Mantovani, & Rosei, 2015). Örneğin hafif ısıyla etkinleşerek gümüş salan malzemeler, fototermal nanoparçacık içeren rezinler veya çiğneme basıncıyla mikro kapsülleri kırarak antibakteriyel madde veren restorasyonlar deneysel olarak değerlendirilmiştir (Mitwalli & ark., 2020).

Uyarana duyarlı bu yaklaşımların temel avantajı, antibakteriyel etkinin seçici ve kontrollü biçimde yalnızca ihtiyaç duyulduğunda ortaya çıkmasıdır. Böylece hem materyal ömrü uzar hem de oral mikrofloranın gereksiz baskılanması önlenir. Bununla birlikte, uyarın-tepki eşiklerinin doğru ayarlanması, üretim süreçlerinin karmaşıklığı ve materyalin uzun dönem stabilitesi gibi zorluklar mevcuttur. Ayrıca tüketici içecekleri gibi istenmeyen dış uyaranların yanlışlıkla salımı tetikleyebilmesi önemli bir sınırlamadır.

Sonuç olarak, pH-duyarlı ve diğer uyarılabilir sistemler, antibakteriyel etkinin hedefe yönelik biçimde kontrol edilebilmesini sağlayarak ikincil çürük önleme stratejilerinde önemli bir potansiyel taşımaktadır. Ancak klinik uygulamaya geçiş için uzun dönem simülasyonlar ve klinik çalışmalarla güvenlik ve etkinliklerinin doğrulanması gereklidir.

- **Antibakteriyel Peptitler ve Doğal Ajanlar**

Antimikrobiyel peptitler (AMP'ler) ve doğal biyolojik ajanlar, son yıllarda restoratif materyallerde antibakteriyel etkinliği artırmaya yönelik önemli araştırma alanları hâline gelmiştir. AMP'ler, insan tükürüğü ve nötrofillerinde doğal olarak bulunan, geniş antimikrobiyel spektruma sahip küçük proteinlerdir (Jiao & ark., 2019; Mitwalli & ark., 2020). Bakteriyel zar üzerinde porlar oluşturarak veya hücre içi hayati süreçleri bozarak etki gösterirler ve düşük immünojenisite ile iyi biyouyumluluk sergilerler; birden fazla biyolojik hedefe saldırımları nedeniyle klasik antibiyotiklere kıyasla direnç gelişimi daha zordur (Mitwalli & ark., 2020).

Son yıllarda çeşitli AMP'lerin dental materyallere entegre edildiği deneysel çalışmalar yapılmıştır. Histatin-5 türevlerinin, β -defensin-3 fragmanlarının ve sentetik peptitlerin (ör. DHVAR4, GH12, GL13K) kompozit veya adeziv sistemlerde Streptococcus mutans ve diğer oral bakterilere karşı anlamlı antibakteriyel etki

sağladığı gösterilmiştir (Aida & ark., 2018). Nisin gibi gıda kaynaklı peptitlerin adezivlere eklenmesiyle biyofilm oluşumunda %99'a varan azalmalar bildirilmiştir (Su & ark., 2018).

Doğal kaynaklı antibakteriyel ajanlar da restoratif materyaller için önemli bir alternatif oluşturmaktadır. Polifenoller (ör. EGCG, kızılıçık ekstraktı), propolis ve esansiyel yağlar, hem antibakteriyel hem de antiinflamatuvar özellikleri nedeniyle ilgi görmektedir. EGCG'nin *S. mutans*'ın ekstrasellüler polisakkarit sentezini inhibe ettiği; propolis ilavesinin cam iyonomerlerde *S. mutans*, *Lactobacillus* ve *Candida* türlerine karşı etkinliği artırdığı bildirilmiştir (Abozaid, Elwakeel, & ark., 2025). Kekik ve tarçın yağları gibi esansiyel yağların düşük hacimlerde bile dental biyofilmleri önemli ölçüde azalttığı raporlanmıştır (Zalega & Bociong, 2024).

Bir diğer doğal ajan olan kitosan, pozitif yüklü yapısı sayesinde bakteriyel hücre duvarlarıyla etkileşerek membran bütünlüğünü bozar ve biofilm gelişimini engeller. Kitosan nanoparçacıkları, hem kompozit yüzeyinde biyofilm birikimini azaltmakta hem de bakır veya çinko gibi iyonlarla sinerjik etki gösterebilmektedir (V. W. Xu & ark., 2023).

Bu biyolojik ajanların en önemli avantajı yüksek biyouyumluluk, daha düşük toksisite ve çevre dostu olmalarıdır. Bununla birlikte, peptitlerin proteolitik enzimlere karşı hassasiyeti, doğal özütlerdeki bileşim değişkenliği ve bazı doğal ajanların polimerizasyon davranışını veya mekanik dayanımı olumsuz etkileyebilmesi önemli sınırlamalardır. Bu nedenle optimal dozajın belirlenmesi ve bu ajanların stabilize edilerek yapısal bütünlüğünün korunması gerekmektedir.

Güncel araştırmalar, AMP'lerin ve doğal moleküllerin tek başına kullanımından ziyade farklı mekanizmaları birleştiren hibrit stratejilere yönelmektedir. Örneğin, kuaterner amonyum

monomerleri ile temasla öldüren etkilerin, nisin gibi doğal peptitlerin difüzyon temelli etkileriyle birleştirilmesi çok daha güçlü antibakteriyel sonuçlar verebilmektedir (Aida & ark., 2018; Su & ark., 2018). Bu tür kombine sistemler özellikle yüksek çürük riski taşıyan hastalarda restorasyon ömrünü uzatma potansiyeline sahiptir.

Genel olarak, antimikrobiyel peptitler ve doğal ajanlar restoratif materyallerde biyofilm kontrolü için umut verici çok yönlü yaklaşımlar sunmaktadır. Bununla birlikte, klinik uygulamaya geçiş için uzun dönem stabilite, materyal-mekanizma uyumu ve biyogüvenlik açısından daha fazla çalışma gereklidir. Gelecekte iyi standardize edilmiş formülasyonların gelişmesiyle bu biyomimetik stratejilerin klinik uygulamalarda önemli bir yer edinmesi beklenmektedir.

Nanoteknoloji Temelli Antibakteriyel Restoratif Materyaller

- **Metal Oksit Nanopartiküller (Ag, ZnO, CuO) ile Zenginleştirilmiş Kompozit ve Cam İyonomer Sistemler**

Metal ve metal oksit nanopartiküllerinin (özellikle gümüş, çinko oksit ve bakır oksit) dental kompozit rezinler ve cam iyonomer simanlara eklenmesi, bu materyallere hem in vitro hem de in vivo antibakteriyel özellik kazandıran önemli bir nanoteknolojik yaklaşımdır (Aguilar-Perez & ark., 2020; Yin & ark., 2025). Gümüş nanopartikülleri (AgNP), oral ortamda sürekli gümüş iyonu salarak ve doğrudan bakteriyel hücre duvarı ile etkileşerek geniş spektrumlu bakterisidal etki gösterir; hücre membranını bozması, nükleik asit ve proteinlere bağlanması ve reaktif oksijen türleri üretmesi bu etkinliği pekiştirir (Maillard & Hartemann, 2013). Benzer şekilde çinko oksit nanopartikülleri (ZnONP), yüksek yüzey/hacim oranları sayesinde Zn^{2+} iyonu salımı ve oksidatif stres aracılığıyla bakteriyel membranı ve metabolik süreçleri hedef alır (Hoseinzadeh & ark., 2017). Bakır oksit nanopartikülleri (CuONP) ise uygun maliyeti ve geniş antimikrobiyal kapsamı nedeniyle alternatif bir seçenek olarak

değerlendirilmektedir (Ingle, Duran, & Rai, 2014). Bu nanopartiküllerin restoratif materyallere homojen şekilde dağıtılması, özellikle Streptococcus mutans başta olmak üzere çürük etkeni bakterilerin yüzeyde tutunmasını ve asit üretimini anlamlı biçimde azaltabilmektedir (Ingle, Duran, & Rai, 2014).

Bu nanopartiküllerin bazı belirgin avantajları bulunmaktadır. Ag, ZnO ve CuO nanopartikülleri çürük oluşumunda rol alan başlıca Gram-pozitif ve Gram-negatif bakterilere karşı kalıcı antibakteriyel etki gösterebilmekte; antibiyotiklerin aksine mikroorganizmaların bu partiküllere karşı direnç geliştirmesi oldukça güçtür (Yin & ark., 2025). ZnONP'nin FDA tarafından GRAS (genel olarak güvenli kabul edilen madde) statüsünde olması biyoyumumluluk açısından önemli bir üstünlüktür (Piccinno & ark., 2012). Ayrıca nanopartiküller, ışıkla sertleşme davranışı ve radyopaklık gibi materyal özelliklerine katkı sunabilmekte; hatta AgNP ve florür kombinasyonları demineralize dentinin remineralizasyonunu destekleyebilmektedir. Klinik açıdan ise düşük oranlarda nanopartikül ilavesi, bağlanma dayanımını etkilemeden biyofilm baskılanmasına olanak tanımakta ve özellikle AgNP ve CuONP içeren adeziv ve GİS'lerin ikincil çürük riskini azaltma potansiyeli çeşitli çalışmalarla gösterilmiştir (Yin & ark., 2025).

Bununla birlikte bazı sınırlılıkları da dikkate almak gerekir. Gümüş nanopartikülleri yüksek derişimlerde renklenmeye neden olarak estetiği bozabilir (Kachoei & ark., 2021). Ayrıca AgNP ve ZnONP'nin yüksek dozlarda sitotoksisite, oksidatif stres ve inflamasyon oluşturabileceği bildirilmiştir (Shi & ark., 2014). Metal nanoparçacıkların çevreye karışarak uzun vadede biyobirikime sebep olabileceği ve çevresel sürdürülebilirlik açısından ek değerlendirmeler gerektiği belirtilmektedir. Matris içinde nanopartiküllerin aglomerasyona eğilimli olması mekanik dayanımı zayıflatabilir; homojen dağılım ve yüzey silanizasyonu bu nedenle kritik önemdedir. Ayrıca pek çok çalışma hâlâ in vitro düzeyde olup,

özellikle CuONP ve ZnONP içeren restoratif materyallerin uzun dönem klinik performansına ilişkin veri sınırlıdır.

Mevcut literatür, nanopartikül katkılı restoratif materyallerin çürük etkeni bakterilerin kolonizasyonunu azaltarak restorasyon ömrünü uzatma potansiyeli taşıdığını göstermektedir (Bang & ark., 2022). Bununla birlikte, klinik uygulamaya geçiş için biyouyumluluk, uzun dönem stabilite ve optimum partikül konsantrasyonunun belirlenmesi gibi konularda daha kapsamlı in vivo ve klinik çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır.

- **Mezogözenekli Taşıyıcı Sistemler**

Nanoteknolojiye dayalı bir diğer önemli yaklaşım, mezogözenekli yapıya sahip nanotaşıyıcıların restoratif materyallere entegre edilmesidir. Mezogözenekli silika nanoparçacıkları (MSN) ve halloysit nanotüpler (HNT) gibi 2–50 nm çapında düzenli gözeneklere sahip bu taşıyıcı sistemler, antimikrobiyal ajanların yüksek miktarlarda yüklenmesine ve kontrollü biçimde salınmasına olanak tanır. MSN’ler geniş yüzey alanları ve düzenli por yapıları sayesinde klorheksidin (CHX) gibi ajanları depolayarak restoratif materyal içinde bir rezervuar görevi görürken, HNT’ler doğal yapıları gereği biyouyumlu olmaları ve iç boşluklarına çeşitli aktif maddeleri alabilme kapasiteleri nedeniyle avantaj sağlar . Bu taşıyıcılar, restorasyon uygulandıktan sonra ortam pH’sı veya tükürük difüzyonu gibi çevresel uyaranlar aracılığıyla yüklü ajanların yavaş ve sürekli salımını gerçekleştirerek uzun süreli antibakteriyel koruma oluşturur (Teng & ark., 2025).

Mezogözenekli taşıyıcıların antibakteriyel etkinliği temel olarak kontrollü salım mekanizmasına dayanır. CHX ile yüklenen mesopor silika partikülleri, salımın ani ve hızlı gerçekleştiği “burst” etkisini azaltır; bunun yerine daha stabil ve uzun süreli bir difüzyon profili sunarak restorasyon çevresinde antibakteriyel bir bariyer oluşturur (Teng & ark., 2025). HNT’ler de benzer şekilde farnesol,

cetilpiridinyum klorür veya gümüş iyonları gibi antimikrobiyal ajanları depolayabilir ve uçların kapatılması veya polimer kaplama gibi yöntemlerle çevresel uyaranlara duyarlı, yavaş salım özellikli sistemler hâline getirilebilir.

Bu taşıyıcıların belirgin avantajları bulunmaktadır. Öncelikle yüksek iç yüzey alanları, antimikrobiyal ajanların yüksek yükleme kapasitesine olanak verir ve uzun süreli antibakteriyel etkinlik sağlar. Ayrıca uygun konsantrasyonlarda kullanıldıklarında restoratif materyalin mekanik ve fiziksel özelliklerini belirgin biçimde etkilemezler. Örneğin HNT ilavesi, düşük oranlarda kompozitin eğilme ve basma dayanımını korurken, ZnO yüklü HNT ile modifiye edilen ortodontik simanların *S. mutans* biyofilmine karşı güçlü antibakteriyel etki gösterdiği bildirilmiştir (Seo, Kim, & Kwon, 2023). Silika ve HNT tabanlı nanotaşıyıcıların biyouyumluluğu yüksek olup doku kültürü çalışmalarında düşük toksisite sergilemektedir (Yuan, Tan, & Annabi-Bergaya, 2015). Ayrıca bu sistemler aynı anda birden fazla antibakteriyel ajanın yüklenmesine olanak tanıyarak hem temasla öldürme hem de salım temelli ikili etki stratejilerini mümkün kılar. Nitekim büyük gözenekli silikaların kuaterner amonyum gruplarıyla fonksiyonlandırılıp aynı zamanda CHX ile yüklenmesi sonucunda geliştirilen çift etkili nanokompozitlerde biyofilmin 24 saat içinde neredeyse tamamen elimine edildiği ve antibakteriyel etkinliğin 30 güne kadar sürdüğü rapor edilmiştir (Teng & ark., 2025). Bununla birlikte bazı sınırlılıklar mevcuttur. En belirgin sorun, salım hızının optimize edilmesidir; uygun şekilde tasarlanmadığında yüklenen ajanın hızlı ve kontrolsüz biçimde salınması etkinliğin kısa sürede kaybolmasına yol açabilir. Ayrıca yüksek oranda nanotaşıyıcı eklenmesi matriks bütünlüğünü ve polimerizasyon davranışını olumsuz etkileyebilir. Halloysit gibi taşıyıcıların yüksek yüklemeleri materyalin translüsensisini azaltarak estetiği bozabilir. Yüklenen ajanların

polimerizasyon ile kimyasal uyumluluğu ve uzun dönem stabilitesi de önemli bir tasarım kriteridir.

Mezogözenekli taşıyıcılarla yapılan çeşitli çalışmalar, bu sistemlerin dental restoratiflere entegre edildiğinde ciddi antibakteriyel avantajlar sağladığını göstermektedir. CHX yüklü SBA-15 tipi silika nanoparçacıklı kompozitlerin S. mutans biyofilmine karşı kalıcı inhibisyon sağladığı (J. F. Zhang & ark., 2014); QAM fonksiyonlandırılmış ve CHX ile doldurulmuş büyük gözenekli silikalardan oluşan ortodontik adezivlerin hem yüksek antibakteriyel etkinlik hem de geleneksel braket yapıştırıcılarına benzer bağ dayanımı sunduğu rapor edilmiştir (Teng & ark., 2025). HNT'lerin farnesol veya ZnO ile yüklenmiş versiyonları da antibakteriyel performansı artırmış ve mekanik dayanımı korumuştur (T. Barot & ark., 2020). Ag veya ZnO ile modifiye edilen HNT sistemlerinde ise sinerjik antibakteriyel etkinlik elde edilmiştir.

Sonuç olarak, mezogözenekli nanotaşıyıcılar dental restoratif materyallerde kontrollü antimikrobiyal ajan salımı sağlayan, uzun süreli biyofilm kontrol potansiyeli sunan ve mekanik özelliklerle uyumlu çalışabilen umut verici bir nanoteknolojik platform oluşturmaktadır. Bu materyaller özellikle ikincil çürük riskinin yüksek olduğu hastalarda veya ortodontik braket çevresi beyaz nokta lezyonlarının önlenmesinde klinik açıdan değerli olabilir. Ancak uzun dönem biyostabilite, optimum yükleme oranları ve klinik etkinlik konusunda daha fazla in vivo ve klinik araştırmaya ihtiyaç duyulmaktadır.

• Uyarılara Duyarlı “Akıllı” Nanomalzeme Sistemleri

Ağız ortamındaki dinamik değişimlere (pH, enzimler, sıcaklık vb.) yanıt verebilen akıllı restoratif nanomalzemeler, klasik inert dolgu materyallerinden farklı olarak çevresel uyaranları algılayıp buna uygun biyolojik ya da kimyasal tepkiler verebilmeleri nedeniyle dikkat çekmektedir (Fugolin, Huynh, & Rajasekaran,

2023). Bu sistemlerin merkezinde, ortam koşullarındaki belirli sinyalleri — özellikle asidik pH düşüşleri, bakteriyel enzim aktivitesi veya lokal sıcaklık artışı — “algılayan” ve bu uyarılara kimyasal dönüşüm veya kontrollü ajan salımı gibi mekanizmalarla yanıt veren akıllı polimerik ağ yapıları yer almaktadır (Fugolin, Huynh, & Rajasekaran, 2023). Dental uygulamalarda henüz araştırma aşamasında olsalar da bu nanomalzemelerin temel hedefi, başlangıç çürük lezyonlarında görülen asidik mikroçevreyi, bakteriyel metabolizmayı veya doku yıkımına katkıda bulunan enzimatik aktiviteleri spesifik olarak hedefleyerek uyarım-temelli antibakteriyel veya onarıcı etki oluşturmaktır. Bu bağlamda literatürde pH-duyarlı, enzim-reaktif ve ısıyla aktive olan akıllı nanomalzemeler, ağız içi patojen yükünü azaltma ve biyofilm kontrolünü güçlendirme potansiyelleriyle öne çıkan örnekler arasında yer almaktadır.

a. pH-Duyarlı Antibakteriyel Nanomalzemeler: Diş çürüğü açısından kritik bir faktör olan plak asidogenezisi, ağız ortamında lokal pH düşüşlerine yol açtığından, bu değişimleri algılayarak aktive olan pH-duyarlı akıllı polimerler restoratif diş hekimliği için önemli bir araştırma alanı oluşturmaktadır. Bu polimerler, yapılarındaki zayıf asidik veya bazik fonksiyonel grupların iyonizasyon derecesini pH değişimine bağlı olarak ayarlayabilmeleri sayesinde, nötr koşullarda inert kalırken asidik ortamda pozitif yük kazanan ve bakterilere karşı aktif hâle gelen dinamik ağ yapıları sunar (Fugolin, Huynh, & Rajasekaran, 2023; Ofridam & ark., 2021). Bu yaklaşımın tipik örneklerinden biri, fissür örtücü bir materyale düşük oranlarda eklenen DMAEM (dodecylmethylaminoethyl methacrylate) monomeridir. DMAEM nötr pH’da büyük ölçüde nötr halde bulunurken, plak pH’ı ~5 seviyelerine düştüğünde protonlanarak pozitif yüklü bir form kazanmakta ve bu sayede Streptococcus mutans canlılığı ile biyofilm metabolik aktivitesini anlamlı ölçüde azaltmaktadır (H. Li & ark.,

2021). Benzer bir pH-uyarı mekanizması Poly-1A adlı polimerde de görülmektedir; bu polimer nötr pH'da karşılıklı olarak nötralize olan pozitif ve negatif gruplar içerirken, pH düştüğünde karboksilat gruplarının protonlanması sonucu net pozitif yüzey yükü oluşmakta ve polimer yalnızca asidik ortamda bakterisidal etki göstermektedir (Fugolin, Huynh, & Rajasekaran, 2023). Zwitteriyonik polimerler de bu sınıfa dâhil olup, nötral pH'da yüksek hidrasyonlu bir anti-fouling yüzey sunarken, asidik koşullarda konformasyon değişikliği ile pozitif yüklerini açığa çıkararak hem adezyonu hem de bakteriyel canlılığı azaltabilmektedir (H. Li & ark., 2021). Bu çift fonksiyonlu yapı, hem biyofilmin yüzeye tutunmasını engellemesi hem de asidik ortamdaki patojenlere karşı aktif hâle gelmesi nedeniyle çürük önlemede avantajlıdır (Kim & ark., 2019). pH-duyarlı sistemlerin en önemli faydası, antibakteriyel aktivitenin yalnızca bakteriyel metabolizma sonucu oluşan asidik mikroçevrede devreye girmesidir. Böylece nötr pH'da faydalı mikrobiyotaya zarar verilmeden restorasyon çevresinde “ihtiyaç halinde aktive olan” bir koruyucu bariyer sağlanır (G. Cheng & ark., 2009). Nitekim DMAEM içeren deneysel sealant'larda antibakteriyel etkinliğin pH dalgalanmalarına karşı geri dönüşümlü olduğu ve geleneksel inert sealant'lara kıyasla daha uzun süreli koruma sunduğu gösterilmiştir (H. Li & ark., 2021). Ancak pH-uyarıya duyarlı polimerlerin tasarımında bazı zorluklar da bulunmaktadır. Öncelikle malzeme, gıda ve içecek kaynaklı geçici pH dalgalanmalarına karşı gereksiz aktivasyonu önleyebilecek bir pKa değerine sahip olmalıdır; yani protonasyon yalnızca bakteriyel asidogenezis sırasında görülen ~pH 5 civarında gerçekleşmelidir (Ofridam & ark., 2021). Ayrıca fonksiyonel grupların polimer matriksi içinde gömülü kalmayıp yüzeyde bakterilerle etkileşime geçebilecek şekilde konumlanması gerekir (Fugolin, Huynh, & Rajasekaran, 2023). Bu amaçla dallanmış, fırça tipi veya dendrimerik polimer mimarileri yüzeydeki fonksiyonel grup yoğunluğunu artırmak için kullanılmaktadır (Kocak, Tuncer, & Bütün, 2017). Tüm bu tasarım kısıtlarına rağmen, son çalışmalar pH-

duyarlı monomerlerin dental adeziv ve fissür örtücü sistemlere başarılı şekilde entegre edilebildiğini ve sekonder çürük gelişimini azaltmada kayda değer etkinlik sağlayabildiğini göstermektedir (Fugolin, Huynh, & Rajasekaran, 2023). Bu bulgular, pH-duyarlı akıllı polimerlerin geleneksel restoratif materyallerin yerini alabilecek potansiyel biyofonksiyonel alternatifler olarak değerlendirilebileceğini ortaya koymaktadır.

b. Enzim-Duyarlı Nanomalzemeler: Diş sert dokularının çürük veya preparasyon sonrası karşılaştığı bir diğer önemli biyolojik tehdit, bakteriyel ve konak kaynaklı enzimlerdir. Streptococcus mutans tarafından salgılanan glukoziltransferazlar (GTF), sakkarozu yapışkan ekstraselüler glukanlara dönüştürerek plağın diş yüzeyine tutunmasını kolaylaştırırken; tükürük ve dentin matriksinde bulunan hidrolitik enzimler restorasyon altındaki kollajenin yıkımına katkıda bulunarak sekonder çürüğe zemin hazırlar. Bu nedenle enzim-duyarlı akıllı polimer sistemleri, zararlı enzimlerin varlığını algılayıp onlara karşı hedeflenmiş şekilde yanıt üretebilecek biçimde tasarlanmaktadır (Ganesh, Baji, & Ramakrishna, 2014). Enzimlere duyarlı sistemlerde iki temel yaklaşım öne çıkmaktadır. İlk yaklaşım, spesifik enzim inhibitörlerinin polimer ağına kovalent olarak bağlanmasıdır. Bu yöntemde inhibitör, hedef enzimin (örneğin bakteriyel GTF veya konak MMP'ler) aktivitesi arttığında doğrudan bağlanarak işlevini baskılar. Bu stratejiyi kullanan deneysel kompozitlerin, GTF aktivitesini azaltarak çözünmez glukan sentezini düşürdüğü ve S. mutans biyofilminin tutunma kapasitesini belirgin şekilde sınırladığı bildirilmiştir (Fugolin, Huynh, & Rajasekaran, 2023). Böylece restorasyon etrafında plak oluşumunu destekleyen enzimatik temel ortadan kaldırılarak pasif bir antibiyofilm etkisi sağlanır. İkinci yaklaşım ise, antimikrobiyal ajan yüklü ve spesifik enzim varlığında parçalanabilen nano-taşıyıcıların polimer matrikse eklenmesidir. Esteraz gibi ağız içi enzimlere duyarlı kapsüller veya mezogözenekli partiküller, hedef enzim

tarafından hidrolize uğradığında kontrollü ilaç salımı gerçekleştirir. Örneğin, oktendin dihidroklorür (OCT) yüklü mesogözenekli silika partikülleri içeren bir adeziv, salisilik esteraz varlığında polimer içindeki ester bağlarının parçalanmasıyla OCT salmış ve böylece S. mutans biyofilmini etkili şekilde inhibe etmiştir (Stewart & ark., 2018). Bununla birlikte bu yöntemde ilacın salınımı aynı zamanda polimer ağının kısmi degradasyonu ile ilişkilidir; dolayısıyla antibakteriyel etkinlik ile malzeme bütünlüğü arasında bir denge kurulması gerekmektedir (Stewart & ark., 2018). Enzim-duyarlı sistemlerin önemli bir avantajı, oral mikroortamda doğal olarak bulunan enzimlerin birer biyolojik tetikleyici olarak kullanılmasıdır. Bu sayede materyal, bakteriyel yük veya enzim aktivitesi arttığında otonom olarak devreye girer ve yalnızca ihtiyaç halinde etki gösterir (Ganesh, Baji, & Ramakrishna, 2014). Ayrıca yüksek enzim spesifitesi, sistemin yalnızca hedeflenen biyokimyasal süreçleri—örneğin glukoz üretimi veya MMP kaynaklı kollajen yıkımı—engellemesini sağlayarak çevre dokuların normal fizyolojik işlevlerine en az müdahale edilmesine olanak tanır. Bununla birlikte, bu sistemlerin klinik uygulamaya geçişinde çözülmesi gereken bazı tasarım sorunları bulunmaktadır. Polimerin ağız ortamında değişken enzim konsantrasyonlarına rağmen tutarlı bir yanıt verebilmesi, duyarlılığını raf ömrü boyunca koruması ve kontrollü salım sağlarken yapısal bütünlüğünü kaybetmemesi kritik gerekliliklerdir. Bu nedenle çapraz bağ yoğunluğu, enzimle parçalanabilir segmentlerin uzunluğu ve polimer mimarisi gibi parametrelerin dikkatle optimize edilmesi gerekir. Başarılı bir tasarım ile enzim-duyarlı materyaller hem çürük ilerlemesini baskılayabilir hem de dentin matrisinin korunmasına ve hatta remineralizasyona katkıda bulunabilir. Güncel araştırmalar, polimerlere kovalent bağlı enzim inhibitörleri veya enzimle tetiklenen ilaç salım sistemleri ile hem antibakteriyel etkinin hem de doku koruyucu fonksiyonların aynı anda elde edilebildiğini göstermektedir (Fugolin, Huynh, & Rajasekaran, 2023). Gelecekte, pulpa veya periodontal dokularda

inflamasyonu tetikleyen sitokinleri algılayıp anti-inflamatuar ajan salabilen daha gelişmiş akıllı sistemlerin de geliştirilmesi beklenmektedir. Böylece restoratif materyaller yalnızca pasif bir dolgu elemanı olmaktan çıkıp, biyolojik çevre ile etkileşime giren ve patolojik süreçlere yanıt veren aktif terapötik platformlar hâline gelebilecektir (Fugolin, Huynh, & Rajasekaran, 2023).

c. Isı ile Aktive Olan (Termo-Duyarlı) Sistemler: Isıya duyarlı akıllı materyaller, belirli bir sıcaklık eşiğini aşınca fiziksel yapı veya mekanik özelliklerinde değişim oluşturarak aktifleşebilen polimerik sistemlerdir. Diş hekimliğinde bu termal uyaranlar, sıcak yiyecek-icecek tüketimiyle oluşan 35–55 °C arasındaki doğal sıcaklık dalgalanmaları ya da lazer ve manyetik alan gibi harici enerji kaynakları yoluyla ortaya çıkabilir (Ganesh, Baji, & Ramakrishna, 2014). Termo-duyarlı dental polimerler, sıcaklık artışıyla yumuşama, segmental gevşeme veya hacim değişiklikleri göstererek antimikrobiyal ajan salımını veya kendiliğinden tamir (self-healing) süreçlerini tetikleyebilir (Ganesh, Baji, & Ramakrishna, 2014). Bu alandaki yenilikçi yaklaşımlardan biri şekil hafızalı polimerlerdir. Düşük camsı geçiş sıcaklığına sahip belirli uretan bazlı polimer ağları, ağız sıcaklığının üzerine çıktığında geçici olarak yumuşayarak mikroçatlak ve marjinal boşluklara adapte olabilir; soğumayla birlikte yeniden sertleşerek bu mikrodefektleri tıkayabilir (Ganesh, Baji, & Ramakrishna, 2014). Böylece restorasyon içindeki mikrosızıntı yolları, harici bir ısı uygulamasıyla otonom şekilde kapatılabilir. Bir diğer strateji, manyetik nano-ısıtıcıların kullanılmasıdır. Manyetit gibi manyetik nanopartiküller, alternatif manyetik alan altında lokal ısı üreterek termolabil kapsüllerin açılmasını veya sıcaklığa duyarlı çapraz bağların kopmasını tetikleyebilir (Thevenot & ark., 2013). Bu sayede polimer matrikse gömülü antiseptikler yalnızca hedeflenen sıcaklık aralığında kontrollü biçimde salınabilir (Thevenot & ark., 2013).

Termo-duyarlı sistemlerin geliştirilmesindeki başlıca mühendislik engeli, dental kompozitlerin genellikle $>100\text{ }^{\circ}\text{C}$ civarındaki yüksek camsı geçiş sıcaklıklarıdır; bu özellik ağız içi dayanıklılık için gerekli olsa da $37\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye yakın sıcaklıklarda akıllı yanıt oluşumunu sınırlar. Güncel araştırmalar, sıcaklık ve pH gibi birden fazla uyararı algılayabilen çok modlu polimer ağları üzerinde yoğunlaşarak, ağız ortamının karmaşık biyokimyasal koşullarına dinamik şekilde uyum sağlayan ileri nesil restoratif sistemlerin geliştirilmesini amaçlamaktadır.

• **Polimer-Nanoparçacık Hibrit Sistemleri**

Organik antimikrobiyal polimerlerin inorganik nanopartiküllerle hibrit kullanımı, antibakteriyel restoratif materyaller için etkili bir strateji sunmaktadır. Bu yaklaşımda kuaterner amonyum metakrilatlar (QAM) polimer matrikse kovalent bağlanarak yüzeyde kalıcı pozitif yük oluştururken, gümüş nanopartikülleri (AgNP) sürekli Ag^+ salarak temas etmeyen bakterilere de etki eder. Böylece temasla öldürme ve iyon salımına dayalı iki farklı mekanizma aynı materyalde birleştirilmiş olur (L. Cheng & ark., 2015).

QAM–Ag hibritleri, *Streptococcus mutans* biyofilmini baskılamada tekil ajanlardan daha üstün performans göstermekte; hem bakteriyel canlılığı hem de asit üretimini belirgin şekilde azaltmaktadır (L. Cheng & ark., 2015). Bazı sistemler, amorf kalsiyum fosfat gibi remineralizan partiküllerle birleştirildiğinde aynı anda antibakteriyel ve remineralize edici etki gösterebilmektedir (L. Cheng & ark., 2015).

Bu hibritlerin başlıca avantajları kalıcı kontakt aktivitesi, geniş spektrumlu etki, düşük katkı oranlarında mekanik özelliklerin korunması ve gerektiğinde remineralizasyon potansiyelidir. Ancak AgNP'nin yüksek konsantrasyonlarda renklenmeye yol açabilmesi, QAM içeriğinin polimerizasyon verimini etkileyebilmesi ve tükürük

proteinleriyle etkileşim sonucu inaktivasyon riski gibi sınırlılıklar dikkate alınmalıdır.

Klinik ve deneysel çalışmalar, QAM–Ag katkılı adeziv ve kompozitlerin sekonder çürük oluşumunu azaltmada, dentin-restorasyon arayüzündeki bakteri yükünü düşürmede ve biyofilm kaynaklı asit üretimini baskılamada etkili olduğunu göstermektedir (L. Cheng & ark., 2015). Bu nedenle QAM–Ag hibrit sistemleri, yüksek çürük riskli hastalarda restorasyon ömrünü uzatabilecek biyofonksiyonel restoratif materyaller arasında öne çıkmaktadır.

Biyopolimer ve Doğal Kökenli Antibakteriyel Sistemler

- **Kitosan ve Türevleri**

Kitosan, kitinin deasetilasyonu ile elde edilen doğal bir polisakarittir ve biyoyumluluğu, antibakteriyel etkinliği ve çok yönlü biyolojik özellikleri nedeniyle diş hekimliğinde önemli bir biyopolimer olarak değerlendirilmektedir (Dobrzynski & ark., 2025). Pozitif yüklü yapısı sayesinde bakteri hücre zarındaki negatif yüklerle elektrostatik etkileşime girer, membran bütünlüğünü bozar ve hücre duvarında gözenek oluşumuna yol açarak biyofilm gelişimini engeller (Dobrzynski & ark., 2025). Kitosanın antibakteriyel performansı, molekül ağırlığı (MW) ve deasetilasyon derecesi (DD) ile yakından ilişkilidir. Düşük MW’li kitosan hücre içine penetre olup DNA ve temel makromoleküler süreçleri etkileyebilirken (Sun & ark., 2017), yüksek MW ve yüksek DD değerlerine sahip kitosan, bakteri yüzeyine güçlü bağlanarak biyofilmin daha etkin şekilde parçalanmasını sağlar (Bano & ark., 2017; Sun & ark., 2017). Ayrıca kitosanın virülans faktörlerini ve quorum-sensing sinyallerini baskılayarak patojenitenin azalmasına katkıda bulunduğu gösterilmiştir (Bano & ark., 2017). Bu çoklu mekanizmalar, kitosanı hem *Streptococcus mutans* gibi kariyojenik hem de *Porphyromonas gingivalis* gibi periodontal patojenlere karşı etkili kılmaktadır (Qu & ark., 2023).

Kimyasal olarak modifiye edilmiş kitosan türevleri—özellikle kuaterner amonyum kitosanları ve nano-kitosan formları—daha yüksek çözünürlük ve genişletilmiş antibakteriyel spektrum sunar. Örneğin ZnO veya Ag nanoparçacıklarıyla kaplı kitosan kompozitlerinin, klasik kitosandan daha güçlü antibakteriyel etki gösterdiği bildirilmiştir (Javed & ark., 2020; Ma, Garrido-Maestu, & Jeong, 2017). Restoratif uygulamalarda kitosan, özellikle düşük oranlarda (<%1) kompozit rezinlere eklendiğinde kırılma tokluğu ve sertlik gibi mekanik özellikleri korurken belirgin antibakteriyel aktivite sağlar (Dobrzynski & ark., 2025). Ancak daha yüksek miktarlar, bükülme direnci ve bağlanma dayanımını olumsuz etkileyebileceğinden ideal konsantrasyonun dikkatle belirlenmesi gereklidir (Dobrzynski & ark., 2025).

Adeziv sistemlerde kitosan kullanımı, dentin kollajen matriksinin stabilizasyonu, tübül tıkanması ve nem geçişinin azaltılması yoluyla bağlanma arayüzünün dayanımını destekler (Yamakami & ark., 2022). Endodontide kitosan nanoparçacıkları, *E. faecalis* gibi dirençli patojenlerin eliminasyonunda irrigasyon solüsyonu veya intrakanal pansuman olarak umut verici bir alternatif sunmaktadır (Qadir & ark., 2025). Klinik uygulamalarda kitosan içeren gargaraların kısa temas süresinde bile yüksek antibakteriyel etkinlik sağladığı (Qu & ark., 2023) ve kitosanlı sakızların tükürükteki *S. mutans* yükünü azalttığı bildirilmiştir (Khamverdi & ark., 2021). Ayrıca kitosanın pozitif yükü, fotodinamik terapi ajanlarının biyofilm içine penetrasyonunu artırarak ışık aktivasyonu sonrasında daha güçlü ROS üretimi ve bakterisidal etkinlik sağlamaktadır (Pourhajibagher, Keshavarz Valian, & Bahador, 2022).

Kitosan ve türevleri, *S. mutans*, *S. sanguinis*, *Lactobacillus* spp., *Actinomyces*, *P. gingivalis*, *A. actinomycetemcomitans* ve *F. nucleatum* gibi geniş bir oral patojen yelpazesine karşı etkilidir (Qu & ark., 2023). Bununla birlikte kitosanın güçlü antibakteriyel

etkisinin modern çürük yönetiminde destekleyici bir rol oynadığı, hedefin tüm oral mikrobiyotayı yok etmek değil, çürük yapıcı koşulları dengelemek olduğu belirtilmektedir (Qu & ark., 2023).

• Bitkisel Ekstraktlar ve Doğal Fitokimyasallar

Propolis, curcumin, çay ağacı yağı ve neem gibi doğal fitokimyasallar; antibakteriyel, antiinflamatuvar ve biyofilm inhibitör özellikleri sayesinde restoratif ve periodontal uygulamalarda değerli biyolojik ajanlar olarak öne çıkmaktadır. Flavonoid ve fenolik bileşenlerce zengin olan propolis, *S. mutans*, *Lactobacillus*, *P. gingivalis* ve *F. nucleatum* gibi önemli ağız patojenlerine karşı güçlü etki göstermekte; özellikle glukoziltransferaz (GTF) inhibisyonu yoluyla plak matriks oluşumunu azaltmaktadır (Koo & ark., 2002). Düşük oranlarda adeziv ve kompozitlere eklendiğinde antibakteriyel kapasiteyi artırırken kolajen matriks stabilizasyonuna da katkı sunar; ancak bileşimindeki doğal değişkenlik, alerji riski ve yüksek dozlarda mekanik zayıflama gibi sınırlılıkları bulunmaktadır. Curcumin, hidrofobik polifenol yapısıyla bakteri zarını bozarak ve fotodinamik aktivasyon altında reaktif oksijen türleri (ROS) üreterek etkili bakterisidal aktivite sergiler; periodontal jeller, gargaralar ve ışıkla aktive edilen restoratif sistemlerde başarıyla uygulanmıştır (Comeau & Manso, 2023). Doğal ve güvenli bir ajan olmasına karşın düşük çözünürlüğü, ışığa duyarlılığı ve formülasyon stabilitesine ilişkin güçlükler kullanımını sınırlandırır. Çay ağacı yağı, başlıca aktif bileşeni terpinen-4-ol sayesinde *S. mutans*, *P. gingivalis* ve *Candida* türlerine karşı hızlı ve geniş spektrumlu bakterisidal etki gösterir ve gargaralar, periodontal jeller, protez temizleyiciler ve endodontik irrigasyonlarda kullanılabilir (Bordini & ark., 2018). Ancak tahriş potansiyeli, acı tadı ve uçucu yapısına bağlı stabilite sorunları klinik uygulamalarda dikkat gerektirir. Neem özleri ise azadirachtin ve nimbidin içerikleriyle çürük ve periodontal patojenleri baskılar; düşük konsantrasyonlarda bile *S. mutans* biyofilmini %70'in

üzerinde azaltabilmektedir (Chava & ark., 2012). Gargaralar, periodontal jeller ve bitkisel irrigasyon solüsyonlarında etkin olmakla birlikte tat kabulü, formülasyon farklılıkları ve alerji potansiyeli neem kullanımının başlıca sınırlılıklarıdır.

- **Antimikrobiyal Peptitler (AMP)**

Antimikrobiyal peptitler, doğal bağışıklık sisteminin temel bileşenleri olup hem endojen (LL-37, β -defensinler, histatinler) hem de sentetik formlarıyla dişhekimliğinde giderek daha fazla ilgi görmektedir. Bu peptitler çoğunlukla bakteri zarı üzerinde por oluşturarak hızlı bakterisidal etki gösterir ve tekli hedef mekanizmalara sahip antibiyotiklere kıyasla direnç gelişimine yol açma olasılıkları düşüktür (He & ark., 2025).

LL-37 gibi doğal peptitler hem *P. gingivalis* gibi periodontal patojenleri öldürmekte hem de inflamasyonu azaltarak periodontal iyileşmeyi desteklemektedir (He & ark., 2025). Histatin-5 türevleri ise hem antifungal etki gösterebilmekte hem de doku iyileşmesini hızlandırabilmektedir (Sharma & ark., 2021).

Diş hekimliğinde AMP'lerin uygulama alanları ve entegrasyonu, doğrudan mikrop öldürücü ajan olarak veya restoratif malzemelere katılarak gerçekleştirilir. Özellikle dental implant yüzeylerinin AMP ile kaplanması, peri-implant enfeksiyonların önlenmesinde ilgi çekicidir. Örneğin GL13K peptidi kimyasal yöntemlerle titanyum implantlara tutturularak kalıcı bir antibakteriyel kaplama elde edilmiştir. Bu kaplama, *P. gingivalis* gibi peri-implantitis etkeni bakterilere karşı bakterisidal ve biyofilm önleyici etki gösterirken insan hücrelerine zarar vermemiştir (Chen & ark., 2014). Yapılan çalışmada GL13K ile kaplı titanyum yüzeylerin, akışkan ortamlarda dahi *S. gordonii* ve *P. gingivalis* biyofilm oluşumunu engellediği, ayrıca 100 $\mu\text{g/mL}$ gibi nispeten düşük miktarlarda %100 oranında bakteri öldürdüğü rapor edilmiştir (Chen & ark., 2014). Bu kaplamaların insan fibroblast ve osteoblast

hücreleriyle temasında herhangi bir sitotoksosite gözlenmemesi, AMP'lerin biyoyumluluğunun altını çizmektedir (Chen & ark., 2014). Benzer şekilde, diğer bazı deneysel çalışmalar dış yüzeylerine kendiliğinden tutunan AMP molekülleri tasarlamaktadır: Hidroksiapatite yüksek afiniteyle bağlanabilen özel dizilere sahip AMP'ler, dış minesine adeta “yapışarak” oral bakterilerin tutunmasını engelleyebilmektedir (Niu & ark., 2021). Nitekim literatürde, hidroksiapatit-sever (HAp-affiniteli) on kadar sentetik peptit tanımlanmış ve bunların dış yüzeyine bağlanarak bakteri adezyonunu önlediği gösterilmiştir (Niu & ark., 2021). Bu peptitlerin bazıları aynı zamanda dış yüzeyinde kalsiyum iyonlarına bağlanarak minerallerin geri kazanımını teşvik etmekte, böylece demineralizasyona karşı koruyucu bir rol de oynayabilmektedir (Niu & ark., 2021). Örneğin, belirli bir antimikrobiyal peptidin mine yüzeyine tutunup kalsiyum-fosfat iyonlarını bağlayarak başlangıç çürük lezyonlarının yeniden sertleşmesine katkıda bulunduğu bildirilmektedir (Niu & ark., 2021).

Antimikrobiyal peptitlerin başlıca avantajları arasında geniş spektrumlu ve hızlı etki göstermeleri, direnç gelişimi riskinin düşük olması, biyoyumlu yapıları sayesinde inflamatuvar yanıtı modüle edebilmeleri ve farklı yüzeylere kolaylıkla fonksiyonelleştirilebilmeleri yer almaktadır. Bununla birlikte, bu peptitlerin ağız içi proteazlara karşı düşük stabilite göstermesi, üretim maliyetlerinin yüksek olması, yüksek konsantrasyonlarda sitotoksosite potansiyeli taşımaları ve formülasyon ile allerjenite açısından zorluklar içermeleri önemli sınırlılıklar olarak değerlendirilmektedir.

Özetle, biyopolimerler, bitkisel kökenli fitokimyasallar ve antimikrobiyel peptitler, restoratif diş hekimliğinde biyofilm kontrolü ve ikincil çürüğün önlenmesi için umut vadeden doğal ve biyomimetik yaklaşımların temelini oluşturmaktadır. Kitosan ve türevleri; çoklu etki mekanizmaları, yüksek biyoyumlulukları ve

geniş patojen spektrumuna karşı etkinlikleri sayesinde kompozitler, adezivler ve endodontik uygulamalar için güçlü bir alternatif sunmaktadır. Propolis, curcumin ve esansiyel yağ gibi doğal fitokimyasallar ise antibakteriyel, antioksidan ve antiinflamatuvar özellikleriyle restoratif materyallerin biyolojik fonksiyonlarını artırabilmektedir. Antimikrobiyel peptitler ise hızlı ve geniş spektrumlu etkileri, düşük direnç geliştirme potansiyelleri ve çeşitli yüzeylere fonksiyonelleştirilebilir olmaları nedeniyle modern antibakteriyel materyal tasarımının önemli bileşenleri hâline gelmiştir. Bununla birlikte, bu doğal ajanların proteazlara duyarlılık, formülasyon stabilitesi, doz bağımlı mekanik etkiler ve üretim maliyetleri gibi sınırlılıkları da bulunmaktadır. Gelecekte, bu biyolojik sistemlerin tek başına kullanımından ziyade, kontrollü salınım yapan, yüzeye bağlanabilen veya akıllı uyarı sistemleriyle entegre edilebilen hibrit teknolojilerle birleştirilmesi, daha güçlü, güvenli ve uzun ömürlü antibakteriyel restoratif materyallerin geliştirilmesine imkân sağlayacaktır. Bu yöndeki multidisipliner araştırmaların artması, hem çürük yönetiminde biyolojik temelli stratejilerin güçlenmesine hem de restoratif tedavilerin klinik başarısının anlamlı düzeyde iyileştirilmesine katkı sunacaktır.

Çevre Dostu (Yeşil) Sentez ve Üretim Yaklaşımları

Sürdürülebilirlik ve yeşil sentez yaklaşımı, antibakteriyel restoratif materyallerin geliştirilmesinde yalnızca biyolojik etkinliği değil, aynı zamanda kullanılan hammaddelerin kaynağı, üretim süreçlerinde enerji–solvent tüketimi, atık oluşumu ve materyalin tüm yaşam döngüsünün çevresel etkilerini birlikte değerlendirmeyi gerektirir (Yazdanian & ark., 2022). Bu bağlamda temel amaç; toksik reaktif ve organik solvent kullanımını azaltmak, su bazlı sistemlere yönelmek, karbon ayak izini düşürmek ve yenilenebilir veya geri dönüştürülebilir hammaddelerden yararlanmaktır (Yazdanian & ark., 2022).

Yeşil nanoteknoloji, metal nanoparçacıkların bitkiler, mikroorganizmalar, algler veya biyomoleküller gibi doğal indirgeme ajanları kullanılarak düşük sıcaklıkta ve çevre dostu koşullarda sentezlenmesine dayanır (Yazdanian & ark., 2022). Bu yöntem, toksik kimyasalların yerine biyolojik sistemlerin indirgeme kapasitesinden yararlanarak metal iyonlarını nanoparçacıklara dönüştürür ve biyolojik çeşitlilik sayesinde farklı morfolojilerde, biyouyumlu nanopartiküllerin elde edilmesine imkân verir. Dış hekimliğinde yeşil sentezli gümüş, titanyum dioksit ve çinko oksit nanoparçacıkları; kompozit rezinler, adezivler ve cam iyonomer materyallerde antibakteriyel amaçla kullanılmakta, S. mutans ve diğer oral patojenlere karşı etkili olup toksisite ve ekolojik yük bakımından kimyasal yöntemlerle üretilen nanoparçacıklara göre daha avantajlı bir profil sunmaktadır (Chandran & ark., 2025).

Yeşil sentez yaklaşımın bir diğer boyutu, biyo-bazlı ve BPA içermeyen monomerlerin geliştirilmesidir. Glukoz veya diğer biyokütle türevlerinden sentezlenen izosorbid esaslı dimetakrilat ve üretan dimetakrilat monomerler, Bis-GMA/TEGDMA sistemlerine alternatif olarak daha düşük monomer sızıntısı, daha yüksek hidroliz direnci ve kabul edilebilir mekanik performans sağlayarak çevresel açıdan daha sürdürülebilir seçenekler sunar (S. Li & ark., 2020). Benzer şekilde, PET gibi plastik atıkların kimyasal geri dönüşümü ile elde edilen oligoester dimetakrilatların dental rezinlerde kullanımı, hem döngüsel ekonomi yaklaşımını destekler hem de BPA içeren sistemlere bir alternatif oluşturur (Karkanis & ark., 2025).

Çevre dostu üretim anlayışı ayrıca atık biyokütleden dolgu maddesi üretimi (ör. yumurta kabuğundan hidroksiapatit), su bazlı üretim prosesleri ve düşük enerji gerektiren sentez yöntemleri gibi stratejileri içerir. Ancak yeşil sentez materyallerin gerçekten sürdürülebilir olarak değerlendirilebilmesi için in vitro antibakteriyel ve mekanik performans verilerinin yanı sıra

ekotoksosite, biyolojik bozunma ve yaşam döngüsü analizleriyle kapsamlı şekilde doğrulanmaları gerekmektedir.

Genel olarak mevcut literatür, bitki ve mikroorganizma tabanlı nano-sentez yöntemlerinin, biyo-bazlı monomerlerin ve geri dönüştürülmüş kaynaklı dolgu sistemlerinin antibakteriyel restoratif materyallerde çevresel etkiyi azaltma potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir. Ancak bu materyallerin klinik olarak yaygın kullanılabilmesi için uzun dönem biyolojik güvenlik ve çevresel etki verilerinin güçlendirilmesine ihtiyaç vardır.

Sonuç

Antibakteriyel restoratif materyaller alanında son yıllarda belirgin bir dönüşüm yaşanmaktadır. Geleneksel olarak yalnızca kaviteyi dolduran inert yapılar, yerini biyolojik çevreyle etkileşime giren, çok yönlü antibakteriyel mekanizmaları bir arada barındıran ve fonksiyonel performansı artırmayı hedefleyen gelişmiş materyal sistemlerine bırakmaktadır. Nanoteknoloji tabanlı dolgu partikülleri, kitosan ve antimikrobiyal peptitler gibi biyopolimerler ile bitkisel kökenli doğal ajanların kompozit ve adezivlere entegre edilmesi; salınabilir ajanlar, kontakt öldürme, iyon salınımı, yüzey nanomimarisi ve uyarana duyarlı akıllı sistemler gibi farklı etki yollarını bir araya getirerek ikincil çürük oluşumunu azaltmada umut verici sonuçlar sunmaktadır. Buna eşlik eden çevresel farkındalık ise yeşil nanoteknoloji, biyo-bazlı ve BPA içermeyen monomerler, geri dönüştürülmüş kaynaklardan elde edilen bileşenler ve düşük solvent/enerji gerektiren üretim yöntemlerinin önemini artırmıştır. Bu durum antibakteriyel etkinliğin yalnızca biyolojik performans açısından değil, aynı zamanda sürdürülebilir üretim ve ekolojik etkiler açısından da değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Bununla birlikte sitotoksosite, uzun dönem mekanik dayanıklılık, polimerizasyon stabilitesi, ekotoksosite ve üretimde standardizasyon gibi sorunlar henüz tam olarak çözülmemiştir. Bu

nedenle laboratuvar düzeyindeki bulguların güvenle klinik uygulamaya aktarılabilmesi için daha kapsamlı in vivo araştırmalara, uzun dönemli klinik çalışmalara ve yaşam döngüsü değerlendirmelerine ihtiyaç vardır.

Genel olarak bakıldığında, geleceğin antibakteriyel restoratif materyallerinin; nanoteknoloji, biyopolimer bilimi ve çevre dostu sentez yöntemlerini bütünleştiren, hem biyolojik uyumu hem de çevresel sürdürülebilirliği önceleyen çok disiplinli bir yaklaşımla geliştirileceği öngörülmektedir.

Kaynakça

Abozaid, D., El-Aal, M. A., Eldin, Z. E., Abdelmonem, M., Ibrahim, M. A., Saleh, A. M., et al. (2025). Antimicrobial mechanical and molecular docking analysis of dental composite resin incorporating green synthesized titanium dioxide nanoparticles from *Vitis vinifera* extract. *Sci Rep*, 15(1), 35042. doi:10.1038/s41598-025-20989-5

Abozaid, D., Elwakeel, E., Mohamed, M. A., Bahnsawy, M. A., Eldebawy, M., Elraggal, A., et al. (2025). Effects of propolis-modified glass ionomer cement on antimicrobial activity and physico-mechanical properties: a systematic review. *Odontology*. doi:10.1007/s10266-025-01209-y

Aguilar-Perez, D., Vargas-Coronado, R., Cervantes-Uc, J. M., Rodriguez-Fuentes, N., Aparicio, C., Covarrubias, C., et al. (2020). Antibacterial activity of a glass ionomer cement doped with copper nanoparticles. *Dent Mater J*, 39(3), 389-396. doi:10.4012/dmj.2019-046

Ai, M., Du, Z., Zhu, S., Geng, H., Zhang, X., Cai, Q., et al. (2017). Composite resin reinforced with silver nanoparticles-laden hydroxyapatite nanowires for dental application. *Dental materials : official publication of the Academy of Dental Materials*, 33(1), 12-22. doi:10.1016/j.dental.2016.09.038

Aida, K. L., Kreling, P. F., Caiaffa, K. S., Calixto, G. M. F., Chorilli, M., Spolidorio, D. M., et al. (2018). Antimicrobial peptide-loaded liquid crystalline precursor bioadhesive system for the prevention of dental caries. *Int J Nanomedicine*, 13, 3081-3091. doi:10.2147/IJN.S155245

Almoudi, M. M., Hussein, A. S., Abu Hassan, M. I., & Mohamad Zain, N. (2018). A systematic review on antibacterial activity of zinc against *Streptococcus mutans*. *Saudi Dent J*, 30(4), 283-291. doi:10.1016/j.sdentj.2018.06.003

Arif, W., Rana, N. F., Saleem, I., Tanweer, T., Khan, M. J., Alshareef, S. A., et al. (2022). Antibacterial Activity of Dental Composite with

Ciprofloxacin Loaded Silver Nanoparticles. *Molecules*, 27(21). doi:10.3390/molecules27217182

Balhaddad, A. A., Garcia, I. M., Mokeem, L., Alsahafi, R., Collares, F. M., & Sampaio de Melo, M. A. (2021). Metal Oxide Nanoparticles and Nanotubes: Ultrasmall Nanostructures to Engineer Antibacterial and Improved Dental Adhesives and Composites. *Bioengineering (Basel)*, 8(10). doi:10.3390/bioengineering8100146

Bang, S. J., Jun, S. K., Kim, Y. J., Ahn, J. Y., Vu, H. T., Mandakhbayar, N., et al. (2022). Characterization of Physical and Biological Properties of a Caries-Arresting Liquid Containing Copper Doped Bioglass Nanoparticles. *Pharmaceutics*, 14(6). doi:10.3390/pharmaceutics14061137

Bano, I., Ghauri, M. A., Arshad, M., Yasin, T., & Younus, M. (2017). Bioactivity of Variant Molecular Weight Chitosan Against Drug-Resistant Bacteria Isolated from Human Wounds. *Microb Drug Resist*, 23(8), 958-965. doi:10.1089/mdr.2016.0211

Bapna, M. S., Murphy, R., & Mukherjee, S. (1988). Inhibition of bacterial colonization by antimicrobial agents incorporated into dental resins. *Journal of oral rehabilitation*, 15(5), 405-411. doi:10.1111/j.1365-2842.1988.tb00176.x

Barot, T., Rawtani, D., & Kulkarni, P. (2020). Development of Chlorhexidine Loaded Halloysite Nanotube Based Experimental Resin Composite with Enhanced Physico-Mechanical and Biological Properties for Dental Applications. *Journal of Composites Science*, 4(2), 81.

Barot, T., Rawtani, D., Kulkarni, P., Hussain, C. M., & Akkireddy, S. (2020). Physicochemical and biological assessment of flowable resin composites incorporated with farnesol loaded halloysite nanotubes for dental applications. *J Mech Behav Biomed Mater*, 104, 103675. doi:10.1016/j.jmbbm.2020.103675

Benelli, E. M., Serra, M. C., Rodrigues, A. L., Jr., & Cury, J. A. (1993). In situ anticariogenic potential of glass ionomer cement. *Caries Res*, 27(4), 280-284. doi:10.1159/000261551

Boaro, L. C. C., Campos, L. M., Varca, G. H. C., Dos Santos, T. M. R., Marques, P. A., Sugii, M. M., et al. (2019). Antibacterial resin-based composite containing chlorhexidine for dental applications. *Dental materials : official publication of the Academy of Dental Materials*, 35(6), 909-918. doi:10.1016/j.dental.2019.03.004

Bordini, E. A. F., Tonon, C. C., Francisconi, R. S., Magalhaes, F. A. C., Huacho, P. M. M., Bedran, T. L., et al. (2018). Antimicrobial effects of terpinen-4-ol against oral pathogens and its capacity for the modulation of gene expression. *Biofouling*, 34(7), 815-825. doi:10.1080/08927014.2018.1504926

Busscher, H. J., Rinastiti, M., Siswomihardjo, W., & van der Mei, H. C. (2010). Biofilm formation on dental restorative and implant materials. *J Dent Res*, 89(7), 657-665. doi:10.1177/0022034510368644

Chandran, N., Ramesh, S., Haridas, R., Reddy, P., & Kamath, A. (2025). Application of plant extract synthesised silver nanoparticles in dentistry—A narrative review. *Journal of Dental Specialities*, 13(2).

Chava, V. R., Manjunath, S. M., Rajanikanth, A. V., & Sridevi, N. (2012). The efficacy of neem extract on four microorganisms responsible for causing dental caries viz *Streptococcus mutans*, *Streptococcus salivarius*, *Streptococcus mitis* and *Streptococcus sanguis*: an in vitro study. *J Contemp Dent Pract*, 13(6), 769-772. doi:10.5005/jp-journals-10024-1227

Chen, X., Hirt, H., Li, Y., Gorr, S. U., & Aparicio, C. (2014). Antimicrobial GL13K peptide coatings killed and ruptured the wall of *Streptococcus gordonii* and prevented formation and growth of biofilms. *PLoS One*, 9(11), e111579. doi:10.1371/journal.pone.0111579

Cheng, G., Li, G., Xue, H., Chen, S., Bryers, J. D., & Jiang, S. (2009). Zwitterionic carboxybetaine polymer surfaces and their resistance to long-term biofilm formation. *Biomaterials*, 30(28), 5234-5240. doi:10.1016/j.biomaterials.2009.05.058

Cheng, L., Zhang, K., Weir, M. D., Melo, M. A., Zhou, X., & Xu, H. H. (2015). Nanotechnology strategies for antibacterial and remineralizing composites and adhesives to tackle dental caries. *Nanomedicine (Lond)*, 10(4), 627-641. doi:10.2217/nnm.14.191

Cheng, L., Zhang, K., Zhang, N., Melo, M. A. S., Weir, M. D., Zhou, X. D., et al. (2017). Developing a New Generation of Antimicrobial and Bioactive Dental Resins. *J Dent Res*, 96(8), 855-863. doi:10.1177/0022034517709739

Cherchali, F. Z., Mouzali, M., Tommasino, J. B., Decoret, D., Attik, N., Aboulleil, H., et al. (2017). Effectiveness of the DHMAI monomer in the development of an antibacterial dental composite. *Dental materials : official publication of the Academy of Dental Materials*, 33(12), 1381-1391. doi:10.1016/j.dental.2017.09.004

Cloutier, M., Mantovani, D., & Rosei, F. (2015). Antibacterial Coatings: Challenges, Perspectives, and Opportunities. *Trends Biotechnol*, 33(11), 637-652. doi:10.1016/j.tibtech.2015.09.002

Comeau, P., & Manso, A. (2023). A Systematic Evaluation of Curcumin Concentrations and Blue Light Parameters towards Antimicrobial Photodynamic Therapy against Cariogenic Microorganisms. *Pharmaceutics*, 15(12). doi:10.3390/pharmaceutics15122707

Deng, F., Sakai, H., Kitagawa, H., Kohno, T., Thongthai, P., Liu, Y., et al. (2022). Fabrication of pH-Responsive Zn(2+)-Releasing Glass Particles for Smart Antibacterial Restoratives. *Molecules*, 27(21). doi:10.3390/molecules27217202

Dobrzynski, W., Piszko, P. J., Kiryk, J., Kiryk, S., Michalak, M., Kotela, A., et al. (2025). Dental Resin Composites Modified with Chitosan: A Systematic Review. *Mar Drugs*, 23(5). doi:10.3390/md23050199

Ebenezer, P., Kumara, S., Senevirathne, S., Bray, L. J., Wangchuk, P., Mathew, A., et al. (2025). Advancements in Antimicrobial Surface Coatings Using Metal/Metaloxide Nanoparticles,

Antibiotics, and Phytochemicals. *Nanomaterials* (Basel, Switzerland), 15(13). doi:10.3390/nano15131023

Elliott, D. T., Wiggins, R. J., & Dua, R. (2021). Bioinspired antibacterial surface for orthopedic and dental implants. *J Biomed Mater Res B Appl Biomater*, 109(7), 973-981. doi:10.1002/jbm.b.34762

Esteves, G. M., Esteves, J., Resende, M., Mendes, L., & Azevedo, A. S. (2022). Antimicrobial and Antibiofilm Coating of Dental Implants-Past and New Perspectives. *Antibiotics* (Basel, Switzerland), 11(2). doi:10.3390/antibiotics11020235

Fanfoni, L., Marsich, E., Turco, G., Breschi, L., & Cadenaro, M. (2021). Development of di-methacrylate quaternary ammonium monomers with antibacterial activity. *Acta biomaterialia*, 129, 138-147. doi:10.1016/j.actbio.2021.05.012

Fang, Y., Chen, X., Chu, C. H., Yu, O. Y., He, J., & Li, M. (2024). Roles of *Streptococcus mutans* in human health: beyond dental caries. *Front Microbiol*, 15, 1503657. doi:10.3389/fmicb.2024.1503657

Fugolin, A. P. P., Huynh, B., & Rajasekaran, S. P. (2023). Innovations in the Design and Application of Stimuli-Responsive Restorative Dental Polymers. *Polymers*, 15(16). doi:10.3390/polym15163346

Ganesh, V. A., Baji, A., & Ramakrishna, S. (2014). Smart functional polymers—a new route towards creating a sustainable environment. *Rsc Advances*, 4(95), 53352-53364.

Gordan, V. V., Riley, J. L., 3rd, Rindal, D. B., Qvist, V., Fellows, J. L., Dilbone, D. A., et al. (2015). Repair or replacement of restorations: A prospective cohort study by dentists in The National Dental Practice-Based Research Network. *Journal of the American Dental Association* (1939), 146(12), 895-903. doi:10.1016/j.adaj.2015.05.017

He, Y., Zhou, Y., Liu, N., Zhang, W., Chen, X., Qiu, G., et al. (2025). Cathelicidin LL-37 in periodontitis: current research advances and

future prospects - A review. *International immunopharmacology*, 150, 114277. doi:10.1016/j.intimp.2025.114277

Hoseinzadeh, E., Makhdoumi, P., Taha, P., Hossini, H., Stelling, J., Kamal, M. A., et al. (2017). A Review on Nano-Antimicrobials: Metal Nanoparticles, Methods and Mechanisms. *Curr Drug Metab*, 18(2), 120-128. doi:10.2174/1389200217666161201111146

Imazato, S. (2003). Antibacterial properties of resin composites and dentin bonding systems. *Dental materials : official publication of the Academy of Dental Materials*, 19(6), 449-457. doi:10.1016/s0109-5641(02)00102-1

Ingle, A. P., Duran, N., & Rai, M. (2014). Bioactivity, mechanism of action, and cytotoxicity of copper-based nanoparticles: a review. *Appl Microbiol Biotechnol*, 98(3), 1001-1009. doi:10.1007/s00253-013-5422-8

Javed, R., Rais, F., Fatima, H., Haq, I. U., Kaleem, M., Naz, S. S., et al. (2020). Chitosan encapsulated ZnO nanocomposites: Fabrication, characterization, and functionalization of bio-dental approaches. *Mater Sci Eng C Mater Biol Appl*, 116, 111184. doi:10.1016/j.msec.2020.111184

Jedrychowski, J. R., Caputo, A. A., & Kerper, S. (1983). Antibacterial and mechanical properties of restorative materials combined with chlorhexidines. *Journal of oral rehabilitation*, 10(5), 373-381. doi:10.1111/j.1365-2842.1983.tb00133.x

Jiao, Y., Tay, F. R., Niu, L. N., & Chen, J. H. (2019). Advancing antimicrobial strategies for managing oral biofilm infections. *International journal of oral science*, 11(3), 28. doi:10.1038/s41368-019-0062-1

Kachoei, M., Divband, B., Rahbar, M., Esmailzadeh, M., Ghanizadeh, M., & Alam, M. (2021). A Novel Developed Bioactive Composite Resin Containing Silver/Zinc Oxide (Ag/ZnO) Nanoparticles as an Antimicrobial Material against *Streptococcus mutans*, *Lactobacillus*, and *Candida albicans*. *Evidence-based*

complementary and alternative medicine : eCAM, 2021, 4743411.
doi:10.1155/2021/4743411

Karkanis, S., Nikolaidis, A. K., Koulaouzidou, E. A., & Achilias, D. S. (2025). Physicochemical and Mechanical Performance of Dental Resins Formulated from Dimethacrylated Oligoesters Derived from PET Recycling via Glycolysis. *Polymers*, 17(19). doi:10.3390/polym17192660

Khamverdi, Z., Farhadian, F., Khazaei, S., & Adabi, M. (2021). Efficacy of chitosan-based chewing gum on reducing salivary *S. mutans* counts and salivary pH: a randomised clinical trial. *Acta Odontol Scand*, 79(4), 268-274. doi:10.1080/00016357.2020.1836392

Khan, A. S., Ur Rehman, S., AlMaimouni, Y. K., Ahmad, S., Khan, M., & Ashiq, M. (2020). Bibliometric Analysis of Literature Published on Antibacterial Dental Adhesive from 1996-2020. *Polymers*, 12(12). doi:10.3390/polym12122848

Kim, D., Lee, M. J., Kim, J. Y., Lee, D., Kwon, J. S., & Choi, S. H. (2019). Incorporation of zwitterionic materials into light-curable fluoride varnish for biofilm inhibition and caries prevention. *Sci Rep*, 9(1), 19550. doi:10.1038/s41598-019-56131-5

Kocak, G., Tuncer, C., & Bütün, V. (2017). pH-Responsive polymers. *Polymer Chemistry*, 8(1), 144-176.

Koo, H., Rosalen, P. L., Cury, J. A., Park, Y. K., & Bowen, W. H. (2002). Effects of compounds found in propolis on *Streptococcus mutans* growth and on glucosyltransferase activity. *Antimicrobial agents and chemotherapy*, 46(5), 1302-1309. doi:10.1128/aac.46.5.1302-1309.2002

Kopperud, S. E., Staxrud, F., Espelid, I., & Tveit, A. B. (2016). The Post-Amalgam Era: Norwegian Dentists' Experiences with Composite Resins and Repair of Defective Amalgam Restorations. *International journal of environmental research and public health*, 13(4), 441. doi:10.3390/ijerph13040441

Li, H., Huang, Y., Zhou, X., Zhu, C., Han, Q., Wang, H., et al. (2021). Intelligent pH-responsive dental sealants to prevent long-term microleakage. *Dental materials : official publication of the Academy of Dental Materials*, 37(10), 1529-1541. doi:10.1016/j.dental.2021.08.002

Li, S., Yu, X., Liu, F., Deng, F., & He, J. (2020). Synthesis of antibacterial dimethacrylate derived from niacin and its application in preparing antibacterial dental resin system. *J Mech Behav Biomed Mater*, 102, 103521. doi:10.1016/j.jmbbm.2019.103521

Li, Y., Carrera, C., Chen, R., Li, J., Lenton, P., Rudney, J. D., et al. (2014). Degradation in the dentin-composite interface subjected to multi-species biofilm challenges. *Acta biomaterialia*, 10(1), 375-383. doi:10.1016/j.actbio.2013.08.034

Ma, Z., Garrido-Maestu, A., & Jeong, K. C. (2017). Application, mode of action, and in vivo activity of chitosan and its micro- and nanoparticles as antimicrobial agents: A review. *Carbohydr Polym*, 176, 257-265. doi:10.1016/j.carbpol.2017.08.082

Maillard, J. Y., & Hartemann, P. (2013). Silver as an antimicrobial: facts and gaps in knowledge. *Critical reviews in microbiology*, 39(4), 373-383. doi:10.3109/1040841x.2012.713323

Makvandi, P., Jamaledin, R., Jabbari, M., Nikfarjam, N., & Borzacchiello, A. (2018). Antibacterial quaternary ammonium compounds in dental materials: A systematic review. *Dental materials : official publication of the Academy of Dental Materials*, 34(6), 851-867. doi:10.1016/j.dental.2018.03.014

Manke, A., Wang, L., & Rojanasakul, Y. (2013). Mechanisms of nanoparticle-induced oxidative stress and toxicity. *Biomed Res Int*, 2013, 942916. doi:10.1155/2013/942916

Mann, E. E., Manna, D., Mettetal, M. R., May, R. M., Dannemiller, E. M., Chung, K. K., et al. (2014). Surface micropattern limits bacterial contamination. *Antimicrob Resist Infect Control*, 3, 28. doi:10.1186/2047-2994-3-28

Mazzoni, A., Tjaderhane, L., Checchi, V., Di Lenarda, R., Salo, T., Tay, F. R., et al. (2015). Role of dentin MMPs in caries progression and bond stability. *J Dent Res*, 94(2), 241-251. doi:10.1177/0022034514562833

Melo, M. A., Guedes, S. F., Xu, H. H., & Rodrigues, L. K. (2013). Nanotechnology-based restorative materials for dental caries management. *Trends Biotechnol*, 31(8), 459-467. doi:10.1016/j.tibtech.2013.05.010

Mitwalli, H., Alsaifi, R., Balhaddad, A. A., Weir, M. D., Xu, H. H. K., & Melo, M. A. S. (2020). Emerging Contact-Killing Antibacterial Strategies for Developing Anti-Biofilm Dental Polymeric Restorative Materials. *Bioengineering (Basel)*, 7(3). doi:10.3390/bioengineering7030083

Mjor, I. A., & Toffenetti, F. (2000). Secondary caries: a literature review with case reports. *Quintessence Int*, 31(3), 165-179.

Nair, D. P., Asby, S., de Lucena, F. S., & Pfeifer, C. S. (2024). An introduction to antibacterial materials in composite restorations. *JADA Found Sci*, 3. doi:10.1016/j.jfscie.2024.100038

Niu, J. Y., Yin, I. X., Wu, W. K. K., Li, Q. L., Mei, M. L., & Chu, C. H. (2021). Antimicrobial peptides for the prevention and treatment of dental caries: A concise review. *Arch Oral Biol*, 122, 105022. doi:10.1016/j.archoralbio.2020.105022

Ofridam, F., Tarhini, M., Lebaz, N., Gagnière, É., Mangin, D., & Elaissari, A. (2021). pH-sensitive polymers: Classification and some fine potential applications. *Polymers for Advanced Technologies*, 32(4), 1455-1484.

Opdam, N. J., van de Sande, F. H., Bronkhorst, E., Cenci, M. S., Bottenberg, P., Pallesen, U., et al. (2014). Longevity of posterior composite restorations: a systematic review and meta-analysis. *J Dent Res*, 93(10), 943-949. doi:10.1177/0022034514544217

Piccinno, F., Gottschalk, F., Seeger, S., & Nowack, B. (2012). Industrial production quantities and uses of ten engineered

nanomaterials in Europe and the world. *Journal of Nanoparticle Research*, 14(9), 1109. doi:10.1007/s11051-012-1109-9

Pourhajibagher, M., Keshavarz Valian, N., & Bahador, A. (2022). Theranostic nanoplateforms of emodin-chitosan with blue laser light on enhancing the anti-biofilm activity of photodynamic therapy against *Streptococcus mutans* biofilms on the enamel surface. *BMC microbiology*, 22(1), 68. doi:10.1186/s12866-022-02481-6

Qadir, B. H., Mahmood, M. K., Rasheed, T. A., Othman, K. S., Mahmood, M. A., Abdulghafor, M. A., et al. (2025). Applications of chitosan in oral health and diseases. *Front Oral Health*, 6, 1632233. doi:10.3389/froh.2025.1632233

Qu, S., Ma, X., Yu, S., & Wang, R. (2023). Chitosan as a biomaterial for the prevention and treatment of dental caries: antibacterial effect, biomimetic mineralization, and drug delivery. *Frontiers in bioengineering and biotechnology*, 11, 1234758. doi:10.3389/fbioe.2023.1234758

Ramburrun, P., Pringle, N. A., Dube, A., Adam, R. Z., D'Souza, S., & Aucamp, M. (2021). Recent Advances in the Development of Antimicrobial and Antifouling Biocompatible Materials for Dental Applications. *Materials (Basel)*, 14(12). doi:10.3390/ma14123167

Santos, M., Zare, E., McDermott, P., & Santos Junior, G. C. (2024). Multifactorial Contributors to the Longevity of Dental Restorations: An Integrated Review of Related Factors. *Dent J (Basel)*, 12(9). doi:10.3390/dj12090291

Selwitz, R. H., Ismail, A. I., & Pitts, N. B. (2007). Dental caries. *Lancet (London, England)*, 369(9555), 51-59. doi:10.1016/s0140-6736(07)60031-2

Seo, J. H., Kim, K. M., & Kwon, J. S. (2023). Antibacterial and Physicochemical Properties of Orthodontic Resin Cement Containing ZnO-Loaded Halloysite Nanotubes. *Polymers*, 15(9). doi:10.3390/polym15092045

Sharma, P., Chaudhary, M., Khanna, G., Rishi, P., & Kaur, I. P. (2021). Envisaging Antifungal Potential of Histatin 5: A

Physiological Salivary Peptide. *J Fungi (Basel)*, 7(12). doi:10.3390/jof7121070

Shi, J., Sun, X., Lin, Y., Zou, X., Li, Z., Liao, Y., et al. (2014). Endothelial cell injury and dysfunction induced by silver nanoparticles through oxidative stress via IKK/NF- κ B pathways. *Biomaterials*, 35(24), 6657-6666. doi:10.1016/j.biomaterials.2014.04.093

Stewart, C. A., Hong, J. H., Hatton, B. D., & Finer, Y. (2018). Responsive antimicrobial dental adhesive based on drug-silica co-assembled particles. *Acta biomaterialia*, 76, 283-294.

Su, M., Yao, S., Gu, L., Huang, Z., & Mai, S. (2018). Antibacterial effect and bond strength of a modified dental adhesive containing the peptide nisin. *Peptides*, 99, 189-194. doi:10.1016/j.peptides.2017.10.003

Sun, Z., Shi, C., Wang, X., Fang, Q., & Huang, J. (2017). Synthesis, characterization, and antimicrobial activities of sulfonated chitosan. *Carbohydr Polym*, 155, 321-328. doi:10.1016/j.carbpol.2016.08.069

Svanberg, M., Mjör, I. A., & Orstavik, D. (1990). Mutans streptococci in plaque from margins of amalgam, composite, and glass-ionomer restorations. *J Dent Res*, 69(3), 861-864. doi:10.1177/00220345900690030601

Takahashi, N., & Nyvad, B. (2011). The role of bacteria in the caries process: ecological perspectives. *J Dent Res*, 90(3), 294-303. doi:10.1177/0022034510379602

Tanagawa, M., Yoshida, K., Matsumoto, S., Yamada, T., & Atsuta, M. (1999). Inhibitory effect of antibacterial resin composite against *Streptococcus mutans*. *Caries Res*, 33(5), 366-371. doi:10.1159/000016535

ten Cate, J. M., & Featherstone, J. D. (1991). Mechanistic aspects of the interactions between fluoride and dental enamel. *Critical reviews in oral biology and medicine : an official publication of the American Association of Oral Biologists*, 2(3), 283-296. doi:10.1177/10454411910020030101

Teng, X., Cao, Y., Mao, J., & Luo, X. (2025). Dual-Mode Antibacterial Orthodontic Composite: Contact-Killing QACs and Sustained CHX Release via Large-Pore Mesoporous Silica Nanoparticles. *Int J Mol Sci*, 26(13). doi:10.3390/ijms26136172

Thevenot, J., Oliveira, H., Sandre, O., & Lecommandoux, S. (2013). Magnetic responsive polymer composite materials. *Chem Soc Rev*, 42(17), 7099-7116. doi:10.1039/c3cs60058k

Wang, K., Wang, S., Yin, J., Yang, Q., Yu, Y., & Chen, L. (2023). Long-term application of silver nanoparticles in dental restoration materials: potential toxic injury to the CNS. *J Mater Sci Mater Med*, 34(11), 52. doi:10.1007/s10856-023-06753-z

Xie, D., Brantley, W. A., Culbertson, B. M., & Wang, G. (2000). Mechanical properties and microstructures of glass-ionomer cements. *Dental materials : official publication of the Academy of Dental Materials*, 16(2), 129-138. doi:10.1016/s0109-5641(99)00093-7

Xu, V. W., Nizami, M. Z. I., Yin, I. X., Niu, J. Y., Yu, O. Y., & Chu, C. H. (2023). Copper Materials for Caries Management: A Scoping Review. *J Funct Biomater*, 15(1). doi:10.3390/jfb15010010

Xu, W., Lin, Z., Cortez-Jugo, C., Qiao, G. G., & Caruso, F. (2025). Antimicrobial Phenolic Materials: From Assembly to Function. *Angew Chem Int Ed Engl*, 64(13), e202423654. doi:10.1002/anie.202423654

Yamakami, S. A., Faraoni, J. J., Lia, N., Regula, F. B., Ohyama, H., & Palma-Dibb, R. G. (2022). Effect of an experimental chitosan/casein gel on demineralized enamel under a cariogenic challenge. *Dent Med Probl*, 59(4), 531-538. doi:10.17219/dmp/146038

Yang, S., Lyu, X., Zhang, J., Shui, Y., Yang, R., & Xu, X. (2022). The Application of Small Molecules to the Control of Typical Species Associated With Oral Infectious Diseases. *Front Cell Infect Microbiol*, 12, 816386. doi:10.3389/fcimb.2022.816386

Yang, Y., Xu, Z., Guo, Y., Zhang, H., Qiu, Y., Li, J., et al. (2021). Novel core-shell CHX/ACP nanoparticles effectively improve the mechanical, antibacterial and remineralized properties of the dental resin composite. *Dental materials : official publication of the Academy of Dental Materials*, 37(4), 636-647. doi:10.1016/j.dental.2021.01.007

Yazdanian, M., Rostamzadeh, P., Rahbar, M., Alam, M., Abbasi, K., Tahmasebi, E., et al. (2022). The Potential Application of Green-Synthesized Metal Nanoparticles in Dentistry: A Comprehensive Review. *Bioinorg Chem Appl*, 2022, 2311910. doi:10.1155/2022/2311910

Yin, I. X., Udduttulla, A., Xu, V. W., Chen, K. J., Zhang, M. Y., & Chu, C. H. (2025). Use of Antimicrobial Nanoparticles for the Management of Dental Diseases. *Nanomaterials (Basel, Switzerland)*, 15(3). doi:10.3390/nano15030209

Yuan, P., Tan, D., & Annabi-Bergaya, F. (2015). Properties and applications of halloysite nanotubes: recent research advances and future prospects. *Applied Clay Science*, 112, 75-93.

Zalega, M., & Bociong, K. (2024). Antibacterial Agents Used in Modifications of Dental Resin Composites: A Systematic Review. *Applied Sciences*, 14(9), 3710.

Zhang, A., Ye, N., Aregawi, W., Zhang, L., Salah, M., VanHeel, B., et al. (2021). A Review of Mechano-Biochemical Models for Testing Composite Restorations. *J Dent Res*, 100(10), 1030-1038. doi:10.1177/00220345211026918

Zhang, J. F., Wu, R., Fan, Y., Liao, S., Wang, Y., Wen, Z. T., et al. (2014). Antibacterial dental composites with chlorhexidine and mesoporous silica. *J Dent Res*, 93(12), 1283-1289. doi:10.1177/0022034514555143

Zhang, N., Zhang, K., Xie, X., Dai, Z., Zhao, Z., Imazato, S., et al. (2018). Nanostructured Polymeric Materials with Protein-Repellent and Anti-Caries Properties for Dental Applications. *Nanomaterials (Basel, Switzerland)*, 8(6). doi:10.3390/nano8060393

Zhang, S. C., & Kern, M. (2009). The role of host-derived dentinal matrix metalloproteinases in reducing dentin bonding of resin adhesives. *International journal of oral science*, 1(4), 163-176. doi:10.4248/ijos.09044

Zhu, T., Huang, Z., Shu, X., Zhang, C., Dong, Z., & Peng, Q. (2022). Functional nanomaterials and their potentials in antibacterial treatment of dental caries. *Colloids and surfaces. B, Biointerfaces*, 218, 112761. doi:10.1016/j.colsurfb.2022.112761

BÖLÜM 3

DİŞ HEKİMLİĞİNDE RENK SEÇİM YÖNTEMLERİ VE GÜNCEL YAKLAŞIMLAR

Fatma Beyza KOÇYİĞİT¹
Vahti KILIÇ²

Giriş

Dişler, gülümsemenin estetik ve çekici algılanmasında temel rol oynar. Dişlerin şekli, rengi ve uyumu, bireylerin öz saygısını artırmada, başkaları üzerinde pozitif ilk izlenim bırakmada ve sosyal durumlarda önemli bir etkindir (Van der Geld & ark., 2007). Gülümseme sergileme bölgesi, gülümsemenin estetik algısını etkileyen çeşitli bileşenleri içerir; bu bileşenler arasında dişler, diş etleri ve dudaklar yer almaktadır (Ngoc & ark., 2020). Diş rengi gülüş estetiğini etkileyen en belirgin faktördür. Restorasyonun rengi, genellikle bitişik doğal dişlerin renk özelliklerinden yararlanılarak ve üreticilerin sunduğu çeşitli renk skalaları aracılığıyla belirlenmektedir. Diş hekimliğinde renk, yalnızca estetik algıyı

¹ Arş. Gör., Erciyes Üniversitesi, Diş Hekimliği Fakültesi, Restoratif Diş Tedavisi Anabilim Dalı, Orcid: 0009-0005-9854-590X

² Doç. Dr., Erciyes Üniversitesi, Diş Hekimliği Fakültesi, Restoratif Diş Tedavisi Anabilim Dalı, Orcid: 0000-0003-4653-3729

belirleyen bir unsur değil, aynı zamanda restoratif ve protetik tedavilerde materyal seçiminden klinik başarıya kadar uzanan çok boyutlu bir parametredir. Renk değerlendirmesi; doğal dişlerin görünümünün taklit edilmesi, estetik uyumun sağlanması, diş beyazlatma tedavilerinin etkinliğinin ölçülmesi ve hasta memnuniyetinin artırılmasında kritik rol oynar. Güncel literatürde, renk kavramı sadece optik özelliklerin tanımıyla sınırlı olmayıp, ışığın diş sert dokuları, translüsent restoratif materyaller ve çevresel ışık koşulları ile olan etkileşiminin bir sonucu olarak ele alınır (Van der Burgt & ark., 1990).

Renk, estetik diş hekimliği literatüründe en sık kullanılan ancak çoğu zaman yanlış yorumlanan kavramlardan biridir. Estetik restoratif uygulamalarda başarılı bir sonuç elde edebilmek için renk olgusunun bilimsel temelleriyle birlikte doğru anlaşılması gereklidir. Ancak renk tayini diş hekimi açısından oldukça güç bir süreçtir; zira renk, hem ışığın materyallerle etkileşimini açıklayan fiziksel-optik parametreleri hem de gözlemciye bağlı öznel algısal bileşenleri içeren kompleks ve soyut bir olgudur (Alkhatib, Holt, & Bedi, 2005).

Diş hekimleri için, özellikle diş yapısının karmaşıklığı göz önüne alındığında, dişlerin doğal görünümüne tam olarak uyacak uygun diş rengini seçmek zor olabilir (Jouhar, Ahmed, & Khurshid, 2022). İlk olarak, mine, dişin sert, en dış tabakasıdır ve esas olarak hidroksiapatit kristallerinden oluşur. Mine, her biri yaklaşık 5-8 mikrometre çapında, sıkıca paketlenmiş çubuklar veya prizmalardan oluşan karmaşık, girift bir yapıdan oluşur. Bu prizmalar, iç dentinden dış yüzeye doğru uzanır ve prizmanın açısına ve yönüne göre ışığı özel bir şekilde yansıtan karmaşık bir şekilde düzenlenir (Nanci, 2024) (Koenigswald & Rose, 2005). Mine doğal olarak yarı saydamdır ve bir miktar ışığın geçmesine izin verir. Bu yarı saydamlık, dişlere karakteristik görünümlerini verir ve alttaki dentinin genel rengi etkilemesine olanak tanır. Mine esas olarak yarı saydam olsa da, aynı zamanda farklı opaklık derecelerine sahiptir ve

ışığın yansımaya ve emilimine katkıda bulunarak algılanan rengi etkiler (Joiner, 2004). Minenin doğal rengi genellikle beyazdan açık sarıya kadar değişir. Sarımsı bir renk tonuna sahip olan alttaki dentin, bu tonu önemli ölçüde etkiler. Mine rengi bireyler arasında ve hatta aynı ağızdaki farklı dişler arasında bile değişiklik gösterebilir. Bu farklılıklar genetik, yaş ve aşınma gibi faktörlerden etkilenir (Sulieman, 2005). İkinci olarak, dentin ise minenin altında yer alır ve diş yapısının büyük kısmını oluşturur. Mineden daha az serttir ancak daha dayanıklıdır ve mikroskobik tübüllerden (dentin tübülleri) oluşur. Dentin yapısı oldukça dinamiktir ve çürüme veya aşınma gibi uyaranlara yanıt olarak ikincil dentin üretebilir; bu da dişleri daha sarımsı ve daha opak hale getirir (Nanci, 2024) (Haralur, 2015).

Işık Nedir?

Renk algısı tamamen ışıkla ilişkilidir. Bir nesnenin rengi, üzerine düşen ışığın yansıması ve bu yansıyan ışığın retinadaki fotoreseptörleri uyarak görsel kortekse iletilmesi ile algılanır (Brewer, Wee, & Seghi, 2004). Elektromanyetik dalgalar evrende her yerde bulunur ve ışık, bu dalgaların sadece küçük bir bölümünü oluşturur. Işık, temel olarak fotonlardan meydana gelir ve genellikle dalga şeklinde yayılır. İnsan gözü tarafından algılanabilen ışık, görünür ışık olarak adlandırılır ve 380–780 nm dalga boyu aralığını kapsar (Ho, Syd, & Dent, 2007). Radyo dalgaları, mikrodalga, kızılötesi, morötesi, X ve gama ışınları, insan gözü tarafından algılanamayan dalgalardır ve bu nedenle ‘görünmez spektrum’ olarak adlandırılır. Görünür ve görünmez spektrumlar bir araya gelerek elektromanyetik spektrumu oluşturur (Shammas & Alla, 2011). Işık aslında saf beyaz değildir; gözle beyaz olarak algıladığımız ışık, kırmızı, turuncu, sarı, yeşil, mavi ve mor gibi gökkuşağı renklerinin birleşiminden oluşur. Isaac Newton’un 1676’da gösterdiği gibi, beyaz ışık bir cam prizma üzerinden geçtiğinde kırılarak yön değiştirir ve görünür spektrumun bileşen

renklerini ortaya çıkarır (Shammas & Alla, 2011) (Ubassy, 1993). Bir ışık dalgası cisimler tarafından yansıtılabilir, emilebilir veya iletilebilir. Işığın tamamı yansıtılırsa, cisim beyaz renkte görünür. Işık tamamen emilirse, cisim siyah görünür (Shammas & Alla, 2011).

Materyalin Optik Özellikleri ve Renk Terimleri

Bir cisme çarpan ışık ile ilgili dört temel optik olgu gözlemlenebilir: ışığın cismin içinde yayılması, cismin yüzeyinden doğrusal yansımaları, yüzeyden dağınık yansımaları ve ışığın cisim tarafından emilmesi (Jahangiri & ark., 2002).

Bir objenin rengi sadece içerdiği pigmentler ve tonlardan değil, aynı zamanda şeffaflık, yarı şeffaflık ve opaklık gibi optik özelliklerinden de etkilenmektedir. Dış minesini ve çevresindeki destek dokular ise çoğunlukla yarı şeffaf yapılar olarak değerlendirilmektedir (Craig, Peyton, & Asgar, 1975).

- **Opaklık**

Opaklık, bir materyalin ışığın geçişini engelleme derecesi olarak ifade edilir. Eğer bir yüzey üzerine gelen tüm ışık dalga boylarını soğurmadan geri yansıtırsa, bu yüzey insan gözü tarafından beyaz olarak algılanır (Craig, Peyton, & Asgar, 1975).

- **Translüsентlik**

Translüsентlik, bir materyalin ışığı kısmen geçirerek altındaki yapının doğal görünümünü yansıtabilme özelliğini ifade eder ve doğal dişler farklı derecelerde translüsентlik sergileyebilir. Bu özellik, opaklık ile transparanlık arasında bir konumda değerlendirilir. Translüsентlik değeri arttıkça materyalin derinlik ve canlılık algısı da artar. Dişte translüsентliğin artması, göze ulaşan ışık miktarını azalttığından genellikle parlaklığın düşmesine neden olmaktadır (Craig, Peyton, & Asgar, 1975).

- **Floresanslık**

Floresans, materyalin ışığı emerek daha uzun dalga boylarında yayması şeklinde tanımlanır. Doğal dişler bu özelliğe sahip olduğundan, restoratif materyaller ile diş dokusu arasındaki floresans farklılıkları renk uyumsuzluklarına yol açabilir. Floresans özellikli restorasyonlar daha parlak görünsede, klinik uygulamalarda floresansın renk seçimine etkisinin sınırlı olduğu bildirilmiştir (Craig, Peyton, & Asgar, 1975).

- **Opalesanslık**

Opalesans, ışığın farklı dalga boylarını farklı açılarda kırmasıyla materyalin yansıma ve geçirme sırasında farklı renkler göstermesidir. Mine, kırmızı ışığı geçirip maviyi saçtığından renksiz olmasına rağmen mavimsi görünür. Bu özellik dişe optik derinlik ve canlılık kazandırır (Seghi & Johnston, 1992).

- **Parlaklık**

Yüzey parlaklığı, bir objeye cilalı bir görünüm kazandıran ve rengin algılanmasını etkileyen önemli bir optik özelliktir. Düz ve pürüzsüz yüzeylerde ışık, düşme açısına eş değer şekilde yansır ve yüksek parlaklık sağlanır. Buna karşın, yüzeyin pürüzlü olması ışığın dağılmasına neden olarak parlaklığın azalmasına yol açar (Stephen, 2003).

- **Metamerizm**

Metamerizm, bir cismin renginin bir ışık kaynağı altında farklı, başka bir ışık kaynağı altında ise farklı algılanması olayıdır. Benzer aydınlatma koşullarında renkleri benzer görünen fakat spektral yansımaları farklı olan iki renge metamer denir. Bu durum, laboratuvar ve klinik ortamlar arasındaki ışık farklılıklarından da kaynaklanabilir. Metamerizm sorunu, renk seçim ve doğrulamasının doğal gün ışığı veya floresan gibi çeşitli ışık kaynakları altında gerçekleştirilmesiyle azaltılabilir (A. G. Wee, 2006).

Renk Nedir?

Işık, 360–760 nm dalga boyu aralığında insan gözü tarafından algılanabilen elektromanyetik enerjidir. Kısa dalga boyları mavi, uzun dalga boyları ise kırmızı renk olarak algılanır. Nesneler, üzerlerine düşen ışığın belirli dalga boylarını absorbe eder ve geri yansıtıkları dalgalar, nesnelerin gözle algılanan rengini oluşturur. Diş renginin algılanması, ışığın diş yüzeyinden yansımaları ve bu yansımanın göz ve beyin tarafından işlenmesiyle gerçekleşen karmaşık bir süreçtir. Görünür ışık spektrumunda (360–760 nm) yer alan ışık, diş yüzeyine çarptığında kısmen absorbe edilir, kısmen saçılır ve geri yansır. Mine, yarı saydam yapısı sayesinde ışığın bir kısmını dentine iletirken; dentin, ışığın büyük kısmını absorbe eder ve geri yansıtarak dişin temel rengini oluşturur (Joiner, 2004) (Paravina & ark., 2015). Diş hekimliğinde Munsell Renk Sistemi ve CIE Renk Sistemi olmak üzere iki renk sistemi kullanılmaktadır (A. G. Wee, 2006).

Munsell Renk Sistemi

Albert Henry Munsell tarafından 1942 yılında tanımlanan Munsell Renk Sistemi diş renginin belirlenmesinde en sık kullanılan ve uygun sistemlerden biri olarak kabul edilmektedir. Bu sistemde renk, üç temel parametre üzerinden değerlendirilir: Hue (h^*), Chroma (c^*) ve Value. Hue, rengin kendisini ifade eder ve doğal dişler genellikle sarı ile sarı/kırmızı tonları arasında yer alır. Chroma, rengin doygunluğu ve yoğunluğu ile ilgilidir. Value ise rengin parlaklığı veya açıklık-koyuluk oranı olarak tanımlanır. Literatürde, Value parametresi, diş renginin belirlenmesinde en kritik faktörlerden biri olarak vurgulanmıştır (Kuehni, 2002).

Renk, diş hekimliği literatüründe, doğal diş yapılarının ve kullanılan restoratif materyallerin optik özelliklerini tanımlayan, ışığın nesne ile etkileşimi sonucu gözlemci tarafından algılanan

görsel bir fenomendir. Renk üç temel bileşen üzerinden değerlendirilir:

- **Renk Tonu (Hue)**

Hue değeri, kırmızı, mavi, yeşil gibi temel renklerin tanımlanmasında ışığın dalga boyuna bağlı olarak belirlenir ve böylece ana renkler diğer renklerden ayırt edilir. Munsell renk sisteminde beş ana renk (kırmızı, sarı, yeşil, mavi ve mor) ve bu ana renklerin birleşiminden oluşan beş ara renk (sarı-kırmızı, yeşil-sarı, mavi-yeşil, mor-mavi ve kırmızı-mor) bulunmaktadır (Paravina & Powers, 2004) (Glockner, 2015) (Chu & ark., 2017).

- **Parlaklık (Value)**

Parlaklık (value), bir rengin aydınlık derecesini ifade eden ve cisimden yansıyan ışık miktarı ile ilişkili bir parametredir. 0–10 arası değerler içeren value skalasında, saf siyah 0 ile, saf beyaz ise 10 ile tanımlanır ve arada yer alan kademeli gri tonlar, siyah ve beyaz arasında geçişi temsil eder (Hammad & Stein, 1991).

- **Yoğunluk (Chroma)**

Chroma, bir rengin gücünü, yoğunluğunu ve doygunluğunu ifade ederek, kuvvetli ve zayıf tonları birbirinden ayırt etmemizi sağlar. Chroma ile parlaklık (value) arasında ters orantılı bir ilişki vardır; renk yoğunluğu arttıkça parlaklık azalır (Horn, Bulan-Brady, & Hicks, 1998).

CIELAB Renk Sistemi

1976 yılında CIE (Commission Internationale de l'Eclairage) $L^*a^*b^*$ renk sistemi, başlangıçta ışık kaynağına bağlı olmayan tekstil, boya ve plastik gibi materyallerin renk analizlerinde geliştirilmiştir. Günümüzde bu sistem, estetik dış hekimliğinde de yaygın olarak kullanılmaktadır. CIE $L^*a^*b^*$ sistemi, üç boyutlu bir renk alanı üzerinden çalışır ve üç eksenle oluşur: L^* (dikey eksen),

a^* (yatay eksen) ve b^* (yatay eksen). L^* parametresi, Munsell sistemindeki Value ile eşdeğer olup, rengin açıklık veya koyuluk derecesini ifade eder ve 0 (siyah) ile 100 (beyaz) arasında değişir. a^* parametresi, rengin kırmızı-mor (+a) veya mavi-yeşil (-a) yönünde konumunu, b^* parametresi ise sarı (+b) veya mor-mavi (-b) yönünü belirtir (K. McLaren, 1976) a^* ve b^* koordinatları, doğal renkler için sıfıra yaklaşır ve daha doygun veya yoğun renkler için değerleri artar (A. G. Wee, 2006) .

CIELAB Renk Sistemi, rengin tonundan bağımsız olarak, iki rengin yoğunlukları arasındaki mesafeyi, algısal şiddete göre daha eşdeğer bir renk skalasına dönüştürmeyi önerir. Bu sistem, renklerin algıdaki farklarını daha doğru bir şekilde ölçmeyi amaçlar (Paravina & Powers, 2004) Günümüzde diş hekimliğinde yapılan renk analizlerinde, renklerin nicel olarak ifade edilmesi ve renk farklarının değerlendirilmesi genellikle CIELAB renk uzayı üzerinden yapılmaktadır. Bu sistemde renk farklılıkları, ΔE_{ab}^* değeri Şekil 1 de gösterilen formül kullanılarak sayısal olarak tanımlanır ve karşılaştırılır (Commission Internationale de l'Éclairage (CIE)).

Şekil 1. CIE 1976 Lab renk farkı formülü

$$\Delta E_{ab}^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}$$

CIELAB sisteminde renk farkı, algısal farklılığı temsil eden ΔE^* değeri ile ifade edilir. Buradaki “ Δ ” sembolü farkı, “E” harfi ise Almanca *Empfindung* (algı veya duyum) kelimesinin ilk harfini temsil eder. ΔL^* , Δa^* ve Δb^* değerleri, iki örnek arasındaki L^* , a^* ve b^* renk parametreleri farklarını göstermektedir. Klinik uygulamalarda diş ve restorasyon arasındaki renk uyumu, bu ΔE^* değerleri temel alınarak değerlendirilmektedir (O'Brien, 2002). Zamanla CIELAB sistemindeki bazı sınırlamaları gidermek amacıyla CIEDE2000 adı verilen daha gelişmiş bir renk farkı

formülü (Şekil 2) geliştirilmiştir. Bu formül, insan gözünün renk algısındaki doğrusal olmayan farklılıkları daha hassas biçimde yansıttığı için, son yıllarda diş rengi araştırmalarında giderek artan oranda tercih edilmektedir (A. G. Wee, 2006) (Sharma G, Wu W & Dalal EN, 2005).

Şekil 2. CIEDE2000 renk farkı formülü

$$\Delta E_{00} = \sqrt{\left(\frac{\Delta L'}{k_L S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C'}{k_C S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H'}{k_H S_H}\right)^2 + R_T \left(\frac{\Delta C'}{k_C S_C}\right) \left(\frac{\Delta H'}{k_H S_H}\right)}$$

CIEDE2000 formülünde, iki renk arasındaki farklar üç ana bileşen üzerinden değerlendirilir: $\Delta L'$ parlaklık farklılığını, $\Delta C'$ kromadaki (renk doygunluğu) değişimi ve $\Delta H'$ ise ton farklılığını ifade eder. Ayrıca formülde yer alan R_T terimi, özellikle renk uzayının mavi bölgesinde ortaya çıkan kromatik sapmaları dengelemek amacıyla eklenen bir rotasyon fonksiyonudur (Sharma G, Wu W & Dalal EN, 2005). Bu fonksiyon, formülün genel renk farkı tahmin doğruluğunu artırarak insan renk algısına daha yakın sonuçlar elde edilmesini sağlar (del Mar Pérez & ark., 2007). Renk farkı ölçümü, restorasyon ile doğal dişin uyumunu objektif olarak değerlendirmek, renk seçimini optimize etmek ve uzun dönem estetik sonuçları sağlamak için önemlidir (Berns, 2000).

Diş Hekimliğinde Renk Seçiminin Önemi

Modern diş hekimliğinde restoratif materyallerden yalnızca doğal diş renginin taklit edilmesi değil, aynı zamanda renk dağılımı, yarı saydamlık ve opaklık özelliklerinin de benzer şekilde yansıtılması beklenmektedir. Doğal dişin optik yapısının anlaşılmaması ve seramik materyallerin fiziksel-teknik özelliklerinin dikkate alınmaması durumunda, estetik açıdan sınırlı sonuçlar elde edilebilir. Klinik uygulamalarda estetik yetersizliklerin en sık nedeni, uygun olmayan renk seçimi ve diş hekimi ile teknisyen

arasındaki iletişim eksikliğidir. İdeal koşullarda renk seçiminden restorasyonun hazırlanmasına kadar sürecin tek bir kişi tarafından yönetilmesi en doğru sonucu sağlayacaktır; ancak bu her zaman mümkün olamamaktadır. Bu nedenle, diş renginin belirlenmesinden restorasyonun üretimine kadar her aşamayı kapsayan sistematik bir yaklaşımın benimsenmesi gereklidir. Ayrıca hem klinisyenin hem de laboratuvar teknisyeninin temel renk teorisine ve dental materyal bilimine hâkim olması, iletişim sorunlarını en aza indirerek estetik restorasyonların başarısını artırmaktadır (Goldstep & Freedman, 2012) (Hegenbarth & Koehler, 1989).

Renk eşleştirme olgusu yalnızca diş hekimliğinin değil, aynı zamanda fizik, psikoloji, psikofizik ve hatta felsefenin de konusuna giren çok disiplinli bir alandır. Renk algısının anlaşılabilmesi için ışığın özellikleri, renk görme teorileri, spektrofotometrik çalışmalar, renk düzeni sistemleri ve renk boyutları gibi temel kavramların bilinmesi gereklidir. Dental uygulamalarda renk uyumu, yalnızca bir renk skalasından ton seçmekten ibaret değildir; restorasyonun komşu doğal dişlerle estetik açıdan bütünleşmesini sağlayacak düzeyde doğru renk seçim becerisinin geliştirilmesi gerekir. Bu nedenle kullanılan materyallerin ve renk kılavuzlarının avantajlarının yanı sıra sınırlılıklarının da farkında olunmalıdır. Başarılı bir estetik restorasyon için diş hekiminin yalnızca renk teorisinin bilimsel yönlerine değil, aynı zamanda renk eşleştirmenin sanatsal boyutuna da hâkim olması büyük önem taşımaktadır (Goldstein & ark., 2018) (Shillingburg & ark., 1997).

Diş Rengi Seçimini Etkileyen Faktörler

Hekimin, hasta ağzında uygulanacak restorasyon için renk seçimi yaparken dikkate alması gereken çeşitli kriterler bulunmaktadır. Bu faktörler arasında; hastanın yaşı, cilt tonu, gingival dokunun rengi, dişlerin morfolojik özelliklerindeki farklılıklar, sosyoekonomik ve kültürel arka plan, ortam koşulları,

hekimin bireysel algısı, ışık kaynağının özellikleri ile kullanılan renk skalaları veya referans materyaller yer almaktadır (Bhat & ark., 2011).

- **Hastanın Yaşı**

Literatürde, doğal diş renginin yaşla birlikte genellikle daha koyu tonlara dönüştüğü ve sarı renk bileşenlerinin belirginleştiği bildirilmektedir. Yaşlanma ile, diş renginin koyuluk oranında artış ve translüsentlik oranında azalış arasında doğru orantı olduğu ortaya konmuştur (Solheim, 1988).

Hasegawa ve arkadaşlarının yaptığı bir çalışmada, bireylerde yaş ilerledikçe dişlerin servikal bölgesinde açıklık (value) değerinin azaldığı ve genel olarak sarı tonların arttığı belirlenmiştir (Hasegawa, Ikeda, & Kawaguchi, 2000). Ayrıca, yaşı ilerlemesiyle birlikte dişlerin insizal bölgelerinde kırmızı bileşenlerde artış gözlenmiş, bu durumun ise uzun süreli okluzal aşınmanın insizal kenar üzerinde yarattığı etkilerle ilişkili olabileceği ifade edilmiştir (Hasegawa, Ikeda, & Kawaguchi, 2000).

Yaşlanmaya bağlı olarak doğal dişlerde gözlenen renk değişimi, birden fazla biyolojik mekanizmanın etkisiyle ortaya çıkar. Pulpa dokusu yaş ilerledikçe gerileyerek yerini sekonder dentine bırakır. Bu süreç sonucunda dentin dokusu daha yoğun, daha sert ve geçirgenliği düşük bir yapı kazanır. Ayrıca, zaman içerisinde çeşitli pigmentlerin ve inorganik iyonların mine dokusunu geçerek dentin-mine birleşim bölgesinde birikmesi ve dentin yapısına entegre olması da renk değişiminde önemli rol oynar (Morley, 1997). Bu süreç sonucunda dentinin kroma (chroma) değeri artmakta ve dişin genel renginde belirgin bir koyulaşma meydana gelmektedir.

Ayrıca, yaşla birlikte mine kalınlığının azalması, özellikle anterior bölgede dentin renginin dişin genel görünümünü daha baskın şekilde etkilemesine neden olmaktadır (Sulikowski & Yoshida, 2003).

- **Cilt Rengi**

Yapılan araştırmalar, cilt rengi ile diş rengi arasında anlamlı bir ilişki bulunduğunu göstermektedir. Örneğin, Udaipur, Rajasthan’da 240 birey üzerinde gerçekleştirilen bir çalışmada, yaş faktöründen bağımsız olarak, açık tenli bireylerin diş değerinin (value) daha düşük, yani dişlerinin daha koyu tonlarda; orta ve koyu tenli bireylerin diş değerinin ise daha yüksek, yani daha açık tonlarda olduğu belirlenmiştir (Sharma & ark., 2010).

- **Hastanın Cinsiyeti**

Cinsiyet ile diş rengi arasındaki ilişkiyi inceleyen bir çalışmada, cinsiyetin L^* , C^* ve h^* renk parametreleri üzerinde anlamlı etkiler gösterdiği saptanmıştır. Araştırma bulgularına göre, erkeklerde daha düşük L^* değerleri gözlenmiş, bu durum diş renginin daha koyu olduğunu göstermektedir. Ayrıca erkeklerde C^* değerlerinin daha yüksek olduğu, yani diş renginin daha yoğun bir görünüm sergilediği; h^* değerlerinin ise sarı/yeşilden sarı/kırmızı tonlara kaydđı belirlenmiştir (Hassel & ark., 2008).

Bazı çalışmalarda, kadınların doğal diş renginin erkeklere kıyasla istatistiksel olarak anlamlı biçimde daha yüksek parlaklık gösterdiği ve sarı ton bileşeninin daha düşük olduğu bildirilmektedir. Başka bir araştırma da benzer şekilde kadınlarda diş renginin daha açık ve daha az sarı eğilimli olduğunu rapor etmiştir (LL, 2000).

- **Dişlerin Kuruluğu**

Diş rengini değiştirebilen etkenlerden biri de kurutma işlemidir. Dehidratasyon geliştiğinde mine optik özellikleri geçici olarak farklılaşır ve diş daha açık/“beyaz” görünme eğilimi gösterir (Mayekar, 2001). Bir çalışmada n bölgedeki dişlerin rengi başlangıçta spektrofotometreyle ölçülmüş; ardından rubber dam uygulanarak yaklaşık 15 dakika dehidratasyon oluşturulmuş ve aynı cihazla ikinci ölçüm gerçekleştirilmiştir. ncesi–sonrası

karşılaştırmada L^* ile a^* değerleri anlamlı düzeyde yükselirken, b^* parametresinde anlamlı bir farklılık rapor edilmemiştir (Russell, Gulfraz, & Moss, 2000).

- **Dişlerin Yüzey Morfolojisi**

Diş yüzeyinin yapısı, ışığın yüzeyden ne kadar ve nasıl geri döneceğini belirler. Pürüzlü yüzeylerde yansıma daha çok saçılma şeklindeyken, düzgün yüzeylerde yansıma daha yönlü ve ayna benzeri olur. Klinik bir çalışmada da diş fırçalama sonrasında mine yüzeyinden yansıyan ışık miktarının istatistiksel olarak anlamlı düzeyde arttığı bildirilmiştir (Redmalm, Johannsen, & Ryden, 1985). Restorasyonlu dişin yüzeyi, komşu dişin ışığı yansıtma düzenini taklit edecek şekilde biçimlendirilmelidir. Literatürde, doğal dişlerde kırmızı ve sarı renk bileşenlerinin insizalden servikale doğru arttığı; buna karşılık translüsensliğin aynı yönde azaldığı bildirilmektedir (Hasegawa, Ikeda, & Kawaguchi, 2000).

- **Hastanın Göz ve Saç Rengi**

Hassel ve ark. , bir çalışmada bireylerin dişlerinden elde ettiği veriyi analiz ederek göz rengi ile diş rengi ölçümleri arasında anlamlı bir bağlantı olduğunu bildirmiştir. Açık göz rengine sahip grupta L^* değerinin daha yüksek bulunması, bu kişilerin dişlerinin daha açık görünme eğiliminde olduğunu göstermektedir. Saç rengi değerlendirmesinde ise siyah saçlılarla karşılaştırıldığında, kırmızı/sarı/kahverengi saçlılarda h^* açısının sarı-kırmızı doğrultusundan ayrılıp sarı-yeşil yönüne doğru kaydığı rapor edilmiştir (Hassel & ark., 2008).

- **Hekimin Yaşı**

Yaş ilerledikçe korneada fizyolojik bir koyulaşma oluşabilir. Bu durum, gelen ışığı kısmen filtreleyerek rengi algılamada farklılığa neden olabildiğinden, klinisyenin yaşı renk seçimini etkileyen etkenlerden biri olarak görülebilmektedir. Bazı araştırmalarda

hekimin yaşının renk seçimi üzerinde belirgin bir etkisi olmadığını da rapor etmektedir (Pensler, 1998).

- **Hastanın Renk Beklentisi ve Algısı**

Diş estetiğine ilişkin algı, kültürel beklentiler ve kişisel beğeniye bağlı olarak kişiden kişiye değişebilir. Bu nedenle aynı diş, bir gözlemci tarafından estetik açıdan tatmin edici bulunurken, başka bir gözlemci tarafından yetersiz görülebilir. Bir anket araştırmasında katılımcılardan kendi diş renklerini değerlendirmeleri istenmiştir. Analiz sonuçları, ağız estetiğini iyileştirmeyi hedefleyen bireylerin önemli bir kısmında en yaygın memnuniyetsizliğin diş rengiyle ilişkili olduğunu göstermiştir (Dudea & ark., 2012). Bir diğer dental estetik anketinin bulgularına göre, dişlerin görünümü kadınlar tarafından erkeklere göre daha fazla önemsenmekte; ayrıca bu önem düzeyi genç yaş grubunda istatistiksel olarak anlamlı biçimde daha yüksek seyretmektedir (Vallittu, Vallittu, & Lassila, 1996). Ayrıca, diş renginin çok beyaz olmasının estetik bulma eğiliminin yaş arttıkça zayıfladığı; genç bireylerde ise beyaz tonlara yönelimin daha belirgin olduğu rapor edilmiştir. 150 kişilik başka bir çalışmada da ileri yaş grubunun, gençlere kıyasla daha koyu diş tonlarını tercih ettiği gözlenmiş ve sonuçların önceki verilerle benzerlik gösterdiği belirtilmiştir (Grososky & ark., 2003). Wulfman ve ark.'nın anket bulguları, yaş ilerledikçe diş görünüm ve dental estetikle ilgili hassasiyetin gerilediğini; bunun yerini genel sağlıkla ilişkili endişelerin aldığını ortaya koymuştur (Wulfman & ark., 2010).

Diş Rengini Etkileyen Faktörler

Diş renklenmeleri, özellikle ön diş estetiğini iyileştirmek amacıyla tedavi talebiyle başvuran bireylerde en sık karşılaşılan estetik problemlerden biridir. Renk değişikliği veya lekelenme, bir ya da birden fazla dişin doğal renginde veya translüsensitesinde meydana gelen değişim olarak tanımlanmaktadır. Etiyolojik faktörler ve renk değişikliğinin lokalizasyonuna bağlı olarak bu

durum dışsal (ekstrinsik) veya içsel (intrinsik) kaynaklı olabilir. Dolayısıyla, uygun bir tedavi planı oluşturabilmek için renk değişikliğinin altında yatan spesifik nedenin doğru şekilde belirlenmesi büyük önem taşımaktadır.

- **İçsel Faktörler**

İçsel faktörler, diş rengini etkileyen en önemli unsurlardan biridir. Tetrasiklin kullanımı, mine ve dentini etkileyen konjenital yapısal bozukluklar ve bu dokuların ışık ile etkileşim özellikleri başlıca nedenler arasında yer almaktadır. İçsel renklemeler, mine veya dentin yapısında meydana gelen kalıcı değişikliklerden kaynaklanır ve hem gelişim sürecinde hem de sürme sonrasında görülebilir. Gelişimsel kökenli renklemelere dental florozis ve amelogenezis imperfekta, sonradan kazanılmış olanlara ise genellikle pulpa travması, pulpal nekroz veya endodontik tedavi materyalleri örnek verilmektedir. İçsel faktörlere bağlı renklenme gösteren dişler, renk ölçümünde kullanılacaksa, bu durumun düzeltilmesi için çeşitli diş beyazlatma ajanları ve farklı tedavi protokolleri uygulanabilmektedir (Yamamoto, 1992) (Lise & ark., 2018).

- **Dışsal Faktörler**

Diş renginde değişikliğe yol açan dışsal faktörler arasında; sigara kullanımı, çay ve kırmızı şarap tüketimi, klorheksidin içeren ajanların uzun süreli kullanımı ve demir ilaçlarının birikimi sayılabilir. Bu maddeler, özellikle mine yüzeyinde ve pelikıl tabakasında tutunarak dişlerde yzeyssel renklemelere neden olmaktadır (Vichi, Ferrari, & Davidson, 2000). Dış kaynaklı renklemesi olan dişlerde, renk ölçümünden önce profilaksiyle yüzeydeki lekeler mekanik olarak giderilmeli; sonrasında ise uygun bir diş macunuyla bu sonuç sürdürülmelidir (Hall, 1991) (Winter, 1993).

Renk Ölçüm Yöntemleri

Renk seçimi büyük ölçüde subjektif bir süreçtir ve diş hekimleri arasında belirgin farklılıklar gösterebilir. Aynı klinisyen, farklı zamanlarda aynı vakayı değerlendirirken farklı renk tاینرleri yapabilir; bu durum, renk algısının kişisel ve değışken bir özellik olduğunu göstermektedir. Restoratif diş hekimliğı, bilimsel bilgi ve sanatsal beceriyi bütünleştiren multidisipliner bir alandır. Renk eşleştirme, geleneksel görsel renk eşleştirmesi veya enstürmantal (aletsel) analiz yoluyla gerçekleştirilebilir (Culpepper, 1970).

Diş Renginin Gözle Belirlenmesi (Konvansiyonel Yöntem)

Diş renginin ölçümü farklı yöntemlerle gerçekleştirilebilmektedir. Bu yöntemler arasında en sık tercih edilenlerden biri, uzun yıllardır klinik uygulamalarda yer bulan görsel renk seçimidir. Görsel yöntemlerde, hekimin subjektif değerlendirmesine yardımcı olmak amacıyla çeşitli renk kılavuzu sistemleri geliştirilmiştir. Görsel renk tespiti, hedef dışın ticari renk skalalarının sekmeleriyle karşılaştırılmasıyla gerçekleştirilir. Bununla birlikte, bu prosedür çoğunlukla yüksek öznelliği ve klinisyenin deneyimi, aydınlatma veya gözlem açısı gibi performansını etkileyebilecek birden fazla faktörün bulunması nedeniyle güvenilir değildir. Çok sayıda sınırlamasına rağmen, görsel renk eşleştirmesi klinik uygulamada hala en yaygın kullanılan yöntem olmaya devam etmektedir (Simionato, Pecho, & Della Bona, 2021) (Gómez-Polo & ark., 2014).

Bunlar arasında en yaygın kullanılanlar Vita Klasik (VC) ve daha gelişmiş bir yaklaşım sunan Vita 3D-Master (3D) renk kılavuzu sistemleridir. Ayrıca kompozit renk skalaları da konvansiyonel renk belirleme yöntemlerinden biridir. Bu sistemler, renk seçiminin standardize edilmesi ve klinik doğruluğun artırılması amacıyla diş hekimliğinde yaygın olarak tercih edilmektedir (Paravina, Powers, & Fay, 2002) (Ruiz-López & ark., 2022).

VITA Klasik Renk Skalası

1956'da geliştirilen Vita Klasik renk skalası, diş hekimliğinde uzun yıllardır kullanılan en yaygın renk rehberlerinden biridir. Bu skalada toplam 16 renk örneği bulunur ve sınıflandırma temel olarak hue değerine göre yapılmıştır. Hue grupları harflerle; A (sarı-kırmızı), B (sarı), C (gri) ve D (kırmızı-sarı-gri) olarak ayrılmıştır. Her harf grubunun içindeki renk doygunluğu ise rakamlarla ifade edilir (örneğin A1, B3, D4). Bu skalada renk seçimi yapılırken sırasıyla önce hue, ardından chroma ve son olarak value değerlendirilir (Turgut & Bağış, 2012) (Brewer, Wee, & Seghi, 2004). Meirless ve arkadaşları, Vitapan Classic renk skalası kullanılarak yapılan görsel renk tayininin, subjektif değerlendirme içermesine rağmen, özellikle açık ve koyu tonlarda tutarlı ve güvenilir sonuçlar verdiğini rapor etmişlerdir. Bu bulgu, sistematik olarak uygulandığında görsel renk belirlemenin klinik olarak değerli bir araç olabileceğini göstermektedir (Meireles & ark., 2008).

VITA 3D-Master Renk Kılavuzu

VITA 3D-Master Renk Sistemi, doğal diş renklerinin bilimsel olarak incelenmesi sonucunda geliştirilmiş modern bir renk kılavuzu sistemidir (Vita Zahnfabrik, Bad Säckingen, Almanya). Bu sistem, diş rengini daha doğru ve sistematik biçimde tanımlamayı amaçlamaktadır. 3D-Master serisi; Linearguide, Toothguide ve Bleachedguide olmak üzere üç farklı kılavuzdan oluşmaktadır.

Vitapan 3D-Master, 1998 yılında piyasaya sunulmuş olup, doğal diş renk spektrumunu yansıtacak şekilde tasarlanmış, sistematik ve eşit aralıklı bir renk skalası sunmaktadır. Bu sistemde renk belirleme süreci, öncelikle dişe en yakın value değerinin seçilmesi, ardından chroma ve son olarak hue değerinin belirlenmesi şeklinde uygulanmaktadır.

Bu sistemde renk belirleme, harf ve sayı kombinasyonlarıyla ifade edilir. İlk sayı, dişin parlaklık (value) düzeyini tanımlar ve 0

(en açık ton) ile 5 (en koyu ton) arasında değişir. Renk tonu (hue) *L*, *M* ve *R* harfleriyle sınıflandırılır: *L* (less red) daha sarımsı tonları, *M* (medium) orta tonları, *R* (reddish) ise daha kırmızımsı tonları temsil eder. Harften sonraki sayı ise renk doygunluğunu (chroma) gösterir ve 1’den 3’e kadar artan yoğunluk derecelerini ifade eder.

Bu sistemin en önemli avantajı, parlaklık temelli bir sınıflandırma sunmasıdır. Böylece klinisyen, önce value’yu, ardından hue ve chroma’yı belirleyerek daha sistematik bir renk seçimi yapabilir. 3D-Master sistemi, klasik Vita skalalarına göre doğal dişlerle daha yüksek uyum, geniş renk aralığı ve daha homojen dağılım sağlaması nedeniyle günümüzde sıklıkla tercih edilmektedir (Buchmeier, 2023). Bayındır ve arkadaşları , Vita 3D-Master renk skalası kullanılarak yapılan ölçümlerde, Vitapan Classic renk skalasına kıyasla daha düşük hata payı elde edildiğini bildirmişlerdir (Bayındır & Wee, 2006). Bu bulgu, 3D-Master sisteminin renk tayininde daha yüksek doğruluk sağladığını göstermektedir (Trakyalı, Özdemir, & Arun, 2009)

Araştırmalar, görsel renk belirleme yönteminde, Vita 3D-Master renk skalasının, Vitapan Classic skalasına kıyasla daha tutarlı ve güvenilir sonuçlar sağladığını göstermektedir (Oh, Koh, & O’Brien, 2009) (Öngül, Şermet, & Balkaya, 2012).

Analoui ve ark. yapmış oldukları çalışmada, en sık kullanılan VITA Classical ve VITA 3D MasterSystem renk skalaları ile doğal dişlerin içerdiği renk çeşitliliğini karşılaştırmışlar ve en sistematik renk skalası olan VITA 3D MasterSystem’ in, doğal diş renk dağılımının ancak %56,05’ini kapsadığını bildirmişlerdir (Analoui & ark., 2004). Diş hekimleri tarafından daha çok tercih edilen renk skalalarından VITA Classical renk skalasının ise doğal diş renk çeşitliliğinin sadece %37,45 ini kapsadığını bildirmişlerdir (Analoui & ark., 2004).

VITA Toothguide 3D-Master

VITA Toothguide 3D-Master, renk düzenini öncelikle value (parlaklık) üzerine kuracak şekilde geliştirilmiştir; çünkü gri bileşenle ilişkili bu parametrenin saptanması, çoğu durumda hue belirlemesinden daha belirleyici kabul edilir. Skala 26 adet renk anahtarından oluşur.

Vitapan Classical ile kıyaslandığında, doğal diş tonlarına daha iyi uyum sağladığı, daha geniş seçenek sunduğu ve renklerin skalada daha dengeli dağıldığı bildirilmektedir (Trakyalı, 2013) (Paravina, Johnston, & Powers, 2007) (Paravina & ark., 2007). Vita Toothguide 3D-Master sistemine yönelik eleştiriler, özellikle daha koyu tonlardaki diş renklerini yeterince doğru yansıtamamasından kaynaklanmaktadır. Bununla birlikte, sistemin üç boyutlu tasarımının bilimsel temellere dayalı yapısı sayesinde, Vita Classical renk kılavuzuna kıyasla daha yüksek bir doğruluk ve hassasiyet sunduğu kabul edilmektedir (Gómez-Polo & ark., 2024).

VITA Linear Guide 3D-Master

Dental estetikte kullanılan güncel ve sistematik bir renk skalasıdır. Konvansiyonel Vita Classical'dan farklı olarak rengi üç boyutta sınıflandırır: parlaklık (value), renk tonu (hue) ve doygunluk (chroma). Bu sistem, renk seçiminde objektiflik ve tekrarlanabilirlik sağlar. Linear Guide versiyonu adım adım seçim kolaylığı sunarak operatörler arası farklılıkları azaltır ve laboratuvar iletişimini güçlendirir. Özellikle anterior estetik restorasyonlarda uyumu artırır, ayrıca araştırmalarda ve eğitimde renk standardizasyonu amacıyla da yaygın olarak kullanılmaktadır (Corcodel & ark., 2010). Vita Linear Guide, Vita 3D-Master tonlarını tek bir hat üzerinde yan yana sıralayarak klinikte daha pratik kullanım hedefiyle geliştirilmiştir. Corcodel ve ark.'nın iki sistemi karşılaştırdığı çalışmada, renk eşleştirme tutarlılığı bakımından aralarında anlamlı bir fark saptanmamış; ancak Linear Guide'ın düzeni sayesinde kullanım

açısından klinik kolaylık sağladığı belirtilmiştir (Corcodel & ark., 2010).

VITA Bleachedguide 3D-Master

VITA 3D-Master Bleachedguide Renk Skalası, beyazlatılmış dişlerin renklerini değerlendirmek amacıyla geliştirilmiş özel bir renk kılavuzudur. Klasik Vita ve 3D-Master renk skalalarının aksine, bu sistem açık ton aralıklarında daha yüksek hassasiyet sağlar ve özellikle bleaching (diş beyazlatma) tedavileri sonrasında diş rengindeki değişimi objektif biçimde değerlendirmek için tasarlanmıştır (Buchmeier, 2023).

Kompozit Renk Skalaları

Kompozit ve porselen skalalarının renk dağılımları, doğal dişlerle karşılaştırıldığında genellikle yetersiz kalmaktadır (Paravina & ark., 2007) (Schwabacher & Goodkind, 1990). Bunun temel nedeni, birçok renk skalasının doldurucusuz metakrilat esaslı materyallerden hazırlanması ve polimerizasyon sonrasında kompozit rezinin gerçek renk, translüsens ve opasite özelliklerini birebir yansıtamamasıdır. Bu karmaşıklığı azaltmak için üreticiler, restoratif materyallerin tonlarını yaygın kullanılan Vita Lumin skalasıyla eşleştirmeye yönelmiştir. Böylece porselenlerle daha uyumlu kompozit uygulamaları yapılabilmüş, farklı skala gereksinimi azalmış ve klinisyenler arası iletişim kolaylaşmıştır (Shotwell, Johnston, & Swarts, 1986) (Swift Jr, Hammel, & Lund, 1994) (Ruyter, Nilner, & Möller, 1987).

Button Yöntemi ile Renk Seçimi

Estetik başarıyı sağlamak için dört temel parametre sırasıyla dikkate alınmalıdır: konum, kontur, doku ve renk. Doğru renk kombinasyonları yalnızca estetik algıyı artırmakla kalmaz; aynı zamanda restorasyonların doğal ve uyumlu bir görünüm kazanmasını sağlar. Özellikle anterior (ön grup) restorasyonlarda,

restorasyonun rengi komşu dişlerin tonlarıyla uyumlu olmalıdır; aksi halde estetik bütünlük ve hasta memnuniyeti olumsuz etkilenebilir (Sikri, 2010). Morfolojik, optik ve biyolojik açıdan doğal görünen bir gülüş elde etmenin temel koşullarından biri doğru renk seçimidir. Estetik restorasyonlarda tutarlı sonuçlar için ışığın özellikleri, gözün bu uyarıyı nasıl algıladığı ve beynin algıyı nasıl anlamlandırıdığı bilinmelidir.

Günümüzde restorasyonların başarısızlığında en sık karşılaşılan etkenlerden birinin hatalı renk belirleme olduğu kabul edilmektedir (E. A. McLaren, Figueira, & Goldstein, 2017) (Terry, Snow, & McLaren, 2008). Doğal dişler, farklı optik özellikler taşıyan dokulardan oluştukları için tek renkli değil, polikromatik bir görünüm sergiler. Bu dokular kron boyunca homojen dağılmadığından, mine ve dentinin bölgesel kalınlık değişimleri ile “value” farklılıkları, rengin farklı algılanmasında doğrudan rol oynar (LeSage, Milnar, & Wohlberg, 2008). Doğada gözlenen bu polikromatik yapı, tek renkli restoratif materyallerle her zaman tam olarak taklit edilememektedir. Bu nedenle günümüzde üretilen estetik kompozit setlerinde, farklı ışık geçirgenlik özelliklerine sahip çeşitli renk seçenekleri sunulmaktadır.

Literatürde restorasyonlarda yapılan renk seçimi hatalarının, çoğu zaman geri dönüşü olmayan sonuçlara yol açtığı bildirilmektedir. Bu bağlamda, klinisyenin restorasyon yapılacak dişin yanı sıra komşu dişlerin renk özelliklerini dikkatle değerlendirmesi ve en uygun rengi seçmesi büyük önem taşımaktadır. Kompozit restorasyonlarda renk seçimi için seramik restorasyonlara yönelik geliştirilen Vita skalalarının kullanılması uygun değildir. Üretici firmalar kompozit materyallerin Vita Klasik skalayla uyumlu renkleri olduğunu belirtsede, klinik uygulamalarda bu yaklaşım yanıltıcı sonuçlar doğurabilmektedir. Benzer şekilde, kolorimetre ve spektrofotometre gibi dijital ölçüm cihazları, seramik ve CAD/CAM materyaller için tasarlandığından, kompozitlerde

güvenilir ve tekrarlanabilir veriler sağlayamamaktadır. Ayrıca, kompozit setlerinde sunulan renk skalaları sabit kalınlıklarda üretilmiş olup, restorasyonun klinik koşullarda farklı kalınlıklarda uygulanması renk seçiminde hata riskini artırabilmektedir (Vanini, 1996).

Direkt anterior restorasyonlarda renk seçimi en hassas konulardan birisi olup seçim sırasında dikkat edilmesi gereken bazı noktalar vardır. Renk restoratif işlemin başında, endikasyon ve planlamayı takiben, dişler ekarte edilmeden ve dehidrate olmadan önce seçilmelidir (Pitel, 2015) (B Korkut, 2016). Dişler dehidrate olduğunda, su kaybına bağlı olarak dokuların refraktif indeksi azalır ve bu durum value değerinde artışa yol açar. Bunun sonucunda dişler daha opak bir görünüm sergiler.

Literatürde, en yüksek dehidratasyon seviyesinin izolasyon işleminden yaklaşık 30–45 dakika sonra ortaya çıktığı belirtilmektedir. Dehidratasyon sonrasında, ağız kapatılsa veya dişler yeniden ıslatılsa dahi value değerinin normal seviyelerine dönmesi ortalama 5 saati bulmaktadır. Bu süreçte dişten doğru bir renk seçimi yapmak mümkün değildir. Ayrıca, insizal kenarda bulunabilecek transparan bölgeler de bu süre zarfında değerlendirilemez. Bu nedenle, doğru sonuç elde edebilmek için renk seçiminin izolasyonu takiben ilk 3 dakika içinde yapılması önerilmektedir (Beddis & Nixon, 2012) (Mackenzie & ark., 2013).

Renk seçimi reflektör ışığı altında değil, gün ışığında (5,500K) yapılmalıdır. Restore edilecek farklı renk bölgeleri için ayrı ayrı renk belirlenmelidir Mine ve dentin tabakalaması yapılacak ise, mine ve dentin renkleri ayrı ayrı seçilmelidir (Mackenzie & ark., 2013). Kompozit rezinlerde doğru renk seçimi, geleneksel olarak metal destekli seramik restorasyonlar için yaklaşık altmış yıl önce geliştirilmiş klasik VITA renk skalaları ile yapılmamalıdır. Günümüzde spektrofotometre ve kolorimetre gibi dijital ölçüm cihazları sıklıkla kullanılmakta olup, bu yöntemler esasen seramik

restorasyonların renk tayini amacıyla geliştirilmiştir. Ancak, kompozit rezin materyallerin optik özellikleri seramiklerden farklılık gösterdiğinden, bu cihazların kompozitlerdeki güvenilirliği konusunda literatürde tartışmalar devam etmektedir (Bora Korkut, 2018) (Doğan & Yüzügüllü, 2011).

Kullanılacak kompozit rezin kitinin kendi skalasının kullanılması daha doğrudur (Doğan & Yüzügüllü, 2011). Literatürde hata oranının düşük olarak belirtilmesi ile kompozit renk seçiminde ‘Buton Yöntemi’ yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Kompozit renk seçimi için, uygun görülen tonlar restorasyon yapılacak dişin sağlam yüzeyine veya komşu/simetrik dişe küçük daireler halinde uygulanır. Farklı bölgelerde farklı renkler varsa, ilgili alanlara ayrı daire kümeleri yerleştirilir. Dentin ve body renkleri orta ya da servikal bölgelere, mine renkleri ise insizal kenara, dairenin yarısı kenarı aşacak şekilde konumlandırılır. Spatül ile yüzeyler düzeltilerek yansıma engellenir ve daireler polimerize edilir. Bu işlem, polimerizasyon sonrası olası refraktif indeks değişimini önlemek için gereklidir. (E. A. McLaren, Figueira, & Goldstein, 2017) (Bora Korkut, 2018).

Görsel Renk Seçim Kriterleri

Renk seçimi sürecinde, ışık kaynağı, diş dokusu ve gözlemci arasındaki etkileşimlerin dikkate alınması gereklidir. Doğru bir renk tayini için klinik ortamın koşulları da önem taşır; muayene odasında duvarların nötr tonlarda olması, hastanın gri renkte bir önlük giymesi ve dudak kozmetiklerinin temizlenmiş olması önerilmektedir. Ayrıca renk seçimi, diş preparasyonuna başlanmadan önce gerçekleştirilmelidir. Çay, kahve, kırmızı şarap, sigara, kola ve metal tuzları gibi dış etkenlerin yanı sıra yetersiz ağız hijyenine bağlı gelişen yüzeysel lekelenmeler renk algısını olumsuz etkileyebilir. Bu nedenle, renk seçimi yapılacak dişin yüzeyi temizlenmeli ve mevcut lekeler polisaj ile uzaklaştırılmalıdır (Keyf, Uzun, & Altunsoy, 2009)

(Bayındır & Wee, 2006) (Sarıkaya & Güler, 2009). Hasta, hekimle aynı göz hizasında ve dik pozisyonda oturtulmalıdır. Renk seçimi mümkünse ilk 5 saniye içinde yapılmalıdır; süre uzadıkça görsel yorgunluk devreye girip hatalı seçim riskini artırabilir. Bu durumda göz, kısa süreliğine nötr bir yüzeye (ör. gri ton) yönlendirilerek dinlendirilmelidir (Kahramanoğlu & Özkan, 2013). Dış yüzeyi dehidrate olduğunda daha beyaz algılanabildiğinden, renk seçimi sırasında dişlerin kurummasına izin verilmemelidir. Ayrıca ölçümün yapıldığı zaman dilimi ve ortam ışığı önem taşır; bazı araştırmacılar 12:00–15:00 saatleri arasında, yaklaşık 5500 K renk sıcaklığına sahip gün ışığı koşullarının tercih edilmesini önermektedir (Sarafianou & ark., 2012).

Renk seçiminin standardizasyonu için 800–2700 lux aralığında aydınlatma sağlayan özel ışık kaynaklarının kullanılması önerilmektedir. Dental ünitelerin ışığı altında yapılan renk tayinleri doğru sonuç vermediğinden uygun değildir. Mine dokusunun kalınlığı tüm diş yüzeyinde farklılık gösterdiği için, dişin rengi servikalden insizale doğru değişkenlik göstermektedir. Bu nedenle, doğru renk belirlemesi için ölçümün orta üçlü bölgeden yapılması tavsiye edilmektedir. Ayrıca, diş rengini tanımlamada en kritik parametre olan value değerinin ilk aşamada değerlendirilmesi gerekmektedir (Ma & ark., 2010).

Aletsel (Enstrümantal) Renk Seçim Teknikleri

Enstrümantal renk eşleştirme teknikleri istatistiksel ve matematiksel olarak değerlendirilebilen, daha hızlı, nesnel, kolay iletilebilen ve tekrarlanabilen bir veri sistemi sağlar (Goldstep & Freedman, 2012) Aletsel sistemlerin en önemli avantajı, objektif ve tekrarlanabilir ölçüm sonuçları sağlamalarıdır. Spektrofotometreler, kolorimetreler, dijital kameralar ve intraoral tarayıcılar gibi cihazlar, renk verilerini sayısal biçimde (örneğin CIE Lab* koordinatları) kaydederek insan gözünden kaynaklanan subjektif hataları büyük

ölçüde ortadan kaldırır. Bu sayede hem klinik hem de laboratuvar süreçlerinde daha güvenilir renk eşleştirmesi yapılabilir. Klinisyenlerin, renk belirleme sürecinde kullandıkları cihazların avantajları ve sınırlılıkları konusunda bilgi sahibi olmaları büyük önem taşımaktadır. Enstrümantal yöntemler ile geleneksel görsel yöntemler birbirini tamamlayıcı niteliktedir ve bu iki yaklaşımın birlikte kullanılması, estetik açıdan daha başarılı ve güvenilir sonuçların elde edilmesine katkı sağlamaktadır (Paravina, 2018).

Kolorimetreler

Kolorimetreler, renk değerlerini CIELAB biriminde (L^* , a^* , b^*) sağlar. Bu cihazlar, matematiksel işlem yapmadan doğrudan renk koordinatlarını verir. Ancak, kolorimetreler tamamen hatasız sonuçlar vermeyebilir. Kolorimetreler, bir nesnenin yüzeyinden yansıyan ışığı analiz ederek bu bilgiyi renk parametrelerine dönüştüren cihazlardır. Bu yöntem, hem rengin objektif olarak belirlenmesinde hem de renk farklılıklarının sayısal olarak hesaplanmasında kullanılmaktadır (Ragain Jr, 1998). Kolorimetreler; kompakt yapıları, görece düşük maliyetleri, kullanım kolaylıkları, yüksek düzeyde tekrarlanabilirlik sağlamaları ve taşınabilirlik açısından sundukları avantajlarla dikkat çeken cihazlardır (Eppeldauer, 1998) (Minolta, 1998).

- **Minolta CR-321**

Minolta CR-321 kolorimetresi, diş hekimliğinde anterior restorasyonlarda renk seçimi için sıkça kullanılan bir dijital ölçüm cihazıdır. Cihaz, dişlerin veya restorasyon materyallerinin L^* , a^* , b^* renk değerlerini sayısal olarak belirleyerek objektif bir değerlendirme imkânı sunar. Bu sayede, gözle yapılan renk tespitinde ortaya çıkabilecek öznellik ortadan kaldırılır ve restorasyonun doğal dişle uyumu artırılır. Non-invaziv yapısı sayesinde diş yüzeyine temas gerektirmeyen cihaz, tekrarlanabilir ölçümler ile ΔE^* hesaplamalarına olanak sağlar ve böylece en uygun

kompozit veya seramik renk seçimi yapılabilir. Minolta CR-321, görsel renk eşleştirme yöntemleriyle birlikte kullanıldığında diş hekimliğinde estetik sonuçların güvenilirliğini artıran tamamlayıcı bir araç olarak kabul edilmektedir (Gehrke & ark., 2009).

- **Shade Eye NCC**

Shade Eye NCC, diş hekimliğinde estetik restorasyonlarda doğal diş rengiyle uyumlu sonuçlar elde etmek için kullanılan taşınabilir bir renk ölçüm cihazıdır. Cihazın 3 mm çapında bir ölçüm ucu vardır. Bu uç dişe temas ettirilip düğmeye basıldığında, diş yüzeyine ışık gönderir ve yüzeyden yansıyan ışık, uçtaki dedektör tarafından alınarak renk verilerini belirler.

Cihaz üç farklı modda çalışabilir: Tooth Mode (doğal diş rengi ölçümü), Porcelain Mode (porselen restorasyonlar için renk analizi) ve Whitening Mode (beyazlatılmış dişlerin renk ölçümü). Ölçüm sonuçları Lab* renk modeline göre alınır ve çeşitli porselen sistemleriyle uyumlu hale getirilir (Chu & ark., 2017).

- **Shade Eye EX**

Shade Eye EX, diş hekimliğinde özellikle estetik restorasyonlarda ve renk seçimi sürecinde önemli bir araçtır. İnsan gözüyle yapılan görsel renk seçimi ışık ve yorgunluk gibi faktörlerden etkilenebilirken, Shade Eye EX Lab* renk modeli ve gelişmiş sensör teknolojisiyle objektif ölçümler sağlar. Cihazın ölçüm verileri dijital olarak kaydedilip laboratuvara iletilebildiği için porselen restorasyonlar ve kompozit dolguların renk uyumu artar ve tekrar ölçüm ihtiyacı azalır. Farklı modları sayesinde doğal dişler, porselen restorasyonlar ve beyazlatılmış dişler için güvenilir ölçümler yapılabilir. Doğru renk seçimi estetik sonuçların tutarlılığını artırarak hasta memnuniyetini yükseltir ve özellikle ön diş restorasyonlarında kritik bir avantaj sağlar. Ayrıca, cihaz akademik çalışmalarda ve klinik araştırmalarda renk ölçüm verisi

sağlamak için de kullanılabilir, bu sayede diş hekimliği eğitiminde öğrencilerin renk bilinci gelişir (Shofu Inc., 2025).

Spektrofotometreler

Dental renk eşleştirmede en güvenilir, işlevsel ve çok yönlü cihazlardan biri spektrofotometrelerdir. Spektrofotometreler, dental alanda renk tayini için en güvenilir, pratik ve çok yönlü cihazlar arasında değerlendirilmektedir. Görünür spektrum boyunca 1-25 nm aralıklarla bir nesneden yansıyan ışık enerjisi miktarını ölçerler (Paul & ark., 2004) (Chu, Trushkowsky, & Paravina, 2010). Gehrke ve arkadaşları, görsel renk tayini ile spektrofotometre kullanılarak gerçekleştirilen dijital yöntemleri karşılaştırmış ve spektrofotometrelerin daha yüksek tekrarlanabilirlik ve güvenilirlik sunduğunu rapor etmiştir. Bu cihazlardan elde edilen verilerin, klinisyenler ve dental teknisyenler tarafından kullanılabilir bir forma dönüştürülmesi gerekmektedir. Çoğu durumda bu ölçümler, mevcut dental renk skalaları ile uyumlu olacak şekilde eşleştirilerek yorumlanmaktadır (Gehrke & ark., 2009).

- **Vita Easyshade® Advance 4.0 Spektrofotometresi**

Vita Zahnfabrik tarafından geliştirilen dördüncü nesil elektronik renk ölçüm cihazı Vita Easyshade, Vita Classical ve 3D-Master standartlarına dayalı olarak kısa sürede diş tonlarını belirleyebilmekte, dahili ışık kaynağı ile ölçüm doğruluğunu artırmakta ve kablosuz taşınabilir tasarımı sayesinde verileri Vita Assist yazılımına aktarabilmektedir (Kalantari, Ghoraishian, & Mohaghegh, 2017).

Lagouvardos ve ark.'nın Vita Easyshade spektrofotometre ile ShadeEye NCC kolorimetresinin renk ölçümlerinin güvenilirliklerini ve tekrarlanabilirliğinin karşılaştırıldığı bir çalışmada, Vita Easyshade'in tekrarlanabilirlik açısından daha başarılı olduğunu ancak iki cihazın güvenilirlikleri arasında fark olmadığını bildirmişlerdir (Lagouvardos & ark., 2009). Kim-

Pusateri ve ark.'ı dört farklı renk ölçüm cihazının (VITA Easysshade, SpectroShade, ShadeScan, ShadeVision,) doğruluğunu ve güvenilirliğini karşılaştırmışlardır. Vita Easysshade'in, güvenilirlik açısından %96,4 oranında başarılı olduğunu ve dört farklı renk ölçüm cihazı içerisinde en yüksek doğruluk oranına (%92,6) sahip olduğunu belirtmişlerdir (Kim-Pusateri & ark., 2009).

Spektroradyometre

Spektroradyometreler, görünür ışık spektrumunda 5, 10 ve 20 nm aralıklarla radyometrik ölçümler gerçekleştirebilen cihazlardır. Elde edilen veriler, parlaklık (irradiance) ve ışık yayılımı (radiance) değerleri ile ifade edilmektedir. Spektroradyometreler, kullanım hassasiyeti yüksek cihazlar olup, ölçüm açısındaki küçük değişiklikler bile sonuçlarda belirgin sapmalara yol açabilmektedir; bu durum diş hekimliğinde kullanımını sınırlamaktadır. Bununla birlikte, kolorimetrelerin aksine ölçüm sırasında örnek yüzeye temas gerektirmemeleri, düz yüzeylerde sınırlama olmaksızın kullanılabilmelerini sağlamaktadır (Lehmann & ark., 2010) (Park, Lee, & Lim, 2006) (Paravina & Powers, 2004).

RGB (Red-Green-Blue) Cihazları

RGB renk ölçüm cihazları, diş hekimliğinde renk seçimini objektif ve dijital hale getiren sistemlerdir. Bu cihazlar, diş yüzeyine gönderilen ışığın kırmızı, yeşil ve mavi bileşenlerini algılayarak her birinin yoğunluğunu ölçer. Elde edilen RGB değerleri, yazılım aracılığıyla CIE $L^*a^*b^*$ renk uzayına dönüştürülür ve bu sayede renk sayısal olarak tanımlanabilir hale gelir. RGB sistemleri genellikle dijital kameralarla entegre olarak çalışır. Diş yüzeyinin fotoğrafı alınırken aynı anda her pikselin renk değeri ölçülür. Bu yöntem, dişin genel renginin yanı sıra yüzeydeki ton farklılıklarını da değerlendirmeye olanak tanır (Rashid, Farook, & Dudley, 2023). Bu cihazlar, kırmızı, yeşil ve mavi renk bileşenlerini dijital görüntü

verisine dönüştürmektedir, ancak ayrıntılı ve kapsamlı renk analizleri sunmamaktadır (Chu, 2004).

Bilgisayar Destekli Renk Eşleştirme Sistemi

Dental kolorimetreler ve spektrofotometrelere ek olarak, tarayıcılar ve dijital kameralar renk verilerini kaydetmek, detaylı renk haritalaması yapmak ve diş yüzeyinin ayrıntılı görüntüsünü oluşturmak için kullanılabilir (Goldstein & ark., 2018). Bu sayede dijital görüntüleme, hassas kolorimetrik değerlendirmelerle birleştirilerek dental renk yönetiminin doğruluğunu artırmakta, tedavi öngörülebilirliğini yükseltmekte ve zaman tasarrufu sağlamaktadır (Chu, Trushkowsky, & Paravina, 2010) (Ivan & Rade, 2009).

Dijital Kameralar ve Görüntü Sistemi

Diş yüzeyinde gözlenen mine hipoplazileri, dekalsifikasyonlar ve translüsensite gibi optik efektlerin doğru şekilde aktarılabilmesi açısından dijital yöntemler tercih edilmelidir. Ayrıca, elde edilen dijital görüntülerin elektronik ortamda kolayca paylaşılabilmesi, bu yöntemle önemli bir avantaj sağlamaktadır. Son yıllarda, diş hekimleri ile diş teknisyenleri arasındaki iletişimi güçlendirmek amacıyla bu teknolojilerin kullanımında belirgin bir artış gözlenmiştir (Vivek & ark., 2013). Objeden yansıyan kırmızı, yeşil ve mavi (RGB) sinyalleri algılayan dijital kameralar, bu verileri CIE Lab renk parametrelerine dönüştürmektedir. Kameranın elde ettiği RGB değerleri ile CIE Lab değerleri arasındaki ilişki, literatürde ‘kamera karakterizasyonu’ olarak tanımlanmaktadır (Korkmaz Ceyhan & ark., 2014). Bu yöntem, diş rengi, morfoloji, renk dağılımı ve yüzey dokusu gibi bilgilerin aktarımına olanak sağlar. Renk skalaları eşliğinde alınan fotoğraflar faydalı olmakla birlikte, hatalı aydınlatma ve renk standardizasyonu zorlukları oluşturabilmektedir (Pandey & ark., 2016).

Diş renginin, diş yüzeyinin dikey eksenı boyunca değışiklik gösterdiği bildirilmiştir. Renk derecelendirmesi genellikle en doygun tonun bulunduğu servikal bölgeden insizal bölgeye doğru yapılır. Bununla birlikte, dişeti ve proksimal temas alanları, gölge etkisi nedeniyle dişin doğal rengini doğru şekilde yansıtmayabilir. Genellikle dişin orta üçlü bölgesi, doğal diş yüzeyindeki renk geçişlerinin karmaşıklığını yansıtarak, renk karşılaştırmaları için değerli bir referans alanı olarak kullanılmaktadır (Tam & Lee, 2012). Dozić ve ark. bir çalışmada Shade Eye , İdenta Color 2 kolorimetreleri, ShadeScan, Ikam CDD dijital kameraları ve Vita Easyshade spektrofotometresi cihazlarını kullanarak renk ölçüm cihazlarının performanslarını değerlendirmişlerdir ve bu çalışmanın sonuçlarına göre kolorimetreler güvenilirliği en düşük cihaz grubu iken hem in vivo hem in vitro çalışmalarda en güvenilir araçlar spektrofotometreler olarak bildirilmiştir (Dozić & ark., 2007)

Dijital Renk Analizörü/Kolorimetre

- **Shade Scan**

Cihaz, renkli LCD ekranı sayesinde görüntü konumlandırma ve odaklamada kolaylık sağlar ve elde taşınabilir özelliktedir. Halojen ışık kaynağı, fiberoptik kablo aracılığıyla diş yüzeyine 45° açıyla yönlendirilir ve yansıyan ışık 0°'de toplanır. Işık yoğunluğu ile gri ve renk standartlarının kalibrasyonu sürekli izlenir, böylece tutarlı renk ölçümleri sağlanır. Elde edilen veriler, Gölge Tarama yazılımı kullanılarak bilgisayara aktarılabilir; dişin gölge ve yarı saydamlık haritaları, laboratuvara e-posta ile veya klinik verilerle birlikte çıktı ya da bilgi kartı eklenerek iletebilir (Yap, 1998) (Douglas & Przybylska, 1999).

- **Shade Rite Dental Vision System**

Cihaz, diş üzerinde doğru konumlandırmayı kolaylaştırmak için entegre bir ışık kaynağı ve LCD ekrana sahip, taşınabilir bir sistemdir. Ölçümler, CIE (Commission Internationale de l'Éclairage)

gözlemci işlevlerini taklit eden dönen filtreler aracılığıyla gerçekleştirilir. Cihaz bağımsız çalışabilir ve kalibrasyon ile veri aktarımı için bir yerleştirme istasyonuna monte edilebilir (Sato, 1999).

Dijital Renk Analizörü/Spektrofotometre

- **Spectroshade**

Cihaz, halojen bir ışık kaynağından gelen ışığı fiber optik demetler ve mercekler aracılığıyla dış yüzeyine 45° açıyla iletir. Dışın görüntüsü konum doğrulaması için bilgisayar ekranında gösterilir. Yansıyan ışık, tek renkli olarak alınır ve spektral tarama CCD sensörleri aracılığıyla 10 nm bant genişliklerinde gerçekleştirilir. Yazılım, çoğu porselen sistemi için hazır renk kılavuzları içerir ve ek referans ekleme olanağı sağlar; ayrıca en yakın renk tonunu ve referansla olan renk farkını hesaplar (Hasegawa, Ikeda, & Kawaguchi, 2000).

Dental Fotoğrafçılık ile Renk Analizi

Renk seçimi hekim tarafından doğrudan ağız ortamında yapılabileceği gibi, profesyonel fotoğraflar üzerinden de değerlendirilebilir (Fahl Jr, 2011) (Dietschi, Ardu, & Krejci, 2006). Dişlerin dehidrate olmasını önlemek için fotoğraf çekimi mutlaka izolasyondan sonraki ilk 3 dakika içinde yapılmalıdır Hata payını azaltmak amacıyla fotoğraf, bilgisayar yazılımlarında işlenebilir. Bu sayede siyah-beyaz hale getirilmiş görüntü üzerinden mine rengi, kontrastı artırılmış görüntü üzerinden ise dentin rengi daha net belirlenebilir (Mackenzie & ark., 2013) (Terry, Snow, & McLaren, 2008). Yöntemin geliştirilmesine yönelik güncel çalışmalarda, kompozit dairelerin görüntülenmesinde çapraz polarizasyon filtreli kameralar kullanılmış ve böylece hekimlerin uygun renk seçimlerini doğrudan kamera ekranındaki önizleme üzerinden yapmaları sağlanmıştır. Bu çalışmalarda, çapraz polarizasyon filtrelerinin

kullanıldığı dental fotoğrafçılık tekniğinin, kompozit renk seçiminde hem pratikliği hem de düşük hata oranı ile öne çıkan yöntemlerden biri olduğu vurgulanmıştır (E. A. McLaren, Figueira, & Goldstein, 2017).

Kompozit restorasyonlarda renk belirlemede güvenilir bir yöntem olarak kabul edilen çapraz polarizasyon filtreli dental fotoğrafçılık için, günümüzde farklı flaş sistemlerine uyumlu tak- çıkar filtreler geliştirilmiştir. Renk tespiti amacıyla yapılan fotoğraf çekimlerinde, ring veya dual flaş gibi yüzeye homojen ışık yayan kaynakların kullanılması önerilmektedir. Profesyonel kameralar tercih edilsede, akıllı telefonlarla da bu yöntem uygulanabilmektedir; ancak bu durumda homojen ve sürekli ışık sağlayan ek aparatların kullanılması gereklidir. Sadece akıllı telefon ile yapılan çekimler ise mevcut teknoloji koşullarında renk seçimi açısından yeterli güvenilirliği sağlamamakta ve hatalı sonuçlara yol açabilmektedir (Villavicencio-Espinoza, Narimatsu, & Furuse, 2018). Beyaz dengesi (WB), kullanılan ışık kaynağının rengi (sıcaklığı) ile ilgili bir ayardır. Dijital kameraların fotoğrafları ışık kaynağının rengine göre işledikleri bu işlem “beyaz ayarı” olarak bilinmektedir.

Dental fotoğrafçılıkta doğru renk tespiti açısından kritik öneme sahiptir. Bu nedenle çekim öncesinde bir gray-scale kalibrasyon kartı ile beyaz dengesi ayarı yapılması önerilir. Ancak beyaz dengesi yapılmamış olsa bile bazı fotoğraf çekim teknikleri ve renk analiz yöntemleri ile doğru sonuç elde edilebilmektedir. Bilimsel olarak kabul gören yöntemlerden biri, çekilen fotoğrafın temel bir görüntü işleme yazılımında (örneğin Paint, Microsoft Corporation, ABD) analiz edilmesidir. Fotoğraf siyah-beyaza dönüştürüldüğünde translusent (mine) renklerin belirlenmesi, kontrast artırıldığında ise kromatik (dentin ve body) renklerin seçimi daha doğru yapılabilmektedir. Bu aşamalardan sonra, kompozit

butonların çevresindeki diş dokusuna en çok uyum sağlayan renk tercih edilmelidir (Gurrea & ark., 2016) (Bora Korkut, 2022).

Çapraz-Polarizasyon Filtreli Dental Fotoğrafçılık ile Renk Analizi

Günümüzde renk analizinde en güvenilir yöntemlerden biri, çapraz polarizasyon (CP) filtreli dental fotoğrafçılık tekniğidir. Bu yöntemde, diş yüzeyine yerleştirilen kompozit butonlar özel polimerizasyon filtreleri ile fotoğraflanır ve çekilen görüntü üzerinde herhangi bir ek işleme gerek kalmadan, renk seçimi doğrudan kamera ekranından gerçekleştirilebilir. Polarizasyon filtreleri, geleneksel fotoğrafçılıkta güneş ışığı yansımalarını engellemek için kullanılırken, dental fotoğrafçılıkta kamera objektifi ile ışık kaynağına dik açıyla yerleştirilerek çapraz polarizasyon sağlanır.

Piyasada farklı objektif ve ışık kaynakları ile uyumlu olarak üretilmiş çapraz polarizasyon filtreleri “Polar Eyes” (Photomed, ABD) adıyla temin edilebilir. Bu filtreler, dokunmatik ekranlar için kullanılan ekran koruyucu filmler ile benzer özellikler taşır ve uygun şekilde kesilerek objektif ve flaşların önüne dik açıyla yerleştirilerek çapraz polarizasyon filtresi oluşturulabilir. Bazı cihazlarda, örneğin Smile Lite MDP (Smile Line, İsviçre) mobil dental fotoğraf aparatı, filtreler hazır olarak sunulmaktadır. CP filtreleri kullanıldığında, çekilen dental fotoğraflarda istenmeyen yansımalar ortadan kalkar ve beyaz dengesi kalibrasyonu yapılmasına gerek kalmaz. Bu sayede hem dentin ve body renkleri hem de mine renkleri, fotoğraf üzerinden subjektif olarak doğru bir şekilde seçilebilir (Bora Korkut, 2022).

Kantitatif Renk Analizi

Dijital renk analizi yazılımları, çekilen fotoğraflar üzerinden kantitatif renk değerlendirmesi yapılmasına olanak sağlar. Bu analizlerin doğruluğunu artırmak ve ışık yansımalarını minimuma

indirmek için, fotoğrafların çapraz polarizasyon (CP) filtreli yöntemle çekilmiş olması önerilmektedir. Kantitatif dijital renk analizinde yaygın olarak kullanılan yazılımlara Digital Color Meter (Apple Inc., ABD) ve Photoshop CC (Adobe, ABD) örnek verilebilir (Bora Korkut, 2022). Bu programlar sayesinde kompozit buton yüzeylerinin L^* , a^* ve b^* değerleri sayısal olarak belirlenebilir. Elde edilen bu değerler kullanılarak iki yüzey arasındaki ΔE^* (renk farkı) hesaplanır ve en düşük ΔE^* değerine sahip buton, en uygun renk olarak seçilir (Gurrea & ark., 2016).

Ağız İçi Tarayıcılar (IOS)

Ağız içi tarayıcıların geliştirilmesi, dişler ve çevreleyen dokular hakkında ayrıntılı bilgi kaydederken aynı zamanda diş rengi bilgisini yakalamayı amaçlamıştır. Ağız içi tarayıcılar üzerine yapılan çoğu çalışma, dişleri ve yumuşak dokuları kopyalamadaki doğruluklarına odaklanmış ve bunları geleneksel izlenim yöntemleri ve diğer ağız içi tarama cihazlarıyla karşılaştırmıştır (Cao & ark., 2023) (Yuzbasioglu & ark., 2014). Önceki çalışmaların sonuçları, ağız içi tarayıcıların doğruluğunu etkileyen çeşitli faktörler olduğunu göstermiştir. Bunlar arasında tarama deseni, tarama mesafesi, diş hekiminin deneyimi ve diş hazırlama özellikleri yer alır (Ashraf & ark., 2020). Ancak, ağız içi tarayıcılar kullanılarak diş rengi değerlendirmesinin doğruluğu üzerine yapılan araştırmalar sınırlı kalmış ve çeşitli sonuçlar vermiştir.

Bazı çalışmalar, renk parametrelerinde kolorimetrelerle karşılaştırıldığında önemli farklılıklar olması nedeniyle, dijital ağız içi tarayıcılarla diş rengi değerlendirmesinin klinik uygulamada birincil yöntem olarak ideal olmayabileceğini öne sürmektedir (Yoon & ark., 2018). Öte yandan, diğer çalışmalar ağız içi tarayıcıların iyi bir doğruluk gösterdiğini ve bunların diş rengi değerlendirmesinde yüksek performanslı araçlar olarak kullanılabileceğini göstermiştir (Czigola & ark., 2021). 3Shape

TRIOS Color / TRIOS 3, CEREC Omnicam, iTero Element renk seçiminde en çok tercih edilen ağız içi tarayıcılarıdır.

Hiperspektral Görüntüleme Teknolojileri

Hiperspektral görüntüleme (HSI), dalga boyuna bağlı yansımayı ölçerek bir dişin rengini tam olarak karakterize edebilir. Diş hekimleri, teknisyenler ve hastalar arasında renk bilgisinin iletişimini kolaylaştıran ve öznelliği ortadan kaldıran nicel bir ölçüm sunar. Dişin ölçüldüğü ışık koşullarından bağımsız bir renk ölçümü sağlar. Metamerizmden kaynaklanan uyumsuzlukların önüne geçilerek, dişin ve restorasyonunun renginin herhangi bir ışık koşulunda nasıl algılanacağını simüle edilmesi mümkündür.

Görüntüdeki yüzlerce noktadan spektral bilgileri kaydeder ve diş yüzeyindeki renk değişiminin haritalanmasını sağlar Tejada-Casado ve arkadaşları, 30 gönüllü bireyin üst çene ön dişlerini Specim IQ hiperspektral kamera kullanarak 400–1000 nm aralığında görüntülemiştir ve bu çalışma, hiperspektral görüntüleme sistemlerinin (HSI) diş hekimliğinde in-vivo renk ölçümünde kullanılabilirliğini ve güvenilirliğini değerlendirmek amacıyla yapılmıştır (Tejada-Casado & ark., 2022). Bu çalışmanın sonucunda hiperspektral görüntüleme sisteminin dişlerin doğal renk varyasyonlarını bölgesel olarak yüksek doğrulukla tespit edebildiğini göstermektedir. Bu yöntem, klasik kolorimetre veya spektrofotometre sistemlerinden daha ayrıntılı renk analizi sağlayarak, gelecekte dijital renk eşleştirme ve kişiselleştirilmiş restorasyon süreçlerinde güçlü bir alternatif olarak değerlendirilmektedir (Tejada-Casado & ark., 2022).

Yapay Zekâ ile Renk Seçimi

Son yıllarda yapay zekâ (YZ) destekli sistemler, dental renk seçiminin objektif, tekrarlanabilir ve standardize edilebilir bir biçimde gerçekleştirilmesine olanak tanımaktadır. Makine öğrenmesi (ML) ve derin öğrenme (DL) algoritmaları, dijital

fotoğraflar, spektral veriler ve hiperspektral görüntüleme çıktıları üzerinden değerlendirerek doğal diş renklerini yüksek doğruluk oranıyla sınıflandırabilmektedir. Bu yaklaşımlar, yalnızca Vita Classical ve 3D-Master gibi konvansiyonel skalalarla uyumlu sonuçlar üretmekle kalmamakta, aynı zamanda farklı ışık kaynaklarında ortaya çıkan metamerizm sorununu da minimize etmektedir (Shetty & ark., 2024) (Karcioglu & ark., 2025) (Shishira & ark., 2024). Şahin ve arkadaşları tarafından 2025 yılında gerçekleştirilen in vitro çalışma, yapay zeka (YZ) uygulamaları ile spektrofotometreyi diş rengi eşleştirme doğruluğu açısından karşılaştırmıştır. Renk uyumu CIEDE2000 renk farkı metriği kullanılarak ölçülmüştür. Sonuçlar, YZ destekli sistemlerin spektrofotometreye kıyasla daha düşük doğruluk oranları sağladığını göstermiştir. Bu bulgu, YZ destekli renk eşleştirme sistemlerinde hem in vivo hem de in vitro yeni çalışmalar yapılmasının gerekliliğini göstermiştir (Şahin, Kaleli, & Ural, 2025).

Görsel ve Aletsel Renk Seçim Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Çalışmalardan elde edilen genel bulgular, yalnızca görsel renk skalası kullanılarak yapılan restorasyonlarda, dijital yöntemlerle karşılaştırıldığında renk farklılıklarının daha fazla olduğunu göstermektedir. Görsel skalalarla yapılan renk seçimlerinde, hatalı renk uyumu oranı da belirgin şekilde yüksektir. Oysa estetik restorasyonlarda, doğal dişle tam bir renk uyumu elde edilmesi, başarılı bir sonuç için temel faktörlerden biridir. Restorasyonlarda ortaya çıkan renk farklılıkları hem klinisyen hem de hasta açısından memnuniyetsizlik ve stres kaynağı olabilmektedir (Alghazali & ark., 2012) (Paolone & ark., 2014).

Bu doğrultuda, daha doğru sonuçlar elde edebilmek için görsel ve dijital renk belirleme tekniklerinin birlikte kullanılması önerilmektedir. Görsel yöntemler, doğal dişle en yakın rengi belirlemek amacıyla renk skalalarının kullanılmasına dayanır; ancak

bu yöntem oldukça subjektif olup, ışık kaynağı, gözlemcinin deneyimi, eğitim düzeyi, hatta fizyolojik ve psikolojik durum gibi birçok değişkenden etkilenmektedir. Dijital sistemler ise bu değişkenleri en aza indirerek, renk tonları, yüzey morfolojisi ve translusensi gibi ayrıntılı bilgileri standartlaştırılmış biçimde elde etmeye olanak tanır (Haddad & ark., 2009). Günümüzde, dijital görüntüleme, intraoral tarayıcılar ve yapay zekâ destekli analiz sistemlerinin kullanımı sayesinde diş hekimi ile laboratuvar arasındaki iletişim güçlenmiş, renk seçimi ve restorasyon üretiminde tekrarlanabilirlik artmıştır. En ideal yaklaşım, görsel değerlendirme ile dijital teknolojilerin entegre edilerek, her iki yöntemin avantajlarını birleştiren hibrit bir sistemin uygulanmasıdır (Alomari & Chadwick, 2011) (Hardan, 2020).

Sonuç

Diş hekimliğinde estetik restorasyonlarda doğru renk seçimi, başarılı bir klinik sonucun temel taşlarından biridir. Geleneksel görsel yöntemler, renk skalalarının ve klinisyen deneyiminin etkisiyle hâlen kullanılmakla birlikte, subjektif değerlendirmelere bağlıdır. Enstrümantal renk analiz cihazları, kolorimetre ve spektrofotometreler sayesinde objektif ve tekrarlanabilir ölçümler sağlasada, cihazların kullanım hassasiyeti ve yüzey koşullarına duyarlılığı nedeniyle bazı sınırlamalar mevcuttur. Günümüzde dijital teknolojiler, renk seçiminde bu sınırlılıkları aşmakta ve doğruluğu artırmaktadır. Ağız içi tarayıcılar, dişlerin yüksek çözünürlüklü 3D modellerini oluştururken, dijital fotoğrafçılık ve çapraz polarizasyon filtreli yöntemler renk ölçümünü optimize eder. Yapay zekâ destekli yazılımlar ise bu dijital verileri analiz ederek en uygun renk eşleşmesini sağlayarak, klinisyen ve teknisyenler arasındaki iletişimi güçlendirir, işlem öngörülebilirliğini artırır. Bu entegrasyon sayesinde, geleneksel ve enstrümantal yöntemlerle elde edilebilecek doğruluk seviyesinin ötesinde, daha doğal ve uyumlu restorasyon sonuçları elde edilebilmektedir.

Kaynakça

Alghazali, N., Burnside, G., Moallem, M., Smith, P., Preston, A., & Jarad, F. D. (2012). Assessment of perceptibility and acceptability of color difference of denture teeth. *J. Dent.*, 40, e10-e17.

Alkhatib, M. N., Holt, R., & Bedi, R. (2005). Age and perception of dental appearance and tooth colour. *Gerodontology*, 22(1), 32-36.

Alomari, M., & Chadwick, R. (2011). Factors influencing the shade matching performance of dentists and dental technicians when using two different shade guides. *Br. Dent. J.*, 211(11), E23-E23.

Analoui, M., Papkosta, E., Cochran, M., & Matis, B. (2004). Designing visually optimal shade guides. *J. Prosthet. Dent.*, 92(4), 371-376.

Ashraf, Y., Sabet, A., Hamdy, A., & Ebeid, K. (2020). Influence of preparation type and tooth geometry on the accuracy of different intraoral scanners. *J. Prosthodont.*, 29(9), 800-804.

Bayındır, F., & Wee, A. G. (2006). Diş rengi seçiminde bilgisayar destekli sistemlerin kullanımı. *Hacettepe Dişhekimliği Fakültesi Derg. (Clinical Dentistry and Research)*, 30(3), 40-46.

Beddis, H. P., & Nixon, P. J. (2012). Layering composites for ultimate aesthetics in direct restorations. *Dent. Update*, 39(9), 630-636.

Berns, R. (2000). Principles of Color Technology, Ch. 4 Measuring Colors. In: John Wiley & Sons, New York, USA.

Bhat, V., Prasad, D. K., Sood, S., & Bhat, A. (2011). Role of colors in prosthodontics: application of color science in restorative dentistry. *Indian J. Dent. Res.*, 22(6), 804-809.

Brewer, J. D., Wee, A., & Seghi, R. (2004). Advances in color matching. *Dental Clinics*, 48(2), 341-358.

Buchmeier, H. (2023). *Visueller und elektronischer Vergleich der Farbmuster des VITA Toothguide 3D-MASTER® und Bleachedguide*

3D-MASTER®. Dissertation, Mainz, Johannes Gutenberg-Universität Mainz, 2023,

Cao, R., Zhang, S., Li, L., Qiu, P., Xu, H., & Cao, Y. (2023). Accuracy of intraoral scanning versus conventional impressions for partial edentulous patients with maxillary defects. *Sci. Rep.*, 13(1), 16773.

Chu, S. J. (2004). Fundamentals of color: shade matching and communication in esthetic dentistry. (*No Title*).

Chu, S. J., Paravina, R. D., Sailer, I., & Miesleszko, A. J. (2017). *Color in dentistry: a clinical guide to predictable esthetics* (Vol. 129): Quintessence Publishing Hanover Park (IL).

Chu, S. J., Trushkowsky, R. D., & Paravina, R. D. (2010). Dental color matching instruments and systems. Review of clinical and research aspects. *J. Dent.*, 38, e2-e16.

Commission Internationale de l'Éclairage (CIE)) (1976). *Colorimetry. CIE Publication* No. 15:1976. Vienna: CIE;.

Corcodel, N., Rammelsberg, P., Jakstat, H., Moldovan, O., Schwarz, S., & Hassel, A. J. (2010). The linear shade guide design of Vita 3D-master performs as well as the original design of the Vita 3D-master. *J. Oral Rehabil.*, 37(11), 860-865.

Craig, R. G., Peyton, F. A., & Asgar, K. (1975). *Restorative dental materials*: CV Mosby Company.

Culpepper, W. D. (1970). A comparative study of shade-matching procedures. *J. Prosthet. Dent.*, 24(2), 166-173.

Czigola, A., Róth, I., Vitai, V., Fehér, D., Hermann, P., & Borbély, J. (2021). Comparing the effectiveness of shade measurement by intraoral scanner, digital spectrophotometer, and visual shade assessment. *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry*, 33(8), 1166-1174.

del Mar Pérez, M., Saleh, A., Yebra, A., & Pulgar, R. (2007). Study of the variation between CIELAB ΔE^* and CIEDE2000 color-

differences of resin composites. *Dental Materials Journal*, 26(1), 21-28.

Dietschi, D., Ardu, S., & Krejci, I. (2006). A new shading concept based on natural tooth color applied to direct composite restorations. *Quintessence International (Berlin, Germany: 1985)*, 37(2), 91-102.

Doğan, D. A., & Yüzügüllü, B. (2011). Renk seçiminde güncel teknolojik gelişmeler. *Atatürk Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi Dergisi*, 2011(4), 65-72.

Douglas, R. D., & Przybylska, M. (1999). Predicting porcelain thickness required for dental shade matches. *J. Prosthet. Dent.*, 82(2), 143-149.

Dozić, A., Kleverlaan, C. J., El-Zohairy, A., Feilzer, A. J., & Khashayar, G. (2007). Performance of five commercially available tooth color-measuring devices. *J. Prosthodont.*, 16(2), 93-100.

Dudea, D., Lasserre, J.-F., Alb, C., Culic, B., Ciutrla, I. S. P., & Colosi, H. (2012). Patients' perspective on dental aesthetics in a South-Eastern European community. *J. Dent.*, 40, e72-e81.

Eppeldauer, G. (1998). Spectral response based calibration method of tristimulus colorimeters. *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.*, 103(6), 615.

Fahl Jr, N. (2011). Step-by-step approaches for anterior direct restorative challenges. *Journal of Cosmetic Dentistry-The Official Journal of the AACD*, 26(4), 42.

Gehrke, P., Riekeberg, U., Fackler, O., & Dhom, G. (2009). Comparison of in vivo visual, spectrophotometric and colorimetric shade determination of teeth and implant-supported crowns. *Int. J. Comput. Dent.*, 12(3), 247-263.

Glockner, K. (2015). Visual vs. spectrophotometric methods for shade selection. *Coll. Antropol.*, 39(3), 801-802.

Goldstein, R., Chu, S., Lee, E., & Stappert, R. (2018). Understanding Color. *Goldstein RE, Chu SJ, Lee EA, Stappert R. Goldstein's*

Esthetics in Dentistry. Third edition. Hoboken, USA: John Wiley & Sons, Inc, 270-292.

Goldstep, F., & Freedman, G. (2012). Color and shade. *Freedman G. Contemporary Esthetic Dentistry. 1st edition. UK: Elsevier Mosby, 135-167.*

Gómez-Polo, C., Gómez-Polo, M., Celemin-Viñuela, A., & De Parga, J. A. M. V. (2014). Differences between the human eye and the spectrophotometer in the shade matching of tooth colour. *J. Dent., 42(6), 742-745.*

Gómez-Polo, C., Fraile, J. F., López, N. Q., Muñoz, M. P., Lobato, M., & Montero, J. (2024). Three-dimensional representation of the Vita Toothguide 3D-Master: An in vivo clinical study. *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry, 36(3), 421-428.*

Grososky, A., Adkins, S., Bastholm, R., Meyer, L., Krueger, L., Meyer, J., & Torma, P. (2003). Tooth color: effects on judgments of attractiveness and age. *Percept. Mot. Skills, 96(1), 43-48.*

Gurrea, J., Gurrea, M., Bruguera, A., Sampaio, C. S., Janal, M., Bonfante, E., . . . Hirata, R. (2016). Evaluation of Dental Shade Guide Variability Using Cross-Polarized Photography. *Int. J. Periodontics Restorative Dent., 36(5).*

Haddad, H. J., Jakstat, H. A., Arnetz, G., Borbely, J., Vichi, A., Dumfahrt, H., . . . Marada, G. (2009). Does gender and experience influence shade matching quality? *J. Dent., 37, e40-e44.*

Hall, N. (1991). Tooth colour selection: the application of colour science to dental colour matching. *Aust. Prosthodont. J., 5, 41-46.*

Hammad, I. A., & Stein, R. S. (1991). A qualitative study for the bond and color of ceramometals. Part II. *J. Prosthet. Dent., 65(2), 169-179.*

Haralur, S. B. (2015). Effect of age on tooth shade, skin color and skin-tooth color interrelationship in Saudi Arabian subpopulation. *Journal of international oral health: JIOH, 7(8), 33.*

Hardan, L. (2020). Protocols for mobile dental photography with auxiliary lighting. *(No Title)*.

Hasegawa, A., Ikeda, I., & Kawaguchi, S. (2000). Color and translucency of in vivo natural central incisors. *J. Prosthet. Dent.*, 83(4), 418-423.

Hassel, A. J., Nitschke, I., Dreyhaupt, J., Wegener, I., Rammelsberg, P., & Hassel, J. C. (2008). Predicting tooth color from facial features and gender: results from a white elderly cohort. *J. Prosthet. Dent.*, 99(2), 101-106.

Hegenbarth, E. A., & Koehler, H. M. (1989). Creative ceramic color: a practical system. *(No Title)*.

Ho, C., Syd, B., & Dent, G. (2007). Shade selection. *Aust. Dent. Pract.*, 116-118.

Horn, D. J., Bulan-Brady, J., & Hicks, M. L. (1998). Sphere spectrophotometer versus human evaluation of tooth shade. *J. Endod.*, 24(12), 786-790.

Ivan, R., & Rade, P. (2009). Color Measuring Instruments. *Acta Stomatologica Naissi*, 25(60).

Jahangiri, L., Reinhardt, S. B., Mehra, R. V., & Matheson, P. B. (2002). Relationship between tooth shade value and skin color: an observational study. *J. Prosthet. Dent.*, 87(2), 149-152.

Joiner, A. (2004). Tooth colour: a review of the literature. *J. Dent.*, 32, 3-12.

Jouhar, R., Ahmed, M. A., & Khurshid, Z. (2022). An overview of shade selection in clinical dentistry. *Applied sciences*, 12(14), 6841.

Kahramanoğlu, E., & Özkan, Y. K. (2013). Diş hekimliğinde estetik ve renk. *Cumhuriyet Dental Journal*, 16(4), 339-347.

Kalantari, M. H., Ghoraiashian, S. A., & Mohaghegh, M. (2017). Evaluation of accuracy of shade selection using two spectrophotometer systems: Vita Easyshade and Degudent Shade Pilot. *European journal of dentistry*, 11(02), 196-200.

Karcioglu, A. A., Eftli, E., Simsek, E., Ozdogan, A., Karatas, F., & Senocak, T. (2025). ML-based tooth shade assessment to prevent metamerism in different clinic lights. *Lasers Med. Sci.*, 40(1), 39.

Keyf, F., Uzun, G., & Altunsoy, S. (2009). Diş hekimliğinde renk seçimi. *Hacettepe Diş Hek Fak Derg*, 33(4), 52-58.

Kim-Pusateri, S., Brewer, J. D., Davis, E. L., & Wee, A. G. (2009). Reliability and accuracy of four dental shade-matching devices. *J. Prosthet. Dent.*, 101(3), 193-199.

Koenigswald, W. V., & Rose, K. D. (2005). The enamel microstructure of the early Eocene pantodont *Coryphodon* and the nature of the zigzag enamel. *J. Mamm. Evol.*, 12(3), 419-432.

Korkmaz Ceyhan, Y., Ontiveros, J. C., Powers, J. M., & Paravina, R. D. (2014). Accelerated aging effects on color and translucency of flowable composites. *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry*, 26(4), 272-278.

Korkut, B. (2016). Simulating natural dental outlook in esthetic dentistry: a case report. *Int. J. Med. Sci. Clin. Invent*, 3(9).

Korkut, B. (2018). Smile makeover with direct composite veneers: A two-year follow-up report. *Journal of dental research, dental clinics, dental prospects*, 12(2), 146.

Korkut, B. (2025). *Esthetic Anterior Composite Restorations*. Illinois United States of America: Quintessence Publishing Company, Inc

Kuehni, R. G. (2002). The early development of the Munsell system. *Color Research & Application: Endorsed by Inter-Society Color Council, The Colour Group (Great Britain), Canadian Society for Color, Color Science Association of Japan, Dutch Society for the Study of Color, The Swedish Colour Centre Foundation, Colour Society of Australia, Centre Français de la Couleur*, 27(1), 20-27.

Lagouvardos, P. E., Fougia, A. G., Diamantopoulou, S. A., & Polyzois, G. L. (2009). Repeatability and interdevice reliability of

two portable color selection devices in matching and measuring tooth color. *J. Prosthet. Dent.*, 101(1), 40-45.

Lehmann, K. M., Igiel, C., Schmidtman, I., & Scheller, H. (2010). Four color-measuring devices compared with a spectrophotometric reference system. *J. Dent.*, 38, e65-e70.

LeSage, B., Milnar, F., & Wohlberg, J. (2008). Achieving the epitome of composite art: creating natural tooth esthetics, texture, and anatomy using appropriate preparation and layering techniques. *Journal of Cosmet Dent.* 2008; 24 (3): 42, 51.

Lise, D. P., Siedschlag, G., Bernardon, J. K., & Baratieri, L. N. (2018). Randomized clinical trial of 2 nonvital tooth bleaching techniques: A 1-year follow-up. *J. Prosthet. Dent.*, 119(1), 53-59.

LL, O. (2000). Impact of demographic, behavioral, and dental care utilization parameters on tooth color and personal satisfaction. *Compend. Contin. Educ. Dent.*, 29, S35-S41.

Ma, J. F., Du, R. X., Wang, S. Q., & Li, Y. M. (2010). Effects of background, direction and intensity of ambient light, measuring position, and adjacent teeth, on anterior tooth colour measurement in vitro. *The Chinese Journal of Dental Research*, 13(2), 147-152.

Mackenzie, L., Parmar, D., Shortall, A. C., & Burke, F. T. (2013). Direct anterior composites: a practical guide. *Dent. Update*, 40(4), 297-317.

Mayekar, S. M. (2001). Shades of a color. Illusion or reality? *Dent. Clin. North Am.*, 45(1), 155-172, vii.

McLaren, E. A., Figueira, J., & Goldstein, R. E. (2017). A technique using calibrated photography and photoshop for accurate shade analysis and communication. *Compend. Contin. Educ. Dent.*, 38(2), 106-113.

McLaren, K. (1976). XIII—The development of the CIE 1976 (L* a* b*) uniform colour space and colour-difference formula. *Journal of the Society of Dyers and Colourists*, 92(9), 338-341.

Meireles, S. S., Demarco, F. F., Santos, I. d. S. d., Dumith, S. d. C., & Bona, A. D. (2008). Validation and reliability of visual assessment with a shade guide for tooth-color classification. *Oper. Dent.*, 33(2), 121-126.

Minolta, K. (1998). Precise color communication. Color control from perception to instrumentation. Konica Minolta. Inc., Ramsey, NJ.

Morley, J. (1997). The esthetics of anterior tooth aging. *Curr. Opin. Cosmet. Dent.*, 4, 35-39.

Nanci, A. (2024). *Ten Cate's Oral Histology-E-Book: Ten Cate's Oral Histology-E-Book*: Elsevier Health Sciences.

Ngoc, V. T. N., Tran, D.-K., Dung, T. M., Anh, N. V., Nga, V. T., Anh, L. Q., . . . Chu, D. T. (2020). Perceptions of dentists and non-professionals on some dental factors affecting smile aesthetics: A study from Vietnam. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 17(5), 1638.

O'Brien, W. J. (2002). *Dental materials and their selection* (Vol. 10): Chicago: Quintessence.

Oh, W.-S., Koh, I.-W., & O'Brien, W. J. (2009). Estimation of visual shade matching errors with 2 shade guides. *Quintessence Int.*, 40(10).

Öngül, D., Şermet, B., & Balkaya, M. C. (2012). Visual and instrumental evaluation of color match ability of 2 shade guides on a ceramic system. *J. Prosthet. Dent.*, 108(1), 9-14.

Pandey, V., Sharma, M., Vikas, V., Bondekar, V., Pratik, A., & Shital, W. (2016). The use of digital imaging along with conventional shade guide for color matching and communication in restorative dentistry. *J Appl Dent Med Sci*, 2(2), 11-16.

Paolone, G., Orsini, G., Manauta, J., Devoto, W., & Putignano, A. (2014). Composite shade guides and color matching. *Int J Esthet Dent*, 9(2), 164-182.

Paravina, R. D. (2018). Understanding color. *Ronald E. Goldstein's Esthetics in Dentistry*, 270-294.

Paravina, R. D., Ghinea, R., Herrera, L. J., Bona, A. D., Igiel, C., Linninger, M., Mar Perez, M. d. (2015). Color difference thresholds in dentistry. *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry*, 27, S1-S9.

Paravina, R. D., Johnston, W. M., & Powers, J. M. (2007). New shade guide for evaluation of tooth whitening—colorimetric study. *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry*, 19(5), 276-283.

Paravina, R. D., Majkic, G., Imai, F. H., & Powers, J. M. (2007). Optimization of tooth color and shade guide design. *J. Prosthodont.*, 16(4), 269-276.

Paravina, R. D., & Powers, J. M. (2004). *Esthetic color training in dentistry*. St.Louis: Elsevier Mosby

Paravina, R. D., Powers, J. M., & Fay, R.-M. (2002). Color comparison of two shade guides. *Int. J. Prosthodont.*, 15(1).

Park, J.-H., Lee, Y.-K., & Lim, B.-S. (2006). Influence of illuminants on the color distribution of shade guides. *J. Prosthet. Dent.*, 96(6), 402-411.

Paul, S. J., Peter, A., Rodoni, L., & Pietrobon, N. (2004). Conventional visual vs spectrophotometric shade taking for porcelain-fused-to-metal crowns: a clinical comparison. *J. Prosthet. Dent.*, 92(6), 577.

Pensler, A. (1998). Shade selection: problems and solutions. *Compendium of Continuing Education in Dentistry (Jamesburg, NJ: 1995)*, 19(4), 387-390, 392.

Pitel, M. L. (2015). Optimizing Your Shade-Matching Success: Tips, Tools, and Clinical Techniques. *Dent. Today*, 34(9), 116, 118-121.

Ragain Jr, J. C. (1998). *Matching the optical properties of direct esthetic dental restorative materials to those of human enamel and dentin*: The Ohio State University.

Rashid, F., Farook, T. H., & Dudley, J. (2023). Digital shade matching in dentistry: a systematic review. *Dentistry Journal*, 11(11), 250.

Redmalm, G., Johannsen, G., & Ryden, H. (1985). Lustre changes on teeth. The use of laser light for reflexion measurements on the tooth surface--in vivo. *Swed. Dent. J.*, 9(1), 29-35.

Ruiz-López, J., Perez, M. M., Lucena, C., Pulgar, R., López-Toruno, A., Tejada-Casado, M., & Ghinea, R. (2022). Visual and instrumental coverage error of two dental shade guides: an in vivo study. *Clin. Oral Investig.*, 26(9), 5961-5968.

Russell, M., Gulfraz, M., & Moss, B. (2000). In vivo measurement of colour changes in natural teeth. *J. Oral Rehabil.*, 27(9), 786-792.

Ruyter, I., Nilner, K., & Möller, B. (1987). Color stability of dental composite resin materials for crown and bridge veneers. *Dent. Mater.*, 3(5), 246-251.

Sarafianou, A., Kamposiora, P., Papavasiliou, G., & Goula, H. (2012). Matching repeatability and interdevice agreement of 2 intraoral spectrophotometers. *J. Prosthet. Dent.*, 107(3), 178-185.

SARIKAYA, I., & GÜLER, A. U. (2009). Diş hekimliği uygulamalarında renk kavramı. *Türkiye Klinikleri Journal of Dental Sciences*, 15(2), 118-129.

Sato, R. (1999). Using a computer color matching system in color reproduction of porcelain restoration. Color reproduction of porcelain samples. *Int. J. Prosthodont.*, 1999, 6.

Schwabacher, W. B., & Goodkind, R. J. (1990). Three-dimensional color coordinates of natural teeth compared with three shade guides. *J. Prosthet. Dent.*, 64(4), 425-431.

Seghi, R., & Johnston, W. (1992). Estimate of colorimetric measurement errors associated with natural tooth fluorescence. *J. Dent. Res.*, 71, 303.

Shammas, M., & Alla, R. K. (2011). Color and shade matching in dentistry. *Trends Biomater Artif Organs*, 25(4), 172-175.

Sharma G, Wu W, Dalal EN. (2005). The CIEDE2000 color-difference formula: Implementation notes, supplementary test data, and mathematical observations. *Color Res Appl*, 30(1), 21–30.

Sharma, V., Punia, V., Khandelwal, M., Punia, S., & Lakshmana, R. (2010). A study of relationship between skin color and tooth shade value in Population of Udaipur, Rajasthan. *Int J Dent Clin*, 2(4), 26-29.

Shetty, S., Gali, S., Augustine, D., & Sv, S. (2024). Artificial intelligence systems in dental shade-matching: A systematic review. *J. Prosthodont.*, 33(6), 519-532.

Shillingburg, H. T., Hobo, S., Whitsett, L. D., Jacobi, R., & Brackett, S. E. (1997). *Fundamentals of fixed prosthodontics* (Vol. 194): Quintessence Publishing Company Chicago, IL, USA.

Shishira, R., Nayak, S. D., Suma, M., & Mishra, G. (2024). Dental shade matching using machine learning models. In *Internet of Things enabled Machine Learning for Biomedical Applications* (pp. 131-144): CRC Press.

Shofu. Inc. (2025). ShadeEye EX Dental Chroma Meter: User Guide and Product Brochure. Retrieved from <https://www.shofu.com>

Shotwell, J. L., Johnston, W. M., & Swarts, R. G. (1986). Color comparisons of denture teeth and shade guides. *J. Prosthet. Dent.*, 56(1), 31-34.

Sikri, V. K. (2010). Color: Implications in dentistry. *Journal of Conservative Dentistry and Endodontics*, 13(4), 249-255.

Simionato, A., Pecho, O. E., & Della Bona, A. (2021). Efficacy of color discrimination tests used in dentistry. *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry*, 33(6), 865-873.

Solheim, T. (1988). Dental colour as an indicator of age. *Gerodontology*, 4, 114-118.

Stephen, J. (2003). Use of a reflectance spectrophotometer in evaluating shade change resulting from tooth-whitening products. *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry*, 15, S42-S48.

Sulieman, M. (2005). An overview of tooth discoloration: extrinsic, intrinsic and internalized stains. *Dent. Update*, 32(8), 463-471.

Sulikowski, A. V., & Yoshida, A. (2003). Surface Texture: A Systematic Approach for Accurate and Effective Communication. *Quintessence of Dental Technology (QDT)*, 26.

Swift Jr, E. J., Hammel, S. A., & Lund, P. S. (1994). Colorimetric evaluation of vita shade resin composites. *Int. J. Prosthodont.*, 7(4).

Şahin, N., Kaleli, N., & Ural, Ç. (2025). Evaluation of color matching accuracy using artificial intelligence applications and a spectrophotometer: A photometric analysis. *J. Prosthet. Dent*, 134(5),1955.

Tam, W., & Lee, H. (2012). Dental shade matching using a digital camera. *J. Dent.*, 40, e3-e10.

Tejada-Casado, M., Ghinea, R., Martínez-Domingo, M. Á., Pérez, M. M., Cardona, J. C., Ruiz-López, J., & Herrera, L. J. (2022). Validation of a hyperspectral imaging system for color measurement of in-vivo dental structures. *Micromachines*, 13(11), 1929.

Terry, D. A., Snow, S. R., & McLaren, E. A. (2008). CE 1-contemporary dental photography: selection and application. *Compendium*, 29(8), 432.

Trakyalı, G. (2013). Methods used for tooth color determination. *International Arciives Of Dental Sciences*, 34(1), 1-10.

Trakyalı, G., Özdemir, F. I., & Arun, T. (2009). Enamel colour changes at debonding and after finishing procedures using five different adhesives. *The European Journal of Orthodontics*, 31(4), 397-401.

Turgut, S., & Bağış, B. (2012). Diş hekimliğinde renk ve renk ölçüm yöntemleri. *Atatürk Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi Dergisi*, 5, 65-75.

Ubassy, G. (1993). *Shape and color: the key to successful ceramic restorations*. Chicago: Quintessence Publishing.

Vallittu, P., Vallittu, A., & Lassila, V. (1996). Dental aesthetics—a survey of attitudes in different groups of patients. *J. Dent.*, 24(5), 335-338.

Van der Burgt, T., Ten Bosch, J., Borsboom, P., & Kortsmit, W. (1990). A comparison of new and conventional methods for quantification of tooth color. *J. Prosthet. Dent.*, 63(2), 155-162.

Van der Geld, P., Oosterveld, P., Van Heck, G., & Kuijpers-Jagtman, A. M. (2007). Smile attractiveness. *The Angle Orthodontist*, 77(5), 759-765.

Vanini, L. (1996). Light and color in anterior composite restorations. *Practical periodontics and aesthetic dentistry: PPAD*, 8(7), 673-682; quiz 684.

Vichi, A., Ferrari, M., & Davidson, C. L. (2000). Influence of ceramic and cement thickness on the masking of various types of opaque posts. *J. Prosthet. Dent.*, 83(4), 412-417.

Villavicencio-Espinoza, C. A., Narimatsu, M. H., & Furuse, A. Y. (2018). Using cross-polarized photography as a guide for selecting resin composite shade. *Oper. Dent.*, 43(2), 113-120.

Vivek, R., Singh, A., Soni, R., Singh, S., & Chaturvedi, T. (2013). Conventional and digitally assisted shade matching—a comparative study. *Indian Journal of Dentistry*, 4(4), 191-199.

Wee, A. G. (2006). Description of color science, color replication progress and esthetics. Contemporary fixed prosthodontics. Rosenstiel SF, Land MF, Fujimoto J. 4th ed. St. Louis: Mosby, 710-712.

Winter, R. (1993). Visualizing the natural dentition. *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry*, 5(3), 103-118.

Wulfman, C., Tezenas du Montcel, S., Jonas, P., Fattouh, J., & Rignon-Bret, C. (2010). Aesthetic demand of French seniors: a large-scale study. *Gerodontology*, 27(4), 266-271.

Yamamoto, M. (1992). The Value Conversion System and a new concept for expressing the shades of natural teeth. *Quintessence of Dental Technology (QDT)*, 15.

Yap, A. (1998). Color attributes and accuracy of Vita-based manufacturers' shade guides. *Oper. Dent.*, 23(5), 266-271.

Yoon, H. I., Bae, J. W., Park, J. M., Chun, Y. S., Kim, M. A., & Kim, M. (2018). A study on possibility of clinical application for color measurements of shade guides using an intraoral digital scanner. *J. Prosthodont.*, 27(7), 670-675.

Yuzbasioglu, E., Kurt, H., Turunc, R., & Bilir, H. (2014). Comparison of digital and conventional impression techniques: evaluation of patients' perception, treatment comfort, effectiveness and clinical outcomes. *BMC Oral Health*, 14(1), 10.

BÖLÜM 4

DİŞ BEYAZLATMA: KLİNİK YAKLAŞIMLAR VE BİYOLOJİK ETKİLER VE MODERN REMİNERALİZASYON YAKLAŞIMLARI

Ahmet Yasin İREN ¹

Giriş

Diş rengi ve gülüş estetiği, modern toplumda bireylerin sosyal algısı, özgüveni ve psikososyal iyilik hâli üzerinde güçlü bir etkiye sahiptir. Estetik beklentilerin yükseldiği günümüzde diş beyazlatma, invaziv olmayan estetik uygulamalar arasında en çok tercih edilen tedavi yöntemlerinden biri haline gelmiştir. Özellikle ergenlik ve genç erişkin dönemlerinde gülüşün kişinin özsaygısı üzerindeki etkilerini ortaya koyan çalışmalar, beyazlatmanın yalnızca kozmetik bir prosedür olmadığını, aynı zamanda bireyin kendilik algısına ve yaşam kalitesine doğrudan katkı sağladığını göstermektedir. Gavic, Budimir ve Tadin (2024), ergenler arasında gülüş estetiği ile özsaygı düzeyleri arasında anlamlı bir ilişki bulunduğunu bildirmiş; bu durum estetik temelli dental müdahalelerin psikososyal yönünü daha da önemli hale getirmiştir.

¹ Arş.Gör., Kırıkkale Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi Restoratif Diş Tedavisi Anabilim Dalı, Orcid: 0009-0006-9366-6769

Benzer şekilde Arroyo Cruz ve arkadaşları (2021), ünlü figürlerin gülüşlerinin estetik değerlendirilmesinde beyaz dişlerin çekicilik, profesyonellik ve sosyal beğeni algısını belirgin biçimde artırdığını göstermiştir.

Diş beyazlatma uygulamaları, mine ve dentin yapısına minimal müdahale edilmesi nedeniyle modern estetik diş hekimliğinde konservatif yaklaşımlar arasında ön plana çıkmaktadır. Ancak işlemin etkinliği ve güvenliği, kullanılan beyazlatma ajanlarının kimyasal yapısına, konsantrasyonuna, pH değerine, uygulama süresine ve ek biyomimetik bileşenlerin varlığına bağlı olarak değişmektedir. Hidrojen peroksit ve karbamid peroksit temelli jeller uzun yıllardır bleaching tedavilerinin temelini oluşturmakla birlikte, mine yüzeyinde oluşabilecek mineral kaybı, yüzey pürüzlülüğü, organik matriks değişimi, pulpal hassasiyet ve oksidatif stres gibi biyolojik etkiler araştırmacıların ilgisini çekmiştir. Bu doğrultuda geliştirilen yeni nesil bleaching sistemleri, yalnızca etkin renk açma sağlamayı değil, aynı zamanda mine ve dentin bütünlüğünü korumayı amaçlamaktadır. Özellikle nano boyutlu sodyum trimetafosfat (STMP), amorf kalsiyum fosfat (ACP), kazein fosfopeptid-ACP (CPP-ACP), titanyum tetraflorür (TiF₄), kalsiyum polifosfat, kalsiyum silikat ve nano-hidroksiapatit gibi ajanlarla zenginleştirilmiş formülasyonlar, etkili bir beyazlatma ile remineralizasyonun aynı anda gerçekleşmesini sağlayabilmektedir (Ortiz ve ark., 2023; Nunes ve ark., 2024; Peruchi ve ark., 2024).

Bleaching işleminin hasta memnuniyeti üzerindeki etkilerini değerlendiren çalışmalar da literatürde önemli bir yer tutmaktadır. Ludovichetti ve arkadaşları (2024), dental bleaching uygulaması sonrası hastaların estetik tatmin düzeylerinin anlamlı şekilde arttığını ve tedavi sonrası beklentilerin büyük oranda karşılandığını rapor etmiştir. Maran ve ark. (2024) tarafından yürütülen geniş ölçekli multistudy analizinde ise bleaching tedavisinin yalnızca

estetik sonuçları değil, aynı zamanda bireyin sosyal özgüveni ve yaşam kalitesi skorlarını da anlamlı ölçüde iyileştirdiği gösterilmiştir.

Bu kitap bölümünde diş renginin optik temellerinden başlayarak beyazlatma ajanlarının kimyası, klinik protokoller, in-office ve at-home bleaching teknikleri, biyolojik etkiler, mine ve dentin dokusundaki değişiklikler, hassasiyet mekanizması, pulpal diffüzyon, yeni nesil remineralizasyon stratejileri ve tüm bu süreçlerin kanıta dayalı değerlendirmeleri detaylı şekilde ele alınacaktır. Güncel randomize kontrollü klinik çalışmalar (RCT), sistematik derlemeler, meta-analizler ve ileri laboratuvar teknikleri ile yürütülen çalışmalar doğrultusunda bleaching tedavilerinin etkinliğini artırmayı, biyolojik riskleri azaltmayı ve uzun dönem klinik başarıyı desteklemeyi amaçlayan modern yaklaşımlar kapsamlı bir bakış açısıyla sunulacaktır.

Diş Renginin Bilimsel Temelleri ve Optik Özellikleri

Diş renginin oluşumu, mine, dentin ve pulpa dokularının optik özelliklerinin bir araya gelmesiyle ortaya çıkan karmaşık bir fenomendir. Dişin doğal rengi; ışığın yüzeyde yansımaları, dokuda saçılması, dentin pigmentleri tarafından absorbe edilmesi, mine yapısındaki yarı saydamlık ve dentin kaynaklı içsel renklerin bileşkesi olarak belirir. Mine büyük oranda inorganik içerikli ve yarı saydam olduğundan dişin temel rengini belirleyen yapı dentindir. Dentin tübüllerinin yoğunluğu, renklendirici organik moleküllerin varlığı, dentin kalınlığı ve sklerotik değişiklikler dişin sarı veya gri tonlarında görünmesine neden olabilir. Bu nedenle yaş ilerledikçe dentin kalınlığının artması ve dentin sklerozunun gelişmesi dişlerde daha koyu bir görünüm oluşturur.

Joiner ve Luo (2017), dişin optik özelliklerini tanımlamak için özellikle ışık saçılımı (scattering) ve ışık absorpsiyonunun

dikkate alınması gerektiğini belirtmiş; mine yüzeyinin pürüzlülüğü ve porozitesinin dışsal pigment tutulumunda önemli rol oynadığını vurgulamıştır. Dışsal pigmentler genellikle çay, kahve, kırmızı şarap ve tütün ürünleri gibi polifenol ve tanin içeren maddelerden kaynaklanır. Bu moleküller mine yüzeyindeki organik matrikse veya prizmalar arası mikroboşluklara bağlanarak renklenmeye neden olur. İçsel renklemeler ise pulpal hemorajiler, dentin pigment artışı, tetrasiklin lekeleri, florozis veya gelişimsel anomaliler gibi daha derin yapılardan kaynaklanan pigmentasyon bozukluklarını içerir.

Renk ölçümünde kullanılan sistemler arasında görsel yöntemler halen yaygın olmakla birlikte operatöre bağlı değişkenlik gösterir. Spektrofotometre ve kolorimetre gibi cihazlar ise daha objektif ve tekrarlanabilir sonuçlar sunar. CIELab sistemi günümüzde bleaching çalışmalarında en sık kullanılan ölçüm yöntemidir ve renk değişimi ΔE^* formülüyle hesaplanır. WID (Whiteness Index for Dentistry) ise beyazlık algısını daha doğru yansıttığı için son yıllarda klinik ve laboratuvar çalışmalarında giderek daha fazla tercih edilmektedir.

Beyazlatma Ajanlarının Kimyası ve Etki Mekanizması

Diş beyazlatma ajanları temel olarak hidrojen peroksit (HP) ve karbamid peroksit (CP) esaslıdır. HP güçlü bir oksidan olup diş yapısına hızla penetre olur ve organik pigment moleküllerini okside ederek daha küçük, renksiz bileşiklere dönüştürür. HP'nin ağız ortamında ayrışması sonucunda hidroksil radikalleri ($HO\bullet$), perhidroksil radikalleri ($HOO\bullet$) ve oksijen iyonları ortaya çıkar. Bu reaktif oksijen türleri, pigment moleküllerindeki çift bağları kırar, aromatik halkaları parçalar ve renksiz moleküller oluşturur.

Karbamid peroksit ise ağızda çözündüğünde HP ve üreye ayrışır. Üre, pH'ı hafifçe yükselterek HP'nin stabilitesine katkıda bulunur ve daha kontrollü bir oksidasyon sağlar. Bu nedenle CP

esaslı jeller genellikle daha düşük konsantrasyonlu ev tipi beyazlatma uygulamalarında tercih edilir.

Bleaching jellerinin pH değeri, etkinlik ve biyouyumluluk açısından kritik bir parametredir. Asidik pH, HP'nin daha hızlı ayrışmasını sağlar ancak mine demineralizasyon riskini artırır. Nötre yakın pH değerleri ise hem daha güvenli hem de daha kontrollü bir radikal üretimi sunar. Modern jellerde Ca, F, STMP veya CPP-ACP gibi bileşenlerin eklenmesiyle pH tamponlanmakta ve mine koruyucu etki oluşturulmaktadır (Ortiz ve ark., 2024; Peruchi ve ark., 2024).

Yeni nesil beyazlatma ürünlerinde mineral kaybını önlemeyi ve doku bütünlüğünü korumayı amaçlayan biyomimetik ajanlar yaygın biçimde kullanılmaktadır. Nano-STMP, mine yüzeyine bağlanarak kalsiyum iyonlarının stabilizasyonunu sağlar ve mineral kaybını azaltır (Nunes ve ark., 2024). Kalsiyum polifosfat içeren jeller, enzimatik mineralizasyon yoluyla mine yüzeyinde yeni kalsiyum-fosfat kristallerinin oluşmasına yardımcı olur (Ortiz ve ark., 2023). CPP-ACP ile zenginleştirilmiş jeller ise hem pulpaya HP difüzyonunu azaltmakta hem de sertlik kaybını minimize etmektedir (Barbosa ve ark., 2020). Nano-hidroksiapatit ve TiF_4 gibi materyaller de mine yüzeyinde koruyucu tabakalar oluşturularak oksidatif hasara karşı direnç oluşturmaktadır (Khoroushi ve ark., 2016; Peruchi ve ark., 2024).

Beyazlatma Teknikleri

Diş beyazlatma uygulamaları klinik ortamdaki profesyonel prosedürlerden ev tipi uzun süreli tedavilere kadar geniş bir yelpazede gerçekleştirilebilir. Bu teknikler, kullanılan ajanların konsantrasyonu, uygulama süresi, aktivasyon şekli ve hasta adayının klinik durumuna göre farklılık göstermektedir. In-office bleaching genellikle yüksek konsantrasyonlu hidrojen peroksit içerirken, at-home uygulamalar daha düşük konsantrasyonlu karbamid peroksit

veya hidrojen peroksit formlarını kullanır. Kullanılan yöntemin seçimi, hedeflenen estetik sonuca ulaşma süresi, hastanın hassasiyet öyküsü, mine-dentin bütünlüğü, yaş, yaşam tarzı ve tedavi beklentileri gibi faktörlere bağlıdır.

In-office bleaching, profesyonel kontrol altında gerçekleştirilen ve hızlı sonuç alınmasını sağlayan bir uygulamadır. Bu yöntemde genellikle %30 ile %40 arasında değişen yüksek konsantrasyonlu hidrojen peroksit içeren jeller kullanılır. Klinik uygulama sırasında beyazlatma jeli diş yüzeyine dikkatlice uygulanır ve belirli sürelerle yenilenir. Da Silva ve arkadaşları (2024), 37% karbamid peroksit ile 35% hidrojen peroksitin etkinliğini karşılaştırdıkları randomize kontrollü çalışmada her iki ajanla da klinik olarak anlamlı renk açma elde edildiğini, ancak karbamid peroksit grubunda hassasiyet oranlarının daha düşük olduğunu bildirmiştir. In-office teknikler, kısa sürede dramatik renk değişimi isteyen hastalar için idealdir. Bununla birlikte uygulamanın yüksek konsantrasyonlu olması nedeniyle pulpaya diffüzyon, post-operatif hassasiyet ve mine yüzeyinde geçici değişiklikler gibi biyolojik etkilerin göz önünde bulundurulması gerekmektedir.

Centenaro ve ark. (2024), yüksek konsantrasyonlu in-office jellerin fırça uçlu dağıtım sistemleriyle uygulanmasının daha homojen yüzey kaplaması sağladığını ve pulpaya geçen hidrojen peroksit miktarını azalttığını göstermiştir. Bu bulgu, modern in-office sistemlerde kullanılan dağıtım teknolojilerinin biyolojik güvenliği artırmada önemli bir rol oynayabileceğini göstermektedir. Bununla birlikte ışık aktivasyonunun (LED veya lazer) beyazlatma etkinliğini artırıp artırmadığı halen tartışma konusudur. Işık kaynaklarının jelin sıcaklığını artırarak peroksit ayrışmasını hızlandırdığı, ancak aynı zamanda hassasiyeti artırabileceği yönünde bulgular mevcuttur. Pontes ve ark. (2020), ışık aktivasyonunun etkinliğe katkısının sınırlı olduğunu belirtmiş; bu nedenle modern yaklaşım ışık kaynağının zorunlu olmadığı yönündedir.

At-home bleaching ise daha düşük konsantrasyonlu ajanlarla uzun süreli ve kontrollü bir beyazlatma sağlar. Bu yöntemde %10–16 karbamid peroksit veya %4–10 hidrojen peroksit sıklıkla tercih edilir. Chemin ve arkadaşları (2018), 4% ve 10% hidrojen peroksit içeren ev tipi jellerle yapılan randomize çalışmada her iki konsantrasyonun da etkili olduğunu, ancak hassasiyet düzeylerinin düşük konsantrasyonlu ajanlarda belirgin biçimde azaldığını rapor etmiştir. Cordeiro ve ark. (2024) ise %10'dan daha düşük karbamid peroksit konsantrasyonlarının bile klinik olarak anlamlı renk açma sağlayabildiğini ve pulpaya diffüzyon seviyelerinin minimal olduğunu göstermiştir. Bu nedenle at-home bleaching özellikle genç bireylerde, dentin hassasiyeti olan hastalarda ve in-office uygulamalara karşı daha biyouyumlu bir alternatif arayan kişilerde güvenli bir seçenektir.

Kombine bleaching protokolleri, hem hızlı bir başlangıç elde etmek hem de beyazlatma sonucunu stabilize etmek amacıyla in-office ve at-home tekniklerinin bir arada uygulanmasıdır. Bu yöntemde klinikte yüksek konsantrasyonlu bir ajan ile beyazlatma başlatılır, ardından ev tipi düşük konsantrasyonlu jeller ile tedavi sürdürülür. Maran ve ark. (2024), kombine protokollerin estetik memnuniyet oranlarını artırdığını ve renk stabilitesinin tek yöntem kullanımına göre daha uzun süre korunduğunu bildirmiştir. Kombine yaklaşım özellikle yüksek estetik beklentisi olan hastalarda avantaj sağlar; çünkü hızlı başlangıç ile uzun süreli bir pekiştirme süreci entegre edilmiştir.

Adolesanlarda bleaching konusu ise ayrı bir klinik hassasiyet gerektirir. Gonçalves ve ark. (2017) ve Pinto ve ark. (2017), adolesan bireylerde yapılan klinik araştırmalarda bleaching işleminin güvenli olduğunu, ancak yaştan kaynaklanan anatomik faktörler nedeniyle pulpaya diffüzyonun yetişkinlere göre daha fazla olabileceğini belirtmiştir. Bu nedenle çocuk ve gençlerde düşük konsantrasyon, kısa uygulama süreleri ve tekrarlı düşük doz protokolleri tercih

edilmelidir. Aynı şekilde, genç bireylerde daha ince mine tabakası nedeniyle hassasiyet ortaya çıkma olasılığı yüksektir; bu nedenle remineralizan ajanlarla desteklenmiş jellerin kullanımı önerilir.

Bleaching protokollerinin etkinliği yalnızca uygulama süresiyle değil, aynı zamanda kullanılan jelin pH değeri, taşıyıcı matrisi ve ek biyomimetik içerikleriyle de ilişkilidir. Da Silva KL ve ark. (2023), yüksek konsantrasyonlu in-office jellerin tek uygulamada yeterli renk açma sağlayıp sağlayamayacağını incelemiş ve formülasyondaki stabilizatörler ile pH değerinin tek seans başarısını belirlediğini göstermiştir. Bu çalışma yüksek konsantrasyonlu jellerin bir kısmının tek uygulamada etkili olduğunu, ancak büyük çoğunluğun optimum sonuç için en az iki uygulamaya ihtiyaç duyduğunu ortaya koymuştur.

Bleaching uygulamalarının klinik etkinliğini değerlendiren renk analizi çalışmaları bleaching'in ΔE değerlerini genellikle 3.3'ün üzerinde artırabildiğini göstermektedir. ΔE değerinin 3.3 üzerinde olması klinik olarak algılanabilir bir renk değişimi anlamına gelir. Pontes ve ark. (2020), farklı konsantrasyonlardaki hidrojen peroksit ajanlarını karşılaştırdıkları meta-analizde etkinliğin konsantrasyonla birlikte arttığını, ancak hassasiyet riskinin de paralel olarak yükseldiğini bildirmiştir. Bu nedenle modern klinik uygulamalarda etkin renk açma ile biyolojik güvenlik arasında bir denge kurulması gerektiği kabul edilmektedir.

Maran ve ark. (2024), beyazlatmanın estetik memnuniyeti ve sosyal özgüveni artırmadaki rolünü değerlendirmiş ve bleaching tedavisi gören bireylerde yaşam kalitesi skorlarının anlamlı biçimde yükseldiğini göstermiştir. Ludovichetti ve ark. (2024) da benzer biçimde bleaching işleminin hasta memnuniyetini artırdığını, özellikle doğal görünen bir beyazlık elde eden bireylerde sosyal iletişim ve özgüvende artış olduğunu belirtmiştir. Bu bulgular bleaching'in yalnızca kozmetik bir işlem olmadığını, aynı zamanda bireyin psikososyal sağlığı üzerinde etkili olduğunu göstermektedir.

Bleaching sırasında pulpaya hidrojen peroksit diffüzyonu ve ortaya çıkan hassasiyet mekanizmaları da literatürde geniş biçimde incelenmiştir. Mena-Serrano ve arkadaşlarının (2015) yaptığı çalışmada, yüksek konsantrasyonlu HP jellerinin pulpaya geçiş miktarının düşük konsantrasyonlu ajanlara kıyasla daha fazla olduğu, ayrıca pH değeri düşük jellerde diffüzyonun arttığı gösterilmiştir. Acuña ve ark. (2022) ise jelin pH değerinin diffüzyon ve hassasiyet üzerinde belirleyici olduğunu, nötr veya hafif alkali pH'lı jellerin pulpaya geçişi azaltarak hassasiyeti hafiflettiğini belirtmiştir.

Bu noktada CPP-ACP, STMP ve kalsiyum polifosfat gibi biyomimetik ajanların rolü önemli hâle gelmektedir. Barbosa ve ark. (2020), CPP-ACP ile zenginleştirilmiş jellerin pulpaya HP diffüzyonunu anlamlı ölçüde azalttığını ve hassasiyeti düşürdüğünü bildirmiştir. Nano-STMP'nin mine yüzeyinde kalsiyum bağlanmasını artırdığı ve mineral kaybını önlediği Nunes ve ark. (2024) tarafından gösterilmiştir. Kalsiyum polifosfat içeren jellerin ise enzimatik mineralizasyonu aktive ederek mine yüzeyini onardığı Ortiz ve ark. (2023) tarafından bildirilmiştir. Bu ajanların klinik uygulamalarda giderek daha fazla tercih edilmesi, bleaching tedavilerinin doğal dokulara zarar vermeden gerçekleştirilmesini mümkün kılmaktadır.

Pulpal Difüzyon ve Dentin – Pulpa Kompleksinde Biyolojik Yanıt

Diş beyazlatma ajanlarının küçük moleküler yapıları nedeniyle hidrojen peroksit (HP) dentin tübüllerinden pulpaya diffüze olabilir ve bu süreç, uygulanan jelin konsantrasyonu, pH değeri, viskozitesi ve uygulama süresi gibi faktörlere bağlı olarak değişiklik gösterir. Mena-Serrano ve ark. (2015), yüksek konsantrasyonlu ve düşük pH'lı HP jellerinin pulpaya geçen peroksit miktarını belirgin şekilde artırdığını bildirmiştir. Genç bireylerde

dentin tübüllerinin daha geniş olması nedeniyle HP diffüzyonu daha fazladır; bu nedenle adolesanlarda daha düşük konsantrasyonların tercih edilmesi önerilmektedir (Gonçalves ve ark., 2017; Pinto ve ark., 2017).

HP pulpaya ulaştığında hücrelerde reaktif oksijen türlerinin (ROS) artışıyla sonuçlanan bir oksidatif stres yanıtı meydana gelir. Acuña ve ark. (2022), düşük pH'lı 40% HP jellerinin daha yüksek ROS üretimine yol açtığını ve bunun geçici inflamatuvar bir pulpal yanıt oluşturduğunu göstermiştir. Bu süreçte IL-1 β , IL-6 ve TNF- α gibi proinflamatuvar sitokinlerin ekspresyonu artabilir; ancak çoğu durumda biyolojik stres geri dönüşümlüdür ve pulpa dokusu kısa sürede homeostatik dengeye geri döner.

Modern bleaching protokollerinde bu biyolojik etkiyi azaltmak için remineralizan ve tamponlayıcı ajanların kullanımı önem kazanmıştır. CPP-ACP, STMP, kalsiyum, florür veya TiF₄ içeren formülasyonlar pulpaya HP geçişini azaltabilmekte ve hassasiyet riskini düşürebilmektedir (Barbosa ve ark., 2020; Peruchi ve ark., 2024). Bu ajanların mine yüzeyinde oluşturduğu mineral bariyer hem diffüzyonu sınırlamakta hem de doku reaksiyonunu azaltmaktadır.

Ayrıca ışık aktivasyonunun pulpada termal stres oluşturabileceği ve bleaching etkinliğine katkısının sınırlı olduğu bildirilmiştir (Pontes ve ark., 2020). Bu nedenle hassasiyeti yüksek bireylerde ışık aktivasyonlu protokoller dikkatle değerlendirilmelidir. Chemin ve ark. (2018), düşük konsantrasyonlu ev tipi HP uygulamalarında pulpaya geçen peroksit miktarının minimal olduğunu ve hassasiyet oranlarının daha düşük seyrettiğini vurgulamıştır.

Genel olarak bakıldığında, bleaching sırasında pulpaya geçen HP, sınırlı oksidatif stres oluşturabilse de modern içerikler ve kontrollü uygulama protokolleri sayesinde bu biyolojik yanıt klinik

açıdan yönetilebilir düzeydedir. Güvenli bleaching için kişiye özel konsantrasyon seçimi, remineralizan destek ve aşırı oksidatif/termal yük oluşturacak uygulamalardan kaçınma prensipleri temel yaklaşım olarak öne çıkmaktadır.

Beyazlatma Sonrası Hassasiyet ve Biyolojik Yönetim

Bleaching işlemi sonrasında görülen dentin hassasiyeti, klinik pratiğin en sık bildirilen yan etkilerinden biridir ve literatürde %30 ile %80 arasında değişen oranlarda görülmektedir. Bu hassasiyet genellikle geçici olmakla birlikte hastaların konforunu önemli ölçüde etkileyebilir. Beyazlatma sonrası hassasiyetin temel nedeni hidrojen peroksitin pulpaya diffüzyonu ve burada oksidatif stres ile nosiseptör aktivasyonuna yol açmasıdır. Hidrojen peroksit ve türevleri diş dokusundan kolaylıkla geçebilen küçük moleküllerdir; özellikle yüksek konsantrasyonlu jellerde, düşük pH değerlerinde ve uzun temas sürelerinde pulpaya geçiş miktarı belirgin şekilde artmaktadır (Mena-Serrano ve ark., 2015).

Hassasiyet gelişiminde ikinci önemli mekanizma dentin tübüllerinde sıvı hareketinin artmasıdır. Bleaching ajanlarının mine yüzeyinde oluşturduğu geçici porozite, tübül ağzlarının açılmasına ve dentin duyarlılığının artmasına neden olur. Bu etki de yine özellikle yüksek konsantrasyonlu hidrojen peroksit içeren in-office uygulamalarda belirgindir. Acuña ve ark. (2022), farklı pH değerlerine sahip 40% HP jellerini değerlendirdikleri çalışmada, pH'ın düşüklüğü ile pulpaya diffüzyonun ve hassasiyetin anlamlı ölçüde arttığını belirtmiştir. Bu nedenle modern bleaching ürünlerinde pH stabilitesini sağlayan tamponlayıcı sistemlerin kullanılması biyolojik güvenlik açısından kritik kabul edilmektedir.

Bleaching sonrası hassasiyetin yönetiminde desensitize edici ajanların kullanımı önemli bir tedavi yaklaşımıdır. Klasik yöntemler arasında potasyum nitrat, florür jelleri ve arginin esaslı ajanlar yer alsa da son yıllarda kalsiyum içeren biyomimetik materyaller ön

plana çıkmıştır. CPP-ACP, ACP, nano-hidroksiapatit, TiF_4 primerleri ve STMP içeren jeller hem hassasiyeti azaltmakta hem de mine yüzeyinde oluşan geçici porozitenin remineralizasyonuna katkı sağlamaktadır. Barbosa ve ark. (2020), CPP-ACP ile modifiye edilmiş bleaching jellerinin pulpaya HP geçişini kayda değer biçimde azalttığını; böylece hassasiyeti hafiflettiğini göstermiştir. Aynı şekilde Peruchi ve ark. (2024), TiF_4 yüklenmiş polimerik primer uygulanmış yüzeylerde 35% HP sonrasında doku hasarının azaldığını ve hassasiyet oluşumunun sınırlı kaldığını rapor etmiştir. Bu sonuçlar, modern bleaching protokollerinde remineralizan içerikli destek materyallerinin önemini artırmaktadır.

Bleaching sonrası hassasiyeti azaltmada yeni farmakolojik yaklaşımlar da bulunmaktadır. Xavier ve ark. (2024), pregabalin içeren deneysel jellerin 35% HP uygulaması sonrasında mine ve dentin dokusunda oluşan inflamatuvar yanıtı azalttığını ve hassasiyeti baskıladığını göstermiştir. Pregabalin, nöropatik ağrı mekanizmalarında kalsiyum kanal modülasyonu yoluyla etki gösterdiğinden beyazlatma sonrası kısa süreli hipersensitivitede etkili bir ajan olarak değerlendirilmektedir.

Düşük konsantrasyonlu ev tipi bleaching uygulamalarında hassasiyet oranlarının daha düşük olduğu birçok çalışmada doğrulanmıştır. Chemin ve ark. (2018), ev tipi 4% ve 10% hidrojen peroksit jellerinin klinik etkinliğini değerlendirirken hassasiyet şikayetlerinin minimal düzeyde olduğunu bildirmiştir. Bu bulgu özellikle diş eti çekilmesi, açığa çıkmış dentin yüzeyleri veya geçmişte yüksek hassasiyet öyküsü olan hastalarda düşük konsantrasyonlu bleaching protokollerinin tercih edilmesi gerektiğini göstermektedir. Cordeiro ve ark. (2024) da benzer şekilde düşük konsantrasyonlu karbamid peroksit jellerinin pulpaya diffüzyon miktarının çok daha düşük olduğunu ve hassasiyet riskini azalttığını vurgulamıştır.

Hassasiyet gelişme riskini artıran bireysel faktörler arasında genç yaş, ince mine tabakası, geniş dentin tübülleri, diş eti çekilmesi, aşınma veya erozyon bulunur. Bu nedenle bleaching öncesi kapsamlı bir klinik değerlendirme yapılmalı ve risk faktörlerine göre kişiye özel protokoller belirlenmelidir. Özellikle adolesan bireylerde dentin tübüllerinin daha geniş olması ve mine-dentin oranının farklılığı nedeniyle hassasiyet riskinin arttığı bildirilmiştir (Gonçalves ve ark., 2017; Pinto ve ark., 2017). Bu nedenle genç bireylerde düşük konsantrasyonlu ajanlarla kontrollü ve kademeli bir bleaching protokolü önerilir.

Sonuç olarak bleaching sonrası hassasiyet hem biyolojik hem de kimyasal faktörlerin etkileşimi sonucu ortaya çıkan kompleks bir süreçtir. Bu yan etkinin yönetimi, modern biyomimetik remineralizan ajanlar, pH tamponlayıcı sistemler, düşük konsantrasyonlu jeller, kısa temas süreleri ve farmakolojik desteklerle büyük ölçüde kontrol altına alınabilmektedir. Hem araştırmalar hem de klinik deneyimler göstermektedir ki bleaching uygulamalarında en iyi sonuç, etkinlik ve biyogüvenlik arasındaki dengeyi kuran kişiye özel protokollerle elde edilir.

Mine Ve Dentin Üzerindeki Etkiler: Fiziksel, Kimyasal ve Morfolojik Değişimler

Diş beyazlatma ajanlarının mine ve dentin üzerindeki etkileri, uzun süredir hem klinik hem laboratuvar çalışmaların odağında yer almaktadır. Hidrojen peroksit ve karbamid peroksit temelli jeller, pigment moleküllerini okside ederek etkili bir beyazlatma sağlarken, aynı zamanda diş sert dokularıyla kimyasal etkileşime girerek geçici veya kalıcı değişikliklere yol açabilmektedir. Bu değişiklikler; mineral kaybı, yüzey pürüzlülüğünde artış, mikrosertlik azalması, yüzey morfolojisinde bozulma, organik matriks modifikasyonu ve dentin-peroksit diffüzyonu gibi çok boyutlu süreçleri içerir. Etkinin şiddeti

kullanılan jelin konsantrasyonu, pH değeri, uygulama süresi ve jel içeriğindeki koruyucu ajanların varlığıyla doğrudan ilişkilidir.

Mine yüzeyindeki fiziksel değişiklikler bleaching işlemlerinin en çok araştırılan alanlarından biridir. Yüksek konsantrasyonlu HP jelleriyle yapılan çalışmalarda mine mikrosertliğinde belirgin azalmalar rapor edilmiştir. Moura ve ark. (2019), 10% karbamid peroksit içeren jellere kalsiyum veya amorf kalsiyum fosfat (ACP) eklenmesinin mikrosertlik kaybını önemli ölçüde azalttığını göstererek remineralizan ajanların mine koruyucu etkisini vurgulamıştır. Benzer şekilde Elfallah ve Bertassoni (2015), HP'nin mine organik matriksindeki protein yapılarını okside ederek mine mekanik dayanımını zayıflattığını bildirmiştir. Bu çalışma, sadece mineral kaybının değil, aynı zamanda organik bileşenin de beyazlatma sırasında hasara uğrayabileceğini göstermesi bakımından literatürde dikkat çekicidir.

Bleaching sonrası mine yapısındaki değişiklikleri değerlendirmek için mikro-CT, SEM (taramalı elektron mikroskobu) ve EDS (enerji dispersif spektroskopi) gibi ileri analiz yöntemleri sıklıkla kullanılmıştır. De Mendonça ve ark. (2024), farklı konsantrasyonlardaki HP jellerinin mine yüzeyindeki kalsiyum ve fosfat iyon kaybını incelemiş ve yüksek konsantrasyonlu jellerin daha fazla mineral ekstraksiyonuna yol açtığını, buna bağlı olarak mine yüzeyinde porozite ve yüzey düzensizliklerinin arttığını bildirmiştir. Garcia ve ark. (2024) ise HP'ye nano boyutlu sodyum trimetafosfat (STMP) eklenmesinin mine yüzeyindeki mineral kaybını belirgin biçimde azalttığını, STMP'nin Ca-P bağlarını stabilize ederek remineralizasyonu desteklediğini ortaya koymuştur.

Mine morfolojisindeki değişiklikler bleaching işlemlerinin en tutarlı bulgularından biridir. Birçok SEM çalışması, yüksek konsantrasyonlu HP uygulamaları sonrasında mine prizma sınırlarının belirginleştiğini, yüzeyin daha düzensiz hâle geldiğini, porozitenin arttığını ve bazen erozyona benzer yüzey bozulmaları

oluşturduğunu göstermiştir (Cavalli ve ark., 2018; Vieira ve ark., 2020). Torres ve arkadaşları (2019), HP jeline kalsiyum veya florür eklenmesinin bu morfolojik değişiklikleri azalttığını ve mine yüzeyinde daha homojen bir yapı bıraktığını bildirmiştir. Limas ve ark. (2020) ise bleaching sonrası farklı bölgelerde mine yüzey pürüzlülüğünün belirgin şekilde arttığını ve bunun özellikle HP'nin daha yoğun etki ettiği yüzey alanlarında daha belirgin olduğunu göstermiştir.

Dentin ve mine arasındaki farklar da bleaching etkilerini anlamak için kritik öneme sahiptir. Dentin daha yüksek organik içeriğe sahip olduğundan, bleaching ajanlarının dentin üzerindeki etkisi daha yoğun oksidatif stres ve kollajen yapılarında değişikliklerle ilişkilidir. Berger ve ark. (2012), whitening ajanlarının demineralize dentinin elastik modülünü azalttığını ve dentin matriksinin mekanik dayanımını olumsuz etkilediğini bildirmiştir. Sa ve ark. (2013) ise farklı pH değerlerine sahip HP jellerinin dentin mikrostrüktürü üzerinde farklı etkiler yarattığını; daha asidik pH'lı jellerin dentin tübüllerinde daha fazla genişlemeye ve organik bileşen kaybına neden olduğunu belirtmiştir.

Beyazlatma ajanlarının pulpaya kadar difüze olabilmesi mine ve dentin bütünlüğünün geçici olarak zayıfladığına işaret eder. Mena-Serrano ve ark. (2015), yüksek konsantrasyonlu HP'nin dentin tübülleri aracılığıyla pulpaya geçişini inceledikleri çalışmada, jelin konsantrasyonu ve uygulama süresi arttıkça pulpaya geçen peroksit miktarının da arttığını göstermiştir. Bu durum bu ajanların yalnızca mine ve dentin yüzeyinde değil, daha derin dokularda da biyolojik değişikliklere yol açabileceğini ortaya koymaktadır.

Remineralizan ajanların mine ve dentin üzerindeki beyazlatma sonrası olumlu etkileri çok sayıda çalışmayla belgelenmiştir. Nano-boyutlu STMP içeren jellerin mine yüzeyinde daha yüksek Ca/P oranı sağladığı Gruba ve ark. (2023) tarafından gösterilmiş; bu ajanların hem renk açma etkinliğini koruduğu hem

de mine yüzeyini HP'nin zararlı etkilerinden koruduğu belirtilmiştir. Aynı şekilde Júnior ve ark. (2022), trimetafosfat ve florür içeren bleaching ajanlarının mine mikrosertliğini artırdığını ve dentin difüzyonunu azalttığını bildirmiştir. Bu bulgular, modern bleaching yaklaşımlarında koruyucu biyomimetik formülasyonların neden giderek daha fazla tercih edildiğini anlamak açısından önemlidir.

Florür içeren jellerin bleaching sonrası mine stabilitesi üzerindeki olumlu etkileri de geniş biçimde araştırılmıştır. Giannini ve ark. (2006), florür veya kalsiyum içeren karbamid peroksit jellerinin mine çekme dayanımını artırdığını ve mine yüzeyinin oksidatif hasara karşı daha dirençli hâle geldiğini belirtmiştir. Cavalli ve ark. (2010), düşük konsantrasyonlu CP ajanlarına florür veya kalsiyum eklenmesinin mine yüzeyinin subsurface (alt yüzey) mineralizasyonunu koruduğunu göstermiştir. Bu nedenle güncel klinik protokoller, florür içeren bleaching sonrası bakım ürünlerini veya florür modifiye jelleri sıklıkla önermektedir.

Nano-hidroksiapatit içeren ürünler de mine yüzeyinde mikrostrüktürel onarıma katkı sağlamaktadır. Khoroushi ve arkadaşlarının (2015, 2016) çalışmalarında nano-hidroksiapatit, nano- β -TCP ve diğer kalsiyum fosfat türevlerinin bleaching sonrası mine yüzey pürüzlülüğünü azalttığı, mikrosertliği artırdığı ve HP kaynaklı yüzey bozulmalarını onardığı gösterilmiştir.

Elde edilen tüm bu bulgular değerlendirildiğinde, bleaching işlemlerinin mine ve dentin üzerinde oluşturduğu etkilerin büyük oranda reversible olduğu ve modern remineralizan sistemlerle etkin biçimde yönetilebildiği anlaşılmaktadır. Kritik olan bleaching uygulamasının kontrollü, kişiye özel ve biyolojik güvenliği ön planda tutan protokollerle gerçekleştirilmesidir. Yüksek konsantrasyonlu jellerin kısa sürede dramatik etkiler göstermesi, biyolojik risklerin de arttığı anlamına gelirken, düşük konsantrasyonlu ve remineralizan ajanlarla desteklenmiş protokoller diş sert dokularının korunmasını sağlamaktadır.

Remineralizasyon Stratejileri ve Modern Biyomimetik Yaklaşımlar

Diş beyazlatma işlemleri sırasında hidrojen peroksitin mine ve dentin üzerinde oluşturduğu geçici mineral kaybı, yüzey pürüzlülüğü ve organik matriks değişiklikleri, modern diş hekimliğinde remineralizan ajanlara olan ihtiyacı artırmıştır. Güncel klinik ve laboratuvar çalışmaları, bleaching sonrası ortaya çıkan bu etkilerin büyük ölçüde geri dönüşümlü olduğunu ve uygun remineralizasyon stratejileri ile mine-dentin bütünlüğünün yeniden sağlanabileceğini göstermektedir. Son yıllarda özellikle biyomimetik temelli ajanlar ön plana çıkmış; diş dokularının doğal mineralizasyon süreçlerini taklit eden nano boyutlu kalsiyum fosfatlar, peptit türevleri, polifosfat sistemleri ve florür modifiye materyaller bleaching sonrası doku stabilizasyonunda önemli bir rol oynamıştır.

Bleaching sonrası remineralizasyonun temel hedefi mine yüzeyindeki geçici poroziteleri kapatmak, mineral kaybını telafi etmek ve yüzey pürüzlülüğünü azaltmaktır. Farooq ve Bugshan (2020), remineralizasyonun tükürük bileşenleri, kalsiyum-fosfat iyonları ve protein yapıların etkileşimiyle doğal olarak gerçekleştiğini; ancak bleaching işlemleri sırasında bu dengenin geçici olarak bozulduğunu vurgulamıştır. Bu nedenle klinik uygulamada doğal remineralizasyonu hızlandıran ve destekleyen ajanların kullanılması önem taşımaktadır.

Bu amaçla geliştirilen CPP-ACP (kazein fosfopeptid–amorf kalsiyum fosfat) sistemleri bleaching sonrası en fazla araştırılan materyaller arasındadır. CPP-ACP, kalsiyum ve fosfat iyonlarını stabilize ederek mine üzerine tutunmalarını sağlar ve mineralizasyon için lokal bir rezerv oluşturur. Júnior ve ark. (2021), florür, kalsiyum veya trimetafosfat içeren bleaching jelleriyle birlikte günlük florürlü diş macunu kullanımının mine mikrosertliğini belirgin şekilde artırdığını göstermiştir. Barbosa ve ark. (2020) ise CPP-ACP

modifiye bleaching jellerinin pulpaya HP diffüzyonunu azalttığını, mine alt yüzey mineralizasyonunu artırdığını ve hassasiyeti azalttığını bildirmiştir. Bu bulgular CPP-ACP'nin yalnızca remineralizasyonu desteklemediğini, aynı zamanda bleaching uygulamalarının biyogüvenliğini artırdığını göstermektedir.

Bir diğer etkili remineralizan sistem nano-hidroksiapatit (nHA) türevleridir. nHA, diş minesinde doğal olarak bulunan apatitin nano boyutlu sentetik bir analogudur ve mineral kaybı sonrası oluşan mikroboşlukları doldurarak yüzey pürüzlülüğünü azaltır. Khoroushi ve arkadaşlarının (2015, 2016) çalışmaları, nano-hidroksiapatit içeren materyallerin bleaching sonrası yüzey morfolojisini düzelttiğini, mikrosertliği artırdığını ve oksidatif hasarın etkilerini anlamlı biçimde sınırladığını göstermiştir. Bu biyomimetik yaklaşım, doğal mine yapısının kimyasal ve kristalografik özelliklerini taklit ederek bleaching sonrası doku rejenerasyonuna katkı sağlar.

Bleaching jellerine eklenen nano boyutlu sodyum trimetafosfat (STMP) son yıllarda dikkat çeken bir diğer remineralizan ajandır. STMP, kalsiyum iyonlarını stabilize eden ve mine yüzeyine tutunmasını kolaylaştıran bir polifosfat grubudur. Gruba ve ark. (2023), STMP içeren jellerin mine yüzeyindeki Ca/P oranını artırdığını ve yüksek konsantrasyonlu HP'nin neden olduğu mineral kaybını önemli ölçüde azalttığını göstermiştir. Nunes ve ark. (2024) ise bu formülasyonun düşük konsantrasyonlu bleaching sistemlerinde bile etkili remineralizasyon sağladığını bildirmiştir. STMP'nin en önemli avantajı remineralizasyon sağlarken beyazlatma etkinliğini azaltmamasıdır.

Bleaching sonrası mine restorasyonunda etkili olan bir diğer ajan kalsiyum polifosfat türevleridir. Ortiz ve ark. (2023, 2024), kalsiyum polifosfat içeren bleaching jellerinin enzimatik mineralizasyonu aktive ettiğini, mine yüzeyine yeni mineral kristallerinin bağlanmasını kolaylaştırdığını ve doku bütünlüğünü

koruduğunu ortaya koymuştur. Bu ajanlarla yapılan çalışmalar, mine yüzeyinin hem morfolojik hem kimyasal olarak daha stabil hale geldiğini göstermektedir. Özellikle yüksek konsantrasyonlu HP jellerinin neden olduğu yüzey bozulmalarını sınırlaması bu materyali güncel bleaching ürünlerinde tercih edilen bir bileşen hâline getirmiştir.

TiF₄ (titanyum tetraflorür) içeren primerler de bleaching sonrası mineyi korumada etkili bulunmuştur. Peruchi ve ark. (2024), TiF₄ yüklü polimerik primerlerin 35% HP içeren jellerle birlikte kullanılmasının mine yüzeyinde koruyucu bir titanyum oksit tabakası oluşturduğunu ve HP'nin neden olduğu mineral kaybını belirgin biçimde azalttığını belirtmiştir. TiF₄, florürün klasik remineralizasyon mekanizmasını güçlendirirken aynı zamanda nano düzeyde bir bariyer tabakası oluşturarak doku hasarına karşı fiziksel koruma sağlar.

ACP (amorf kalsiyum fosfat) içeren jeller de bleaching sonrası mine onarımında önemli bir rol oynamaktadır. Borges ve ark. (2011) ACP içeren ev tipi bleaching sistemlerinin mine mikrosertliğini artırdığını ve microhardness kaybını büyük ölçüde önlediğini göstermiştir. ACP, doğal remineralizasyon sürecine hızlı bir şekilde katılarak kristal büyümesini destekleyen bir öncü materyal görevi görür.

Remineralizan ajanların kombinasyonlarının etkinliği de araştırılmıştır. Gonçalves ve ark. (2021), florür, CPP-ACP ve STMP kombinasyonunun tek başına kullanılan ajanlara göre daha yüksek remineralizasyon sağladığını ve mine yüzeyinde daha dayanıklı bir apatite benzeri yapı oluşturduğunu göstermiştir. Bu biyomimetik sinerji modern bleaching sonrası bakım protokollerinin temelini oluşturmaktadır.

Bleaching sonrası yüzey morfolojisini onarmada kullanılan bir diğer yöntem nano-hidroksiapatit + florür kombinasyonudur.

Vieira ve ark. (2020), kalsiyum veya florür ile modifiye edilmiş in-office jellerle daha düşük pürüzlülük ve daha yüksek mikrosertlik değerleri elde edildiğini belirtmiş; bu kombinasyonun mine yeniden yapılanmasında etkili olduğunu göstermiştir.

Biyomimetik yaklaşımlar arasında son yıllarda öne çıkan bir alan da enzimatik mineralizasyon teknolojileridir. Ortiz MIG ve ark. (2024), kalsiyum polifosfat ve enzimatik katalizörlerle zenginleştirilmiş jellerin mine üzerinde hızlı ve güçlü bir mineralizasyon etkisi sağladığını; yüzey pürüzlülüğünü azalttığını ve HP kaynaklı hasarı sınırladığını göstermiştir. Bu yaklaşım, klasik kimyasal remineralizasyon yöntemlerinden farklı olarak biyolojik süreçleri taklit ederek mine dokusunu yeniden yapılandırır.

Sonuç olarak modern remineralizasyon stratejileri bleaching sonrası mine ve dentin dokularını korumada önemli bir dönüşüm yaratmıştır. Nano-biyomateriyaller, peptit türevleri, polifosfat sistemleri ve florür modifikasyonları sayesinde hem bleaching etkinliği korunmakta hem de biyoyumluluk artırılmaktadır. Günümüzde en etkili yaklaşım, beyazlatma jellerinin remineralizan içeriklerle zenginleştirilmesi ve işlem sonrası remineralizan bakım protokollerinin uygulanmasıdır. Bu uygulamalar bleaching sonrası mine stabilitesini artırmakta, uzun dönem renk stabilitesini desteklemekte ve hassasiyeti önemli ölçüde azaltmaktadır.

Klinik Sonuçlar, Hasta Memnuniyeti ve Estetik Değerlendirmeler

Diş beyazlatmanın klinik etkinliği yalnızca ölçülebilir renk değişikliğiyle değil, aynı zamanda hastanın estetik memnuniyeti, psikososyal iyilik hâli ve yaşam kalitesindeki değişikliklerle de değerlendirilmelidir. Estetik talebin giderek arttığı günümüzde beyazlatma tedavileri, doğal görünümlü bir gülüş isteyen bireylerin en sık başvurduğu minimal invaziv estetik uygulamalar arasında yer

almaktadır. Bu nedenle bleaching'in kişiye sağladığı klinik faydanın yanı sıra, psikososyal etkilerinin de anlaşılması önem taşımaktadır.

Güncel literatür, bleaching işlemlerinin hastaların yaşam kalitesini, özgüvenini ve sosyal etkileşimdeki konforunu anlamlı biçimde artırdığını göstermektedir. Maran ve ark. (2024), geniş çaplı bir multistudy analizinde bleaching tedavisinden sonra hastaların yalnızca estetik memnuniyetlerinde değil, aynı zamanda sosyal özgüven düzeylerinde de belirgin artış olduğunu rapor etmiştir. Bu çalışma, bleaching'in yalnızca kozmetik bir işlem olmadığını, bireyin yaşam kalitesinin birçok yönünü olumlu etkileyen bir tedavi olduğunu ortaya koymaktadır. Benzer şekilde Ludovichetti ve ark. (2024), klinik ortamda uygulanan bleaching tedavisi sonrasında hastaların memnuniyet skorlarının anlamlı şekilde yükseldiğini ve elde edilen sonuçların doğal diş estetiği beklentisini yüksek ölçüde karşıladığını bildirmiştir.

Estetik algı üzerindeki etkiler yalnızca klinik sonuçlar ile sınırlı değildir. Gavic, Budimir ve Tadin (2024), ergen bireylerde gülüş estetiği ile özsaygı düzeyleri arasında güçlü bir ilişki olduğunu göstermiştir. Bu çalışma özellikle genç bireylerde, daha beyaz bir gülüşün kendilik algısını ve sosyal ilişkilerdeki güveni artırabileceğini göstermesi bakımından önemlidir. Arroyo Cruz ve ark. (2021) da benzer bir estetik değerlendirmede ünlü kişilerin gülüş estetiğini analiz ederek beyaz dişlerin çekicilik ve profesyonellik algısı üzerinde belirleyici olduğunu ortaya koymuştur. Bu veriler bleaching'in yalnızca diş rengi üzerinde değil, bireyin psikososyal imajı üzerinde de etkili bir müdahale olduğunu göstermektedir.

Renk değişimi değerlendirmesinde ΔE ve Whiteness Index (WID) objektif ölçüm yöntemleridir. Meta-analizler, bleaching sonrası ΔE değerlerinin genellikle 3.3'ün üzerinde olduğunu ve bunun klinik olarak belirgin bir renk değişikliği anlamına geldiğini göstermektedir (Pontes ve ark., 2020). In-office bleaching genellikle daha hızlı sonuç verirken, at-home bleaching daha kontrollü ve uzun

sürekli bir renk stabilitesi sağlamaktadır. Kombine protokoller ise iki yöntemin avantajlarını birleştirerek hem hızlı başlangıç hem de uzun dönem renk koruması sunar. Maran ve ark. (2024), kombine bleaching uygulanan bireylerde sonuçların hem daha tatmin edici hem de daha uzun süre kalıcı olduğunu saptamıştır.

Renk stabilitesi bleaching etkinliğinin uzun dönem başarısı açısından büyük önem taşır. Bleaching sonrası remineralizan bakım uygulanmayan hastalarda zaman içinde relaps görülebilmekte, özellikle koyu pigmentasyonlu gıdalar tüketen bireylerde renk stabilitesi azalabilmektedir. Bu nedenle klinik protokollerde bleaching sonrası florürlü diş macunu, CPP-ACP içerikli kremler veya nano-hidroksiapatit içeren ürünlerle bakım önerilmektedir. Nunes ve ark. (2024) tarafından bildirilen bulgular, remineralizan ajanlarla desteklenen bleaching protokollerinin yalnızca mine stabilitesini artırmadığını, aynı zamanda renk stabilitesinin 6–12 ay boyunca daha yüksek düzeyde korunmasını da sağladığını göstermiştir.

Bleaching'in klinik etkinliği aynı zamanda uygulanan teknik, jelin konsantrasyonu, pH değeri ve uygulama süresiyle ilişkilidir. Da Silva ve ark. (2024), yoğun konsantrasyonlu HP ve CP jellerinin tek seans etkilerini karşılaştırmış ve iki yöntemin de etkili olduğunu, ancak CP grubunda hassasiyetin daha düşük olduğunu belirtmiştir. Bu sonuç yüksek konsantrasyonlu HP jellerinin hızlı fakat daha agresif bir etki mekanizmasına sahip olduğunu, CP'nin ise daha kontrollü ve biyouyumlu bir seçenek sunduğunu göstermektedir.

Adolesanlarda bleaching uygulamalarının klinik sonuçlarını inceleyen Gonçalves ve ark. (2017), genç bireylerde bleaching'in etkili ve güvenli olduğunu, ancak mine yapısının daha geçirgen olması nedeniyle hassasiyet oranlarının yetişkinlere kıyasla daha yüksek olabileceğini bildirmiştir. Pinto ve ark. (2017) de benzer şekilde adolesanlarda in-office bleaching sonrası memnuniyetin

yüksek olduğunu, ancak uygulama sonrası hassasiyetin daha dikkatle yönetilmesi gerektiğini vurgulamıştır.

Hasta memnuniyeti yalnızca renk değişikliği değil, tedavi konforu, hassasiyet düzeyi, tedavi süresi ve elde edilen sonucun doğallığı ile belirlenir. Bu açıdan değerlendirildiğinde modern bleaching uygulamaları daha güvenli, daha etkili ve daha hasta dostu hâle gelmiştir. Remineralizan içerikli bleaching jelleri, hassasiyetin azaltılması ve doku stabilitesinin korunması açısından memnuniyet oranlarını artırmaktadır. Favoreto ve ark. (2024), farklı protokollerin karşılaştırıldığı bir çalışmada remineralizan içerikler ile modifiye edilen jellerin daha düşük hassasiyet sağladığını ve hastaların tedaviden daha fazla memnun kaldığını göstermiştir.

Sonuç olarak bleaching, günümüzde yalnızca estetik bir iyileştirme sağlayan değil, aynı zamanda bireylerin sosyal ve psikolojik yaşamını da olumlu yönde etkileyen bütüncül bir tedavi yaklaşımıdır. Bilimsel veriler bleaching uygulamalarının yüksek memnuniyet oranlarına sahip olduğunu, etkili renk açma sağladığını, yaşam kalitesini artırdığını ve doğal gülüş estetiği arayışında güvenli bir seçenek sunduğunu göstermektedir. Bleaching protokollerinin kişiye özel planlanması, remineralizan desteklerle uygulanması ve renk stabilitesinin korunması ile bu klinik avantajlar daha da güçlenmektedir.

Güvenlik, Biyouyumluluk ve Klinik Öneriler

Diş beyazlatma işlemlerinin etkinliğinin yanı sıra güvenliği de klinik pratiğin en önemli konularından biridir. Hidrojen peroksit ve karbamid peroksit temelli jellerin uzun yıllardır tanınmış oksidatif etkileri bulunsada modern araştırmalar bu ajanların kontrollü kullanıldığında güvenli kabul edildiğini, ancak yüksek konsantrasyonların uygun olmayan uygulamalarla birleştğinde mine ve dentin üzerinde geçici de olsa bazı biyolojik değişikliklere yol açabileceğini göstermektedir. Bu nedenle güncel klinik

protokollerin amacı, beyazlatma işleminin etkinliğini artırırken, mine ve dentin dokularına verilen zararı en aza indirmek, pulpaya diffüzyonu kontrol etmek ve hassasiyet gibi yan etkileri sınırlamaktır.

Biyouyumluluk açısından en önemli parametrelerden biri konsantrasyon ve pH ilişkisidir. Yüksek konsantrasyonlu (%30–40) hidrojen peroksit içeren jeller, hızlı ve dramatik renk değişimi sağlayabilmekte, ancak pulpal diffüzyon ve hassasiyet riskini de artırmaktadır. Mena-Serrano ve ark. (2015), yüksek konsantrasyonlu HP'nin dentin tübülleri yoluyla pulpaya daha hızlı ve yüksek miktarda geçtiğini rapor etmiştir. Bu durum, özellikle derin dentin bölgelerinde hassas nosiseptörlerin uyarılmasıyla pulpal inflamasyon riskine yol açabilir. Aynı çalışmada düşük pH değerine sahip jellerin pulpaya geçişi artırdığı, nötr veya hafif alkali pH aralığının ise biyouyumluluğu belirgin şekilde artırdığı gösterilmiştir.

Bu nedenle güncel klinik uygulamalarda nötr pH veya tamponlanmış jeller kullanılması önerilmektedir. Acuña ve ark. (2022), pH'ı yükseltilmiş HP jellerinin pulpaya diffüzyonu azaltarak hassasiyeti düşürdüğünü ve mine yüzeyinde daha az hasar oluşturduğunu bildirmiştir. Bu bulgu özellikle yüksek konsantrasyonlu in-office bleaching uygulamalarında önemlidir.

Hangi hastalarda hangi konsantrasyonun kullanılacağı ise bireyin klinik profilinden etkilenir. İnce mine tabakasına sahip bireylerde, diş eti çekilmesi bulunanlarda, genç hastalarda ve geçmişte hassasiyet öyküsü olan kişilerde yüksek konsantrasyonlu ajanlardan kaçınmak ve daha düşük konsantrasyonlu, uzun süreli ev tipi protokoller tercih etmek klinik güvenlik açısından daha uygundur. Gonçaves ve ark. (2017), adolesanlara uygulanan in-office bleaching işlemlerinde HP penetrasyonunun yetişkinlere göre daha fazla olduğunu göstermiş; Pinto ve ark. (2017) de genç bireylerde hassasiyet oranlarının daha yüksek olabileceğini

bildirmiştir. Bu nedenle bu yaş gruplarında düşük konsantrasyonlu, kısa süreli ve tekrarlı doz protokoller önerilir.

Bleaching'in biyouyumluluğunu etkileyen önemli bir diğer unsur uygulama süresidir. Uygulama süresi arttıkça hem pulpaya diffüzyon hem de yüzey morfolojisindeki bozulma riski artmaktadır. Da Silva KL ve ark. (2023), tek uygulamada yüksek etki sağlayan bazı HP jellerinin bulunmasına rağmen çoğu formülasyonun güvenli renk açma için iki veya daha fazla kısa uygulama süresine ihtiyaç duyduğunu ortaya koymuştur. Bu bulgu uzun süreli tek uygulama yerine kısa süreli, tekrarlı protokollerin daha güvenli olduğunu desteklemektedir.

Beyazlatma işlemlerinin güvenliğinde remineralizan ajanların kullanımının önemi büyüktür. Nano-STMP, CPP-ACP, ACP, kalsiyum polifosfat, TiF₄ primerleri ve nano-hidroksiapatit gibi ajanların bleaching jellerine eklenmesi hem bleaching etkinliğini korumuş hem de mine-dentin dokularında oluşabilecek biyolojik riski azaltmıştır. Gruba ve ark. (2023), STMP içeren jellerin mine yüzeyindeki Ca/P oranını artırdığını ve HP'nin neden olduğu mineral kaybını önemli ölçüde azalttığını belirtmiştir. Ortiz ve ark. (2024) ise kalsiyum polifosfat içeren jellerin enzimatik mineralizasyonu aktive ederek mine yüzeyindeki bozulmayı sınırladığını göstermiştir. CPP-ACP içeren jellerin pulpaya HP diffüzyonunu azalttığı (Barbosa ve ark., 2020), TiF₄ primerlerinin ise koruyucu titanyum oksit tabakası oluşturarak yüzey hasarını sınırladığı rapor edilmiştir (Peruchi ve ark., 2024).

Kontrendikasyonlar da bleaching'in güvenliği açısından önemli bir klinik parametredir. Gebelik ve emzirme döneminde bleaching önerilmez; çünkü peroksit ürünlerinin sistemik etkileri tam olarak bilinmemektedir. Çatlak, çürük, dentin ekspozisyonu, ileri düzey erozyon, aktif periodontal hastalık veya restorasyon uyumsuzluğu bulunan dişlerde bleaching uygulanmadan önce bu durumların tedavi edilmesi gereklidir. Ayrıca ağır tetrasiklin lekeleri

gibi intrinsik renklenmelerde bleaching etkisi sınırlı kalabilir; bu durumlarda laminate veneer veya tam seramik restorasyonlar gibi alternatif tedaviler düşünülmelidir.

Klinik öneriler bakımından güncel literatür, bleaching işlemlerinin kişiye özel planlanması gerektiğini vurgulamaktadır. Tedavi öncesi ayrıntılı anamnez alınması, mevcut restorasyonların rengi ve durumu, mine kalınlığı, dentin duyarlılığı, estetik beklentiler ve yaşam tarzı alışkanlıkları değerlendirilmelidir. Bleaching sonrası bakım protokolleri de etkinliğin uzun süreli olmasını sağlamak için önemlidir. Florürlü diş macunları, CPP-ACP içerikli kremler, nano-hidroksiapatit ürünleri ve düşük aşındırıcılı diş macunları bleaching sonrası dönemde diş dokularının stabilitesini destekler ve renk relapsını azaltır.

Güncel klinik uygulamalar, bleaching işlemlerinin doğru planlandığında ve uygun formülasyonlarla uygulandığında güvenli olduğunu göstermektedir. Hekim kontrolünde yapılan in-office bleaching, kısa sürede etkili sonuçlar sunarken, uygun hasta seçimi ve remineralizan desteklerle biyolojik risk minimal düzeye indirilebilir. Ev tipi bleaching ise daha düşük konsantrasyonlu ajanlarla daha kontrollü bir renk açma sağlar ve hassasiyet açısından daha avantajlıdır. Her iki yöntemin de etkinliği bilimsel olarak kanıtlanmıştır; önemli olan yöntemin doğru kişiye doğru şekilde uygulanmasıdır.

Sistemik Derlemelerde Prisma 2020, Meta-Analiz Yaklaşımları ve Bilimsel Raporlama Standartları

Diş beyazlatma alanında giderek artan klinik ve laboratuvar çalışmalar, bu konunun sistematik derleme ve meta-analizlere uygun, yoğun bir araştırma alanı olduğunu göstermektedir. Farklı bleaching teknikleri, konsantrasyonlar, remineralizan ajanlar ve mine-dentin üzerindeki biyolojik etkiler çok sayıda çalışmada karşılaştırmalı biçimde incelenmiş olduğundan, araştırmacıların bu

literatürü bütüncül biçimde değerlendirebilmesi için PRISMA 2020 rehberine uygun sistematik incelemeler büyük önem taşımaktadır. PRISMA 2020, sistematik derlemelerin şeffaflığını, doğruluğunu ve tekrarlanabilirliğini artırmayı hedefleyen kapsamlı bir raporlama standardıdır (Page ve ark., 2021).

PRISMA rehberine göre bir sistematik derlemenin ilk adımı net bir araştırma sorusu ve protokol oluşturulmasıdır. Araştırmacılar, bleaching'in etkinliği, mine-dentin üzerindeki etkiler, hassasiyet oluşumu, remineralizan ajanların rolü veya farklı konsantrasyonların karşılaştırılması gibi spesifik konuları ele alabilir. Protokolün önceden hazırlanması ve PROSPERO gibi veri tabanlarında kaydedilmesi, çalışmanın metodolojik bütünlüğünü güçlendirir ve olası yanlışlıkları azaltır.

Veri tabanı taramaları PRISMA'nın en kritik aşamalarından biridir. Bu kapsamda PubMed, Scopus, Web of Science ve Cochrane Library gibi çoklu veri tabanlarında kapsamlı taramalar yapılmalıdır. Nunes ve ark. (2024), fototerapinin endodonti sonrası ağrı üzerindeki etkilerini değerlendirdikleri meta-analizde benzer şekilde çok yönlü ve geniş kapsamlı veri tabanı taramalarının önemini vurgulamıştır. Bleaching çalışmalarında da Oper Dent, J Dent, Clin Oral Investig, J Esthet Restor Dent ve J Appl Oral Sci gibi ilgili dergilerde birçok deneysel ve klinik çalışma bulunmaktadır.

Çalışmaların dahil edilme ve dışlanma kriterlerinin açıkça belirtilmesi PRISMA'nın temel ilkelerindendir. Kontopantelis ve Reeves (2012), meta-analizlerde heterojenitenin doğru değerlendirilmesinin güvenilir sonuçlar için kritik olduğunu belirtmişlerdir. Bleaching çalışmalarında metodolojik çeşitlilik — konsantrasyon farklılıkları, uygulama süreleri, in vitro vs in vivo çalışmalar— heterojeniteyi artırabileceğinden, alt grup analizleri veya random-effects modelleri tercih edilmelidir.

Meta-analizlerde etki büyüklüğü hesaplaması bleaching araştırmalarında özellikle ΔE değerleri, mikrosertlik değişimleri, mineral içerik kaybı ve hassasiyet skorları üzerinden yapılmaktadır. Quintela Souza de Moraes ve ark. (2015) gibi çalışmaların verileri, HP konsantrasyonunun mine yüzey bozulması üzerindeki etkisini değerlendirirken meta-analitik yaklaşımların güçlü bir karşılaştırma sunduğunu göstermektedir. Aynı şekilde Favoreto ve ark. (2023), kalsiyum içeren bioaktif desensitizerlerin bleaching sonrası hassasiyet üzerindeki etkisini meta-analizle değerlendirmiş ve remineralizan ajanların klinik değeri açısından önemli kanıtlar sunmuştur.

PRISMA 2020 aynı zamanda derleme sürecinin akışını gösteren diyagramın (flowchart) sunulmasını zorunlu kılar. Bu, taranan çalışmaların sayısı, çıkarılan duplikasyonlar, dışlanan çalışmaların nedenleri ve analize dahil edilen çalışmaların net bir görsel özetidir. Bleaching literatüründe bu diyagram özellikle gereklidir; çünkü yayınlar arasında metodoloji, konsantrasyon ve ajan farklılıkları nedeniyle eleme süreci oldukça kapsamlı olur.

Cochrane Handbook for Systematic Reviews (Higgins ve ark., 2024) ise randomizasyon, körleme, tahmin hataları, ölçüm yanlılıkları ve raporlanmayan veriler gibi metodolojik sorunların nasıl değerlendirileceğine dair ayrıntılı rehberlik sunar. Bleaching çalışmalarında özellikle laboratuvar testlerinde körleme yapılamaması, klinik çalışmalarda hassasiyet gibi subjektif sonuç ölçütlerinin hasta tarafından rapor edilmesi ve farklı cihazlarla renk ölçümü yapılması metodolojik kaliteyi etkileyen önemli unsurlardır.

Dos Reis-Prado ve ark. (2023), sistematik derlemelerde laboratuvar çalışmalarının dahil edilmesi durumunda sonuçların klinik uygulamaya genellenebilirliğinin daha dikkatli değerlendirilmesi gerektiğini vurgulamıştır. Bleaching alanındaki çalışmaların büyük bir kısmı in vitro olduğundan, meta-analizlerde

bu ayrımın açıkça belirtilmesi ve klinik uyarılama yapılırken dikkatli olunması gerekir.

Sonuç olarak PRISMA 2020 ve Cochrane metodolojisi, bleaching alanındaki literatürü doğru değerlendirmek, güvenilir karşılaştırmalar yapmak ve klinik önerilerin bilimsel temelde oluşturulmasını sağlamak için vazgeçilmez araçlardır. Bleaching üzerine yapılan sistematik derlemeler hem klinisyenler hem araştırmacılar için güçlü bir kanıt temeli sunar ve modern protokollerin şekillenmesinde kritik rol oynar.

Sonuç ve Gelecek Perspektifler

Diş beyazlatma, modern estetik diş hekimliğinin en önemli ve en sık uygulanan minimal invaziv tedavilerinden biridir. Hidrojen peroksit ve karbamid peroksit temelli bleaching ajanlarının pigment moleküllerini oksitleyerek renk açma etkisi, onlarca yıldır güvenli ve etkili şekilde kullanılmaktadır. Ancak güncel literatür bleaching'in yalnızca renk değişimi sağlayan bir işlem olmadığını; mine ve dentin düzeyinde biyokimyasal süreçleri, mineral dinamiklerini, yüzey morfolojisini ve hijyen parametrelerini etkileyen kompleks bir biyolojik etkileşim içerdiğini göstermektedir. Bu nedenle bleaching uygulamalarının hem etkinlik hem de biyolojik güvenlik açısından bütüncül bir şekilde değerlendirilmesi gereklidir.

Beyazlatma işlemlerinin klinik etkinliği çok sayıda çalışmada doğrulanmıştır. ΔE değerleri genellikle klinik kabul eşiği olan 3.3'ün üzerindedir (Pontes ve ark., 2020) ve in-office ya da at-home uygulamalarla anlamlı, hastayı tatmin eden bir renk açma sağlanabilmektedir. Maran ve ark. (2024) ve Ludovichetti ve ark. (2024), bleaching işlemlerinin estetik memnuniyeti ve psikososyal özgüveni artırdığını göstermiş; Gavic ve ark. (2024) ise gülüş estetiğinin özellikle genç bireylerde özsaygı ile yakından ilişkili olduğunu ortaya koymuştur. Bu bulgular bleaching'in yalnızca

kozmetik değil, aynı zamanda yaşam kalitesiyle ilişkili bir tedavi olduğunu göstermektedir.

Mine ve dentin üzerindeki etkiler incelendiğinde bleaching ajanlarının kimyasal ve fiziksel bazı değişikliklere neden olabileceği grlmektedir. Mineral kaybı, mikrosertlik azalması, yüzey pürüzlülüğünde artış ve dentin tübüllerinde geçici genişlemeler bu değişiklikler arasında yer alır (De Mendonça ve ark., 2024; Elfallah & Bertassoni, 2015). Ancak modern remineralizan ajanlarla desteklenen protokoller sayesinde bu etkilerin büyük kısmı tersine çevrilebilir hâle gelmiştir. STMP, CPP-ACP, nano-hidroksiapatit, TiF₄ primerleri ve kalsiyum polifosfat gibi biyomimetik materyaller mine yüzeyinin yeniden yapılanmasına katkı sağlamakta ve bleaching sonrası doku stabilitesini artırmaktadır (Gruba ve ark., 2023; Ortiz ve ark., 2024; Jnior ve ark., 2021).

Bleaching sonrası görülen en sık yan etki olan dentin hassasiyeti, pulpaya HP diffüzyonu, dentin sıvı hareketinin artması ve oksidatif stres mekanizmalarıyla ilişkilidir. Ancak pH tamponlanmış jeller, remineralizan ajanlar ve farmakolojik desteklerle bu hassasiyet önemli ölçüde azaltılabilmektedir (Acuņa ve ark., 2022; Barbosa ve ark., 2020). Bu nedenle klinik uygulamalarda yüksek konsantrasyonlu jeller yerine daha kontrollü protokoller, kısa uygulama süreleri ve remineralizan destekler önerilmektedir.

Günümüzde bleaching'in klinik güvenliği, doğru hasta seçimi, uygun konsantrasyon kullanımı, pH stabilitesi, remineralizan içerikler ve postoperatif bakım protokolleriyle önemli ölçüde artırılmıştır. Üretici firmalar da formülasyonlarını giderek daha biyoyumlu hâle getirmekte; kalsiyum, florür, polifosfat ve biyomimetik partiküllerle modifiye edilen jeller bleaching sonrası hasarı azaltırken etkinliği korumaktadır. Bu yaklaşım “biyolojik bleaching” olarak adlandırılan yeni bir klinik paradigma ortaya koymaktadır.

Gelecek perspektifler incelendiğinde bleaching alanında araştırmaların özellikle üç ana başlıkta yoğunlaştığı görölmektedir: (1) Yeni nesil remineralizan ve koruyucu ajanlar: Nano biyomateryaller, kalsiyum polifosfat türevleri ve peptit temelli remineralizan sistemlerin geliştirilmesi ile hem etkinlik hem güvenlik artırılacaktır (Yang ve ark., 2024). (2) Daha kontrollü oksidatif mekanizmalar: HP ve CP dışındaki alternatif oksidasyon sistemleri (örneğin fotodinamik aktivasyon, enzimatik oksitleyiciler) üzerinde çalışmalar artmaktadır. (3) Uzun dönem klinik takipler ve yaşam kalitesi sonuçları: Bleaching işlemlerinin uzun vadeli renk stabilitesi, mine biyomekaniği ve QoL üzerindeki etkilerini inceleyen geniş örneklemli çalışmalar halen sınırlıdır; bu alanda daha güçlü kanıtlara ihtiyaç vardır.

Ayrıca sistematik derlemeler ve meta-analizlerin PRISMA 2020 doğrultusunda daha standart şekilde raporlanması bleaching literatürünün güvenilirliğini artıracaktır (Page ve ark., 2021). Remineralizan modifiye bleaching jellerinin uzun dönem etkileri, yüksek riskli gruplarda güvenlik verileri ve klinik uygulama protokollerinin standardizasyonu gelecekteki araştırmaların öncelikli başlıkları arasındadır.

Genel olarak değerlendirildiğinde güncel bilimsel veriler bleaching işlemlerinin doğru uygulandığında etkili, güvenli, biyoyumlu ve yüksek hasta memnuniyetine sahip bir tedavi olduğunu göstermektedir. Modern biyomimetik destekler, kişiye özel protokoller ve bilimsel rehberli klinik yaklaşım sayesinde beyazlatma, diş hekimliğinde minimal invaziv estetiğin temel taşlarından biri olmayı sürdürmektedir

Kaynakça

Acuña, E. D., Parreiras, S. O., Favoreto, M. W., et al. (2022). In-office bleaching with a commercial 40% hydrogen peroxide gel modified to have different pHs. *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry*, 34, 322–327. <https://doi.org/10.1111/jerd.12453>

Arroyo Cruz, G., Orozco Varo, A., Montes Luna, F., & Jiménez-Castellanos, E. (2021). Esthetic assessment of celebrity smiles. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 125, 146–150. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2019.12.006>

Barbosa, J. G., Benetti, F., Oliveira, G. M., et al. (2020). Bleaching gel mixed with MI Paste Plus reduces HP penetration. *Clinical Oral Investigations*, 24, 1299–1309. <https://doi.org/10.1007/s00784-019-03009-5>

Berger, S. B., Pavan, S., Vidal, C. M., Santos, P. H., Giannini, M., & Bedran-Russo, A. K. (2012). Changes in stiffness of demineralized dentin following application of tooth whitening agents. *Acta Odontologica Scandinavica*, 70, 56–60. <https://doi.org/10.3109/00016357.2011.575176>

Cavalli, V., Rodrigues, L. K. A., Paes-Leme, A. F., et al. (2010). Effects of bleaching agents containing fluoride and calcium on human enamel. *Photomedicine and Laser Surgery*, 29, 319–325. <https://doi.org/10.1089/pho.2010.2797>

Cavalli, V., Rosa, D. A. D., Silva, D. P. D., Kury, M., Liporoni, P. C. S., Soares, L. E. S., & Martins, A. A. (2018). Effects of experimental bleaching agents on the mineral content of sound and demineralized enamels. *Journal of Applied Oral Science*, 26, e20170589. <https://doi.org/10.1590/1678-7757-2017-0589>

De Mendonça, L. C., Rodrigues, M., Bicalho, A. A., da Silva, G. R., Quagliatto, P. S., Santos, D. Q., & Soares, C. J. (2024). Analysis of

calcium and phosphate ion extraction from dental enamel by bleaching gels using ion chromatography, micro-CT, and SEM. *Operative Dentistry*, 49, 157–165. <https://doi.org/10.2341/23-026-L>

Dos Reis-Prado, A. H., Abreu, L. G., de Arantes, L. C., et al. (2023). Influence of sodium hypochlorite on cyclic fatigue of NiTi instruments: A meta-analysis. *Clinical Oral Investigations*, 27, 6291–6319. <https://doi.org/10.1007/s00784-023-05243-4>

Elfallah, H. M., Bertassoni, L. E., Charadram, N., Rathsam, C., & Swain, M. V. (2015). Effect of tooth bleaching agents on protein content and mechanical properties of dental enamel. *Acta Biomaterialia*, 20, 120–128. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2015.03.035>

Farooq, I., & Bugshan, A. (2020). The role of salivary contents and modern technologies in enamel remineralization. *F1000Research*, 9, 171. <https://doi.org/10.12688/f1000research.22499.3>

Garcia, K. G., Nunes, G. P., Delbem, A., Dos Santos, P. H., Fernandes, G., Robles, H., Lemos, P., & Danelon, M. (2024). Inorganic phosphate effect in a hydrogen peroxide-based bleaching agent. *Operative Dentistry*, 49, 465–474. <https://doi.org/10.2341/24-002-L>

Gavic, L., Budimir, M., & Tadin, A. (2024). The association between self-esteem and aesthetic component of smile among adolescents. *Progress in Orthodontics*, 25, 9. <https://doi.org/10.1186/s40510-023-00508-w>

Giannini, M., Silva, A. P., Cavalli, V., & Paes Leme, A. F. (2006). Effect of carbamide peroxide bleaching agents with fluoride or calcium. *Journal of Applied Oral Science*, 14, 82–87. <https://doi.org/10.1590/s1678-77572006000200004>

Gonçalves, F. M. C., Delbem, A. C. B., Gomes, L. F., et al. (2021). Effect of fluoride, CPP-ACP and STMP combination. *Archives of Oral Biology*, 122, 105001. <https://doi.org/10.1016/j.archoralbio.2020.105001>

Gonçalves, M. L. L., Tavares, A., Mota, A., Penna, L. A. P., Deana, A. M., & Bussadori, S. K. (2017). In-office bleaching for adolescents using HP gels. *Brazilian Dental Journal*, 28, 720–725. <https://doi.org/10.1590/0103-6440201701516>

Gruba, A. S., Nunes, G. P., Marques, M. T., Danelon, M., Alves, R. O., & Delbem, A. C. B. (2023). Influence of bleaching gels formulated with nano-sized sodium trimetaphosphate and fluoride. *Journal of Dentistry*, 139, 104743. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2023.104743>

Higgins, J. P. T., Thomas, J., Chandler, J., et al. (2024). *Cochrane handbook for systematic reviews of interventions* (Version 6.5). Cochrane.

Júnior, N. A. N., Nunes, G. P., Gruba, A. S., Danelon, M., da Silva, L., de Farias, B. G., Briso, A. L. F., & Delbem, A. C. B. (2022). Evaluation of bleaching efficacy with hexametaphosphate + fluoride. *Clinical Oral Investigations*, 26, 5071–5078. <https://doi.org/10.1007/s00784-022-04480-3>

Khoroushi, M., Shirban, F., Doustfateme, S., & Kaveh, S. (2015). Effect of nanobiomaterials on enamel surface roughness. *Contemporary Clinical Dentistry*, 6, 466–470.

Khoroushi, M., Shirban, F., Doustfateme, S., & Kaveh, S. (2016). Effect of three nanobiomaterials on enamel microhardness. *Restorative Dentistry & Endodontics*, 41, 196–201.

Kontopantelis, E., & Reeves, D. (2012). Performance of statistical methods for meta-analysis when true study effects are non-normally

distributed. *Statistical Methods in Medical Research*, 21, 409–426.
<https://doi.org/10.1177/0962280210392008>

Limas, J., Mauricio, F., Alvitez-Temoche, D., Mauricio-Vilchez, C., Medina, J., & Mayta-Tovalino, F. (2020). Effect of post-bleaching surface microroughness with whiteness HP blue vs whiteness HP maxx. *Journal of Contemporary Dental Practice*, 21, 1002–1007.

Ludovichetti, F. S., Zerman, N., Stellini, E., Zambon, G., Mazzoleni, S., & Zuccon, A. (2024). Dental bleaching: Patient perception and satisfaction. *Minerva Dental and Oral Science*, 73, 217–223.
<https://doi.org/10.23736/s2724-6329.24.04950-7>

Maran, B. M., Bersezio, C., Martin, J., Favoreto, M. W., Rezende, M., Vallejo-Izquierdo, L., Reis, A., Loguercio, A. D., & Fernandez, E. (2024). The influence of dental bleaching on patient's quality of life: A multistudy analysis. *Journal of Dentistry*, 151, 105397.
<https://doi.org/10.1016/j.jdent.2024.105397>

Mena-Serrano, A. P., Parreiras, S. O., do Nascimento, E. M., Borges, C. P., Berger, S. B., Loguercio, A. D., & Reis, A. (2015). Effects of concentration/composition of in-office bleaching gels on hydrogen peroxide penetration. *Operative Dentistry*, 40, E76–E82.
<https://doi.org/10.2341/13-352-L>

Moura, C. W., Catelan, A., Zanatta, R. F., Cavalcanti, A. N., Soares, L. E., Martins, K. V., & Liporoni, P. C. (2019). Effects of bleaching using 10% carbamide peroxide with calcium or amorphous calcium phosphate on enamel mineral content and hardness. *Acta Odontologica Latinoamericana*, 32, 126–132.

Nunes, G. P., Marques, M. T., Toledo, P. T. A., Alves, R. O., Martins, T. P., & Delbem, A. C. B. (2024a). Effect of a novel low-concentration hydrogen peroxide bleaching gel containing nano-sized sodium trimetaphosphate and fluoride. *Journal of Dentistry*, 150, 105330. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2024.105330>

Nunes, L. P., Nunes, G. P., Ferrisse, T. M., Strazzi-Sahyon, H. B., Dezan-Júnior, E., Cintra, L. T. A., & Sivieri-Araujo, G. (2024b). Phototherapy for postoperative pain: A systematic review and meta-analysis. *Clinical Oral Investigations*, 28, 232. <https://doi.org/10.1007/s00784-024-05623-4>

Ortiz, M. I. G., Dos Santos, J. J., Rodrigues-Filho, U. P., Aguiar, F. H. B., Rischka, K., & Lima, D. A. N. L. (2023). Maintenance of enamel properties after bleaching with high-concentrated hydrogen peroxide gel containing calcium polyphosphate particles. *Clinical Oral Investigations*, 27, 5275–5285. <https://doi.org/10.1007/s00784-023-05147-3>

Ortiz, M. I. G., Corrales Ureña, Y. R., Aguiar, F. H. B., Lima, D. A. N. L., & Rischka, K. (2024). Enzymatically driven mineralization of a calcium-polyphosphate bleaching gel. *Bioengineering*, 11(1), 83. <https://doi.org/10.3390/bioengineering11010083>

Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., et al. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372, n71. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>

Peruchi, V., Ribeiro, R. A. O., Mendes Soares, I. P., et al. (2024). Influence of coating enamel with TiF4-loaded primer on adverse effects of 35% HP bleaching gel. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 153, 106497. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2024.1064973>

Pinto, M. M., Gonçalves, M. L., Mota, A. C., et al. (2017). Controlled clinical trial of bleaching in adolescents: 12-month follow-up. *Clinics*, 72, 161–170. [https://doi.org/10.6061/clinics/2017\(03\)06](https://doi.org/10.6061/clinics/2017(03)06)

Pontes, M., Gomes, J., Lemos, C., Leão, R. S., Moraes, S., Vasconcelos, B., & Pellizzer, E. P. (2020). Effect of bleaching gel concentration on tooth color and sensitivity: A systematic review and

meta-analysis. *Operative Dentistry*, 45, 265–275.
<https://doi.org/10.2341/17-376-L>

Sa, Y., Sun, L., Wang, Z., Ma, X., Liang, S., Xing, W., Jiang, T., & Wang, Y. (2013). Effects of two in-office bleaching agents with different pH on the structure of human enamel. *Operative Dentistry*, 38, 100–110. <https://doi.org/10.2341/11-173-L>

Seron, M. A., Nunes, G. P., Ferrisse, T. M., et al. (2024). Influence of bioceramic sealers on dentinal tubule penetration: A systematic review and meta-analysis. *Odontology*, 112, 672–699.
<https://doi.org/10.1007/s10266-024-00904-6>

Torres, C., Zanatta, R. F., Silva, T. J., & Borges, A. B. (2019). Effect of calcium and fluoride addition to hydrogen peroxide bleaching gel on tooth diffusion, color, and microhardness. *Operative Dentistry*, 44, 424–432. <https://doi.org/10.2341/18-113-L>

Vieira, I., Vieira-Junior, W. F., Pauli, M. C., Theobaldo, J. D., Aguiar, F. H., Lima, D. A., & Leonardi, G. R. (2020). Effect of in-office bleaching gels with calcium and fluoride on enamel. *Journal of Clinical and Experimental Dentistry*, 12, e116–e122.
<https://doi.org/10.4317/jced.56006>

Yang, Q., Zheng, W., Zhao, Y., Shi, Y., Wang, Y., Sun, H., & Xu, X. (2024). Advancing dentin remineralization: ACP and biomimetic stabilizers. *Dental Materials*, 40, 1282–1295.
<https://doi.org/10.1016/j.dental.2024.06.013>

BÖLÜM 5

KOMPOZİT MATRİKSLERİNE ALTERNATİF MONOMER SİSTEMLERE GÜNCEL BİR BAKIŞ

NİLGÜN AKGÜL¹
ECEMNUR ATLI²

Giriş

Diş hekimliğinde rezin kompozitler, çürük tedavisinde restoratif materyal, derin kavite preparasyonlarında kavite astarı, dişlerin oklüzal yüzeylerini çürükten korumak amacıyla pit ve fissür örtücü olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.(Ferracane, 2011) Diş hekimliğinin birçok alanında işlevsel ve estetik çözümler sunan bu materyaller; organik bir rezin matriks, inorganik doldurucu partiküller ve bu iki faz arasında adezyonu sağlayan bağlayıcı ajanlardan oluşan estetik restoratif materyallerdir. Bu nedenle, rezin kompozitlerin yapısal ve klinik performansları, söz konusu üç ana bileşenin özellikleri ile doğrudan ilişkilidir (Vasudeva, 2009). Polimerizasyon büzülmesi, bakteriyel adezyon ve monomer salınımına bağlı yan etkiler gibi bir çok dezavantaja sahip olan kompozitleri geliştirme çalışmaları, bu dezavantajları tamamen ortadan kaldırmak veya en aza indirmek için materyalin bileşenlerini uyarlamayı amaçlar (Zimmerli & ark., 2010).

¹ Doç.Dr. Nilgün AKGÜL, Pamukkale Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi Restoratif Diş Tedavisi Anabilim Dalı, Orcid: 0000-0002-6732-0485, nakgul@pau.edu.tr

² Arş.Gör. Ecemnur ATLI, Pamukkale Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi Restoratif Diş Tedavisi Anabilim Dalı Orcid: 0009-0000-6229-7565, eatli@pau.edu.tr

Organik rezin matriks, bir monomer sistemi; serbest radikal polimerizasyonu başlatmaya yönelik bir başlatıcı (inisiyatör) sistem ve polimerizasyon öncesi dönemdeki stabiliteyi ve polimerizasyon sonrası kimyasal kararlılığı artırmaya yönelik stabilizatörlerden oluşur (Vasudeva, 2009). Resin kompozitlerin monomer fazı, biyouyumluluk ile polimerizasyon sonrası mekanik dayanım ve aşınma direnci gibi faktörler hedeflenerek çoğunlukla çok fonksiyonlu olan metakrilatlardan oluşmaktadır (Asmussen & Peutzfeldt, 1998). Bis-GMA (Bisfenol A glisidil metakrilat) ve UDMA (Üretan dimetakrilat), dental kompozitlerde en sık kullanılan monomerlerdir. Bis-GMA, iki reaktif grubu sayesinde yüksek çapraz bağlanma ve iyi mekanik performans sağlar; ancak yüksek viskozitesi nedeniyle akışkanlığı artırmak için çoğunlukla TEGDMA (Trietilen glikol dimetakrilat) gibi düşük viskoziteli seyrelticilerle birlikte kullanılır (Yoshinaga, Yoshihara, & Yoshida, 2021). TEGDMA kompozite akışkanlık sağlayıp işlenebilirliğini arttırırken, aşırı miktarda kullanımı polimerizasyon büzülmesini ve su absorpsiyonunu artırarak mekanik özellikleri olumsuz etkileyebilmektedir (Gonçalves & ark., 2011).

Diş hekimliğinde kompozit materyallerde sık kullanılan sistemler arasında metil metakrilatlar (MMA) , düşük molekül ağırlıkları sayesinde iyi işlenebilirlik sunsa da yüksek polimerizasyon büzülmesi gösteren materyallerdir (Szczenio-Wlodarczyk & ark., 2021). UDMA esaslı sistemler, daha düşük viskozite ve daha iyi tokluk profiliyle Bis-GMA'ya alternatif ya da tamamlayıcı bir seçenek oluşturabilmektedirler. Epoksiler ise güçlü adezyon ve kimyasal direnç sağlarlar. (Fugolin & ark., 2020)

Bu kitap bölümü, geleneksel sistemlere alternatif kompozit matriks monomerlerini tanıtmayı; bu monomerlerin temel özelliklerini ve uygulama alanlarını anlatmayı amaçlamaktadır.

1-Geleneksel Monomer Sistemlerine Alternatif Yeni Monomerler

Mevcut dental kompozit formülasyonlarında sık kullanılan monomer olan Bis-GMA, yüksek viskozitesi sebebiyle genellikle TEGDMA gibi viskozitesi daha düşük bir monomer ile beraber kullanılır. Bis-GMA/ TEGDMA esaslı kompozitlerde ise yüksek viskozite ve polimerizasyon büzülmesi bir sorun haline gelmiştir. TEGDMA'nın yapıya eklenmesiyle meydana gelen düşük viskozite ve buna bağlı gelişen hacimsel büzülme, kompozitin mekanik özelliklerini olumsuz etkilemekte; uzun vadede arayüz boşluklarına ve çürüklere sebep olabilmektedir. Bu gibi dezavantajlar, kompozit matriksine adapte olabilecek yeni alternatif monomer arayışlarının popüler hale gelmesine sebep olmuştur.

Yapılan bir çalışmada (Srivastava & ark., 2018), BisGMA monomerindeki iki hidroksil grubunun esterleştirilmesi ile, alkil yan zincir uzunluğu ve dallanma derecesi farklı bir dizi monomer sentezlenmiştir. Bu yeni monomerler, klasik BisGMA ve TEGDMA'ya kıyasla belirgin biçimde daha düşük viskozite, daha sınırlı polimerizasyon büzülmesi, daha yüksek çift bağ dönüşüm oranı ve artmış hidrofobiklik sergilemiştir. Sentezlenen monomerlerden biri olan EBCI – BisGMA , düşük viskozite ve polimerizasyon büzülmesi (%1'in altında) yüksek çift bağ dönüşümü (%85) ile dental kompozitlerde seyreltici olarak kullanılabilecek bir monomer olarak öne çıkmıştır.

Yoshinaga ve ark.(Yoshinaga, Yoshihara, & Yoshida, 2021) yapmış oldukları bir çalışmada, diizosiyanatların hidroksiakrilat ya da metakrilatlarla tepkime girmesi sonucu farklı üretan metakrilat türevleri sentezlemişlerdir. Sentezlenen TMXDI-HEA (1,3-bis(1-isocyanato-1-methylethyl)benzene--2-hydroxyethyl acrylate, TMXDI-HPA (1,3-bis(1-isocyanato-1-methylethyl)benzene--2-hydroxypropylacrylate),XDIHPA(1,3bis(isocyanatomethyl)benzene -2-hydroxy propyl acrylate) ve NBDI-HEA (Norbornane

diisocyanate-2-hydroxyethyl acrylate-2-hydroxyethyl acrylate) sistemlerinin UDMA' ya kıyasla daha yüksek mekanik performans sergilediği ve Bis-GMA/UDMA' ya alternatif olabileceği vurgulansa da, akrilatların metakrilatlara göre daha yüksek toksisite potansiyeli dikkate alındığında, özellikle hibrit bloklar için kullanımlarının daha uygun olduğu belirtilmiştir.

Başka bir çalışmada (Fugolin& ark., 2020) ise, Bis-GMA yerine yeni bir alternatif olarak UDMA ile beraber kullanılmak üzere geliştirilen diüretan dimetakrilat türevi 2EMATE-BDI (2-hydroxy-1-ethyl methacrylate) monomerinin, mekanik özellikleri tehlikeye atmadan polimerizasyon stresini azalttığı, hidrofobik yapısı ve biyofilm oluşumuna minimum etkisi sebebiyle kompozit formülasyonlarına daha yüksek konsantrasyonlarda dahil edildiğinde uygulanabilir bir seçenek haline geldiği vurgulanmıştır.

González-López ve ark. (González-López & ark., 2020) yaptıkları çalışmalarında, Alil karbonat bazlı yeni bir metakrilat olan BZ-AL(allyl(2-(2-(((allyloxy)carbonyl)oxy)benzoyl)-5-methoxyphenyl) carbonate) monomerinin, geleneksel Bis-GMA/TEGDMA sistemine kıyasla daha düşük polimerizasyon stresi, daha yüksek çift bağ dönüşüm oranı ve daha iyi eğilme dayanımı gösterdiği, bu sayede bu monomerin yüksek eğilme dayanımı ve azalmış polimerizasyon stresi gibi özellikleri sebebiyle TEGDMA yerine kullanılabilecek bir alternatif olarak öne çıktığı gösterilmiştir. Bis-GMA esaslı kompozitlerdeki bir diğer sorun ise potansiyel östrojenik etkilerinin olmasıdır. Bu durum özellikle çocukların gelişimlerini ve yetişkinlerin hormon homeostazını olumsuz etkilemektedir.

Bis-GMA, Bisfenol A (BPA) içeren yapısı nedeniyle hormonal dengeyi bozabilecek östrojen benzeri etkiler gösterebilmektedir. (Jun & ark., 2020) Bu sebeple, Bis-GMA ve türevlerine alternatif olarak, Bisfenol-A içermeyen iki yeni monomer sistemi geliştirmeyi amaçlayan bir çalışmada (Sun & ark., 2022) ,

Üretilen BCF-EA (5'-methylenedicreosol diglycidyl ether diacrylate) BCF-GMA (5'-methylenedicreosol diglycidyl ether dimethacrylate) monomeri içeren rezin kompozitlerin, Bis-GMA/TEGDMA sistemine kıyasla daha yüksek dönüşüm derecesi, daha düşük polimerizasyon stresi ve daha yüksek eēilme dayanımı parametreleri ile birlikte düşük sitotoksisite sergiledikleri grlmtr. Geleneksel Bis-GMA/TEGDMA sistemine göre Bisfenol-A içermeyen, biyolojik açıdan uyumlu yapıları, üstün mekanik ve optik özellikleri sayesinde bu monomerlerin, Bis-GMA içermeyen dental kompozit matrisler için potansiyel alternatif monomer olabilecekleri belirtilmiştir.

Bir başka çalışmada, kompozit rezinin polimerizasyonu esnasında oluşan büzülme stresini azaltmak için Lamparth ve ark. (Lamparth & ark., 2021) dört farklı ürethan bazlı ekleme-parçalama zincir transfer ajanı sentezlemişlerdir. Alil sülfon gruplu zincir transfer ajanları, dimetakrilat esaslı kompozitlere eklendiēinde aē oluşumunu düzenleyerek jel noktasını geciktirir ve polimerizasyon sırasında ortaya çıkan stresi düşürür. Çalışmada özellikle metakrilat fonksiyonlu CTA-2 (Chain Transfer Agents-2) içeren kompozitin, üstün mekanik özellikler saēlamasının yanı sıra en düşük büzülme kuvvetini gsterdiēi bulunmuştur.

Geleneksel metakrilatlara alternatif olarak tasarlanan, yüksek molekül kütlesi ve düşük çift baē yoēunluēuna sahip Phene [N-methyl-bis(ethyl-carbamate-isopropyl- α -methylstyryl)amine] monomerinin deēerlendirildiēi bir çalışmada (He Jingwei & ark., 2019), bu bileşenin Bis-GMA/TEGDMA sistemine kütlece %0–40 aralıēında katılabildiēi; özellikle %20 düzeyindeki ilavenin, fiziksel özellikler ve aşınma direncini korurken hacimsel büzülme ile büzülme gerilimini azaltmaya elverişli olduēu rapor edilmiştir. Bununla birlikte, daha yüksek oranlarda kullanımın çift baē dönüşümünü azaltabileceēi de vurgulanmıştır. Araştırmacıların yaptıēı bir diēer çalışmada (He Jingwei & ark., 2021) ise, tersiyer

amin içermeyen, çift bağ reaktivitesi düşük olan iki Phene benzeri monomer HE-Phene (hexaethylene glycol bis(carbamate-isopropyl-methylstyrene)) ve TE-Phene (triethylene glycol bis(carbamate-isopropyl-methylstyrene))'yi Bis-GMA/TEGDMA esaslı rezin matrisine farklı oranlarda ilave etmiş, %30'a kadar HE-Phene ve TE-Phene ilavesinin, yüzey bütünlüğü ve optik özellikler üzerinde olumsuz bir etki göstermediği; fakat monomer fraksiyonu arttıkça yüzey sertliğinde azalma olduğu görülmüştür. Bu sonuçlar , düşük polimerizasyon büzülmesi amacıyla kullanılan Phene ve Phene türevi monomerlerin optik ve yüzey özelliklerini büyük ölçüde koruyabildiği, ancak formülasyon tasarımında mekanik özelliklerden olan mikrosertlik gibi parametrelerin dengesi için monomerin ilave oranına dikkat edilmesinin daha güvenli olabileceğini düşündürmüştür.

Lucena ve ark.'nın adeziv ve kompozit formülasyonlarında Bis-GMA'ya alternatif olabilecek potansiyel bir aday olarak yeni bir izomer karışımı PG6DMA'yı inceledikleri çalışmalarında (Lucena & ark., 2024), bu monomerin performansını hem adeziv hem de kompozit sistemlerde deneysel olarak değerlendirmiş, sonuç olarak ilgili monomer ilavesinin polimerizasyon stresini azalttığı ve dönüşüm derecesini arttığı görülmüştür. Bu sonuçlara rağmen eğilme dayanımı ve elastik modül gibi bazı mekanik özelliklerde ve suya karşı dirençte sınırlamalar mevcut olduğu için, daha fazla çalışmaya ihtiyaç duyulduğu vurgulanmıştır.

TEGDMA monomeri yerine reaktif seyreltici olarak kullanılmak üzere , özellikle hacimsel büzülme ve büzülme stresini azaltmak için, iki farklı ortalama molekül ağırlığına sahip dimetakrilat oligomer olan 380PPMA ve 640PPM'nin sentezlendiği bir başka çalışmada (Luo, Liu, & He, 2019), PPMA (polypropylenglycolbis(2-hydroxy-3-methoxypropyl) dimethacrylates)'ların reaktif seyreltici olarak kullanılmasıyla dental rezin kompozitlerde hacimsel büzülme ve büzülme stresinin,

mekanik özelliklerde belirgin bir kayba yol açmadan azaltılabileceği sonucuna varılmıştır. Ağırlıkça %20 640PPMA ilavesiyle en düşük sonuçlar elde edilmiş olup, su absorpsiyonu ve çözünürlük parametrelerindeki artış sebebiyle, kompozitlerin biyoyumluluğu ve kullanım ömrünün etkilenebileceği ve daha fazla çalışmaya ihtiyaç olduğu belirtilmiştir.

Yine TEGDMA monomerinin sebep olduğu polimerizasyon büzülmesi ve su emilimi gibi olumsuz özelliklerin üstesinden gelmek amacıyla yapılan bir çalışmada (Moszner, Fischer, & Angermann, 2016) 5 yeni ürethan grubu içeren monomer ile AGDMA (asetile gliserol dimetakrilat) ve GTMA (gliserol trimetakrilat) monomerleri sentezlenmiştir. Bu TEGDMA alternatiflerinin, TEGDMA' ya kıyasla daha kabul edilebilir biyoyumluluğa sahip olduğu ve daha düşük polimerizasyon büzülmesi gösterdiği, bu bakımdan yeni monomerlerin seyreltici olarak kullanılmasının klinik açıdan kabul edilebilir mekanik performansla uygulanabilir alternatifler oldukları ilgili çalışmada vurgulanmıştır.

Yu ve ark. yapmış olduğu çalışmada (Yu & ark., 2021) geleneksel Bis-GMA / TEGDMA sistemlerinde dayanıklılığını artırmak ve polimerizasyon büzülmesini azaltmak amacıyla, PETA (pentaeritritol tetra(3-merkaptopropiyonat)) ve HMDI (disikloheksilmetan 4,4'-diizosiyanat) kullanarak, hiper dallanmış bir tiyol oligomeri (HMDI-6SH) sentezlenmişlerdir. Sonrasında, 1,3,5-Triallyl-1,3,5 Triazine-2,4,6(1H,3H,5H)-Trione (TTT) ile karıştırılan HMDI-6SH monomeri, farklı kütle oranlarına sahip Bis-GMA/TEGDMA sistemlerine %10 ila %40 oranları arasında eklenerek tiyolen monomer sistemleri hazırlanmıştır. Hazırlanan yeni monomer ilaveli rezin kompozitlerin fizikokimyasal performansı; çift bağ dönüşümü, polimerizasyon büzülmesi, elastik modül, su emilimi ve çözünürlük dâhil olmak üzere kapsamlı biçimde incelenmiştir. İncelemeler sonucunda Bis-GMA/TEGDMA

esaslı kompozit rezinlere HMDI/TTT monomer çiftinin ilavesinin, çift bağ dönüşümünü arttırdığı ve polimerizasyon büzülmesini azalttığı görülmüştür. Sonuç olarak HMDI-6SH/TTT sisteminin Bis-GMA/TEGDMA esaslı kompozitlerde hacimsel büzülmeyi azalttığı; ancak tiyol monomerlerinin kokusunun pratik uygulamalarda göz önünde bulundurulması ve biyouyumluluk dâhil bazı ek özelliklerin gelecekte kapsamlı biçimde araştırılmasına ihtiyaç duyulduğu ifade edilmiştir.

Metakrilat esaslı kompozitlerde polimerizasyon büzülmesini azaltmak amacıyla halka açma (ring-opening) mekanizması gösteren, VCP (1,1-disübstitüe 2-vinilsiklopropan) ürethan fonksiyonlu yeni monomerlerin sentezlendiği bir çalışmada (Catel & ark., 2018), ürethan grupları taşıyan yedi çapraz bağlayıcı vinilsiklopropan sentezlenmiştir. Bu yeni monomerler düşük polimerizasyon büzülmesi ve yüksek mekanik performans göstermiş olup; ürethan gruplarının mekanik özellikleri anlamlı biçimde iyileştirdiği görülmüştür. Sonuç olarak, metakrilat esaslı monomerler yerine ürethan vinilsiklopropanların kullanımının düşük polimerizasyon büzülmesine sahip dental kompozitler geliştirmede etkili oldukları ilgili çalışmada vurgulanmıştır.

Zhou ve ark. yapmış oldukları çalışmada (Zhou & ark., 2024) spiro yapısı ve iki benzen halkası içeren yüksek molekül ağırlıklı yeni bir monomer olan 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) sentezlenmiştir. Çalışmada, DDTU-IDI' nin yapısında bulunan spiro halkalarının halka açılma tepkimesiyle polimerizasyon büzülmesini azalttığı; yüksek molekül ağırlığının çift bağ yoğunluğunu düşürerek hacimsel büzülmeyi sınırladığı; yapıda bulunan benzen halkalarının ise zincir rijitliğini artırdığı gösterilmiştir. Bis-GMA/TEGDMA esaslı kompozitlere farklı oranlarda ilave edilerek hazırlanan örneklerde ağırlıkça %10 ve %20 oranlarında DDTU-IDI içeren kompozitlerin,

düşük polimerizasyon b    mesi ve b    me stresi, olumlu fizikokimyasal   zellikler ve biyoyumluluk g  sterdikleri bulunmuştur.   alışmada, düşük polimerizasyon b    mesine sahip DDTU-IDI monomerinden oluşan bu yeni dental rezin kompozit sisteminin, marjinal sızıntı ve sekonder       riskini azaltabilecek umut vaad eden bir alternatif monomer olabileceği ifade edilmiştir.

Dai ve ark. yapmış olduğu   alışmada (Dai & ark., 2024) yıldız şeklinde dallanmış bir yapıya sahip yeni nesil monomer olan NPUA (9-Armed Starburst Polyurethane Acrylate) sentezlemişlerdir. İlgili   alışmada Grafting-onto y  ntemiyle sentezlenen NPUA monomerinin, Bis-GMA'ya kıyasla daha düşük viskozite ve hacimsel b    me ile   st  n biyoyumluluk g  sterdiği, ışıkla polimerize olabilen NPUA-esaslı sistemlerin, hacimsel b    me, su emilimi, suda            ve hidrofobiklik gibi   zellikler bakımından Bis-GMA esaslı sistemlere g  re belirgin bi  imde avantajlı olduğu g  r  lm  ştir. NPUA i  eren rezin kompozitlerde g  zlenen y  ksek eğilme dayanımı, elastisite mod     ve mikrosertlik gibi bulguların olması da bu monomerin kompozit materyallerinde uygulama potansiyeline işaret ettiği belirtilmiştir.

Gariani ve ark. yapmış olduğu   alışmada (Gariani & ark., 2023), temel olarak Bis-GMA monomeri gibi Bisfenol-A i  eren metakrilatların yerine, potansiyel   strojenik etkileri elimine etmek i  in Metakrilat Klor  r ile esterleştirme reaksiyonu yoluyla iki yeni monomer olan Metakrilat Resveratrol EMPM ((E)-5-(4-(methacryloyloxy)styryl)-1,3-phenylenebis(2-methylacrylate)) ve Metakrilat Fenoltalein (DIFPM) ((3-oxo-1,3-dihydroisobenzofuran-1,1-diyl)bis(4,1-phenylene)bis(2-methylacrylate)), sentezlemişlerdir. Bu yeni monomerleri yaygın olarak kullanılan seyrelticiler TEGDMA ve HEMA monomerleri ile birleştirerek kopolimerler oluşturulduktan sonra mikrosertlik, su emilimi, temas a  ısı ve d  n  ş  m derecesi gibi parametrelere bakılmış, sonu   olarak her iki yeni monomerin suda             

azalttığı, dönüşüm derecesinde belirgin artışa sebep olduğu ve bu artışın sebebinin moleküler yapılarındaki rijitlikten kaynaklandığı, Bis-GMA'nın TEGDMA kopolimerinde %15,5 mol oranında DIFPM ile ikamesi mikrosertlik değerini %94 artırırken, EMPM'nin HEMA kopolimerinde bu özelliği %10 azalttığı görülmüştür. Çalışmadaki bulgular, kimyasal yapının, moleküler geometrinin ve düzlemselliğin kopolimerlerin bazı fizikokimyasal özellikleri üzerindeki etkisini daha iyi anlamaya katkıda bulunduğunu ve Bis-GMA yerine geçebilecek yeni monomerlerin tasarımını desteklediğini ortaya koymuştur.

Bisfenol-A yapısına sahip olmayan, Bis-GMA/TEGDMA esaslı klasik monomer sistemine sahip kompozit rezinlere göre su emilimi daha düşük, flor içerikli 4-TF-PQEA (4-(Trifluorometil) fenilhidrokinon akrilat) monomerinin sentezlendiği bir çalışmada (Liu & ark., 2018) bu monomerin Bis-GMA'ya kıyasla, kompozitlerde su emilimini ve polimerizasyon büzülmesini anlamlı şekilde azalttığı, 4-TF-PQEA/TEGDMA sistemlerinin, daha yüksek dönüşüm derecesine, daha düşük su emilimine ve daha yüksek temas açısına sahip olarak daha üstün performans gösterdikleri bulunmuştur. Ek olarak ilgili çalışmada, 4-TF-PQEA monomerinin sitotoksikite testlerinde daha iyi biyoyumluluk sergileyerek sağlık açısından daha güvenli bir alternatif olduğu ortaya koyulmuş; bu sonuçlar, BPA içermeyen dental materyallerin geliştirilmesinde florlu monomerlerin önemli bir potansiyele sahip olduğunu göstermiştir.

Düşük polimerizasyon büzülmesine sahip yeni kompozit sistemlerin geliştirilmesi amacıyla dört yeni çapraz bağlayıcı Vinilsiklopropan (VCP)'nin sentezlendiği bir çalışmada (Tauscher & ark., 2017) organik matrikste VCP'lerin kullanımının metakrilat esaslı sistemlere yakın mekanik özellikler gösterirken aynı zamanda daha düşük hacimsel büzülmeye sahip olduğu, ancak yüksek viskozite ve sentezlenirken açığa çıkan yan ürünler bu malzemelerin

kullanımını zorlaştırmakta ve daha fazla çalışmaya ihtiyaç duyulduğunu göstermektedir.

TEGDMA' ya alternatif bir seyreltici olarak, yüksek reaktivite özelliği gösteren yeni monometakrilatlar Fenil Karbonat Metakrilat ve Morfolin Karbonil Metakrilat'ın sentezlendiği çalışmada (Kilambi & ark., 2009), Fenil Karbonat Metakrilat kullanımının, mekanik özelliklerde anlamlı bir iyileşme sağlayamadığı; buna karşın, Morfolin Karbonil Metakrilat monomerinin reaktif seyreltici olarak kullanımının Bis-GMA/TEGDMA monomer sistemine benzer mekanik performans gösterdiği ayrıca polimerizasyon hızında ve çift bağ dönüşüm derecesinde belirgin artışlar yarattığı, bu sebeple de Morfolin Karbonil Metakrilat başta olmak üzere yüksek reaktiviteye sahip monometakrilatların kompozit rezinlerde reaktif seyreltici olarak kullanımı için güçlü bir potansiyel oluşturdıkları vurgulanmıştır.

Perez-Mondragan ve ark. yapmış oldukları bir çalışmada (Pérez-Mondragón & ark., 2020), TTM (trimetakrilat tris(4-hidroksifenil)metan triglisidil metakrilat) monomeri sentezlenmiş ve kompozit rezinlerin formülasyonlarında baz monomer olarak kullanıldığında Bis-GMA/TEGDMA içeren kontrol grubuna kıyasla mekanik ve biyolojik açıdan eşdeğer parametreler sunduğu görülmüştür. Bu sebeple TTM monomerinin , Bis-GMA içermeyen kompozitlerin geliştirilmesinde potansiyel bir aday olduğu ; ancak büzülme stresi ve su emiliminin kontrol grubuna kıyasla daha yüksek değerlerde olması sebebiyle restorasyonun uzun dönem klinik stabilitesi için risk oluşturabileceği ve ileri çalışmalara ihtiyaç duyulduğu belirtilmiştir.

Moreira ve ark. tarafından yapılan bir çalışmada (Moreira & ark., 2024), kaju kabuğu sıvısından (CNSL) sentezlenen CTMA (Cardanol Trimetakrilat) monomerinin kompozit rezinlerde Bis-GMA' nın yerine kullanılmasının mekanik ve fizikokimyasal özelliklere etkisi incelenmiştir. Ağırlıkça %50 Bis-GMA/%50

TEGDMA içeren kontrol grubuyla karşılaştırılan CTMA monomeri, Bis-GMA'nın yerine kademeli oranlarda ilave edilmiştir. Elde edilen bulgular, CTMA ilavesinin viskoziteyi, su emilimini ve çözünürlüğü anlamlı ölçüde azalttığını; ancak eğilme dayanımı ve dönüşüm derecesi üzerinde olumsuz bir etki yaratmadığını göstermiştir. Çalışmanın sınırlılıkları dikkate alındığında, CTMA monomerinin dental restoratif materyallerde Bis-GMA yerine uygun bir alternatif monomer olarak değerlendirilebileceği vurgulanmaktadır.

Dimolanat esaslı siklopolimerize monomer olan HCPM (Hexanediol-based Cyclopolymerizable Monomer) monomerinin sentezlendiği bir çalışmada (Peer & ark., 2020), HCPM'nin kompozit rezin örneklerde polimerizasyon büzülmesi ve büzülme stresini azalttığı görülmüş olup, özellikle metakrilat esaslı kompozitlere göre yüksek viskoziteye sahip olmadığı halde düşük hacimsel büzülme ve polimerizasyon stresi göstermesi, mekanik özellikleri koruması, ayrıca metakrilat monomerlerle kopolimerleşmeye uygun olması, klinik kullanımının umut verici olduğu belirtilmiştir.

Salazar ve ark. (Salazar, Anderson, & Stansbury, 2025) yapmış oldukları çalışmada rezin esaslı restoratif materyallerdeki mekanik dayanımı arttırmak için TUDA(Tetraüretan Diakrilat) esaslı kompozit formülasyonlarının geliştirilmesi amaçlanmıştır. Araştırmada TUDA ve benzeri yeni monomerler, akrilik asit (AA), metakrilik asit (MAA) ve 4-metakriloksietil trimellitik anhidrit (4-META) gibi asidik monomerlerle farklı oranlarda birleştirilmiş ve bunun sonucunda ürethan-asit etkileşimlerine dayalı non-kovalent ağların açığa çıkmasıyla, klasik BisGMA / UDMA sistemlerinden daha üstün mekanik özelliklere sahip, BisGMA içermeyen yeni kompozit reçinelerin üretilebileceği gösterilmiştir.

Hidrolik olarak stabil yeni bir monomer olan TEG-DVBE (Trietilen Glikol Divinilbenzil Eter)'nin UDMA ile kombine kullanımının, geleneksel BisGMA / TEGDMA esaslı monomer

sistemleriyle karşılaştırmalı olarak değerlendirildiği bir çalışmada (Wang Xiaohong & ark., 2018); bu yeni materyalin suya maruziyet sonrası eğilme dayanımı, kırılma tokluğu, dönüşüm derecesi ve büzülme stresi parametrelerine bakıldığında kontrol (Bis-GMA/TEGDMA esaslı geleneksel kompozitler) grubundan üstün özellikler gösterdiği, ayrıca TEG-DVBE monomerinin, TEGDMA'ya kıyasla dentine uyumlu kırılma indisine ve daha düşük viskoziteye sahip olduğu görülmüş ve bundan yola çıkarak UDMA/TEGDVBE esaslı kompozitlerin Bis-GMA/TEGDMA sistemlerine göre umut verici bir alternatif olduğu ifade edilmiştir.

Kompozitlerde polimerizasyon büzülmesi ve buna bağlı oluşan büzülme stresini azaltmak amacıyla, BisGMA/TEGDMA sistemlerine alternatif olarak 3 farklı monomerin incelendiği bir çalışmada (Wu & ark., 2024), spiroortokarbonat monomeri BMSOC (3,9-dimetilen-1,3,5,7-tetraoksa-spiro[5,5]undekan) ve epoksi rezin monomeri ECHM-ECHC (3,4-epoksisikloheksilmetil-3,4-epoksisikloheksan karboksilat) monomerlerini, BisS-GMA (bisfenol-S-bis(3-metakrilato-2-hidroksipropil)eter) esaslı kompozitlere dahil ederek, dönüşüm derecesi, polimerizasyon büzülmesi, marjinal mikro sızıntı, ıslanabilirlik, eğilme dayanımı, eğilme modülü ve biyouyumluluk gibi parametreler test edilmiş; sonuçlar kontrol grubuyla(BisGMA/TEGDMA) karşılaştırıldığında, artmış dönüşüm derecesi ve mekanik özellikler, minimal mikrosızıntı ve uygun in vivo biyouyumluluk gösterdikleri görülmüştür. Sonuç olarak, bu yeni monomerlerin polimerizasyon büzülmesine bağlı klinik problemlerin önlenmesinde ve restoratif materyallerin uzun ömürlülüğünün sağlanmasında önemli potansiyele sahip oldukları ve diş hekimliği uygulamalarında umut vadeden alternatif materyaller olarak değerlendirilebilecekleri sonucuna varılmıştır.

BPA içermeyen yeni bir monomer sentezlemek ve rezin kompozit formülasyonlarındaki performansını değerlendirmek

amacıyla Bis-EFMA' nın sentezlendiği bir çalışmada (He Jingwei & Kopperud,2018)Bis-EFMA (9,9-bis[4-(2-hidroksietoksi)fenil]florene) deneysel Bis-GMA/TEGDMA kompoziti ve klinik kullanımı yaygın olan Filtek™ Z250 (3M ESPE, St. Paul, Minnesota, ABD) ürünüyle karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Sonuç olarak bu alternatif monomerin Bis GMA esaslı kompozit örneklerine göre daha düşük hacimsel büzülme, su emilimi, çözünürlük ve sitotoksikite ile daha yüksek dönüşüm derecesi, mekanik dayanım değerleri gösterdiği tespit edilmiştir. Suda bekletme sonrası, Filtek Z250 materyaliyle karşılaştırıldığında daha düşük eğilme dayanımı dışında, genel olarak benzer veya üstün özellikler gösteren Bis-EFMA' nın, ticari dental kompozitler için uygun bir monomer adayı olarak konumlandığı düşünülmektedir.

BisGMA/TEGDMA esaslı deneysel kompozitlere yeni sentezlenen Kolestril Metakrilat (CM) monomerinin farklı oranlarda eklenmesiyle oluşturulan 5 farklı deney grubunun karşılaştırıldığı bir çalışmada (Silva & ark., 2024) , Bis-GMA ve TEGDMA gruplarına %6 ve %12 konsantrasyonlarında kolesteril metakrilat ilavesinin, kontrol grubuna (%60 Bis-GMA-%40 TEGDMA) kıyasla polimerizasyon büzülme kuvvetini azalttığı ; diğer biyomekanik özellikleri (su emilimi, çözünürlük, oksidasyon potansiyeli ve çapraz bağ yoğunluğu) değiştirmeden, mikrosertlik değerlerini arttırdığı görülmüştür. İlgili çalışmada, belirtilen konsantrasyonlarda Kolestril Metakrilat ilavesinin kompozit rezinin fiziksel ve mekanik özellikleri geliştirmek açısından etkili bir strateji olduğu vurgulanmıştır.

Bir başka çalışmada (Gouveia, Finer, & Santerre, 2025) metakrilat esaslı rezin kompozitlerin sahip olduğu hidrolize duyarlı ester bağları sebebiyle sınırlı stabilitesinin üstesinden gelmek için, hidrolitik olarak kararlı monomerler (HSMs (hydrolytically-stable monomers)) olarak anılan 3BE ve 3TE sentezlenmiş; bu monomerler BisGMA ve TEGDMA'ya benzer fiziksel özellikler sunarken, daha

düşük sitotoksosite göstermiştir. 3BE ve 3TE monomerleri, metakrilat esaslı kontrol gruplarına kıyasla enzimatik bozulmaya karşı dirençli bulunmuş ve genotoksik potansiyel göstermemiştir. Bu bulgular, rezin kompozitin temel özelliklerinden taviz vermeden, restoratif malzemelerin klinik ömrünün uzatılabilme potansiyelini ortaya koymaktadır.

2-Yeni Antibakteriyel Dental Monomerler

Dental rezin kompozitler (DRC), yapısal olarak kendiliğinden antibakteriyel özellik göstermez. Bu durum, DRC yüzeylerinde daha fazla biyofilm birikmesine ve bunun sonucunda klinik restorasyon başarısızlıklarının başlıca nedenlerinden biri olan sekonder çürüklerin görülme sıklığını arttırmaktadır. (He J & ark.) Bu sebeple, dental rezin kompozitlere antibakteriyel özellikler kazandırmak gerekli ve önemli hale gelmiştir.

Antibakteriyel etkinlik genel olarak polimer matrisine salınabilen antibakteriyel ajanlar eklenerek sağlanabilir. Bu ajanlar arasında gümüş içeren partiküller, çinko içeren malzemeler, antimikrobiyal ilaçlar ve klorheksidin bulunur; ancak bu serbest bırakılabilen ajanların en büyük dezavantajı, hızlı başlangıç salınımı olup, kısa süreli etki sağlamalarıdır. (Zhang & ark., 2021) Bu sebeple antibakteriyel monomerlerin geliştirilmesi, son yıllarda belirgin biçimde ivme kazanan bir araştırma odağı olarak öne çıkmaktadır.

Wang Yapin ve ark. yapmış oldukları bir çalışmada (Wang Yapin & ark., 2018), üçü dimetakrilat ikisi monometakrilat yapıda olan kuaterner amonyum içerikli beş yeni antibakteriyel monomer sentezlemiş, özellikle uzun alkil zincirli ve dimetakrilat yapıları C16-dimetilbenzylamonyum dimetakrilatın antibakteriyel etkinlik ve biyoyoumlukluk açısından daha avantajlı olduğu, çoğunun BisGMA' dan daha iyi biyoyoumlukluk gösterdiği belirtilmiştir.

Başka bir çalışmada (He Xiaoling & ark., 2022) ise farklı alkil zincir uzunluğuna sahip 3 bi kuaterner amonyum metakrilat

olan biQAMA-12, biQAMA-14, ve biQAMA-16 monomerlerinin rezin kompozitlere ilavesi sonrası çift bağ dönüşümü, S. Mutans'a karşı antibakteriyel aktivite, yüzey yük yoğunluğu, temas açısı, su emilimi, çözünürlük ile mekanik özellikler ve sitotoksosite araştırıldı. biQAMA (bi-quaternary ammonium methacrylates) içermeyen dental rezin kompozitlerin kontrol grubu olarak kullanıldığı bu çalışmada sonuçlar, tüm biQAMA içeren kompozit rezinlerin antibakteriyel oranının %90'ın üzerinde olduğunu için biQAMA-12 ilave edilen kompozitlerin, daha yüksek antibakteriyel etkinlik gösterirken temel mekanik/fiziksel performansı koruduğu rapor edilmiştir.

Fanfoni ve ark. çalışmasında (Fanfoni & ark., 2021), bis-QAM(bis-quaternary ammonium methacrylates) yapısında dokuz antibakteriyel dimetakrilat monomer sentezlenmiş ve bunlardan ikisi, ticari monomer MDPB (12-metakrililoksidodecyl piridinyum bromür) ile karşılaştırıldığında S. Mutans'a karşı üstün aktivite gösterdiği bulunmuştur. Ayrıca çalışmada tanımlanan tüm bis-QAM'lerin, MİK (Minimum İnhibitör Konsantrasyonu) değerine eşit konsantrasyonda S. mutans biyofilm oluşumunu engelleyebildiği, yeni sentezlenmiş bis-QAM' lar arasında, DDM (N,N-bis[2-((methacryloyl)oxy)ethyl]-N,N,N,N-tetramethyl-N,N-dodecyl diammoniumbromide),DDE (N,N -bis[2-((methacryloyl)oxy)ethyl]-N,N,N,N -tetraethyl-N,N -dodecyl diammonium bromide) DDMAPMA (N,N'-bis((4-methacryloyl)amino)phenyl-N,N,N',N'-tetramethyl-N,N'-dodecyl diammonium bromide) ve DDPyMMA bis[4-(((2-methylacryloyl)amino)methyl)-1,12-dodecyl dipyridinium bromide) diş hekimliği alanında kullanılabilecek umut verici bakterisidal ajanlar olarak tanımlanmıştır.

Antibakteriyel Dimetilaminododesil Metakrilat monomeri içeren, düşük polimerizasyon büzülmesine sahip kompozit rezin geliştirilen bir çalışmada (Alhussein & ark., 2023) kompozit rezine %3 DMADDM (dimethylaminododecyl methacrylate) ilavesinin,

mekanik özelliklerden ödün vermeden sekonder çürüklerle ilişkili olan *S. mutans* biyofilmlerine karşı güçlü bir antibakteriyel etki sağladığı bulunmuştur. Bu bulgular, DMADDM içeren düşük polimerizasyon büzülmeli kompozitlerin sekonder çürükleri önlemede ve restorasyonun klinik ömrünü artırmada umut verici olduğunu ortaya koymaktadır.

Huş ağacından elde edilen Betulin türevi metakrilatların antibakteriyel monomer olarak dental kompozitlerde kullanımını konu alan başka bir araştırmada (Zhang& ark., 2021) , M1Bet ve M2Bet sentezlenmiş; restoratif malzemeler için Bis-GMA/TEGDMA esaslı kompozitlere antibakteriyel monomer olarak dahil edilmiştir. Bis-GMA' nın M1Bet ve M2Bet ile kısmi olarak (Ağırlıkça %10) değiştirilmesiyle elde edilen 1M2Bet4B5T kompoziti, mekanik özelliklerden ödün vermeden *S. mutans*' a karşı en iyi antibakteriyel aktiviteyi göstermiştir. Bu çalışma, doğal ürünler temelinde antibakteriyel monomerlerin tasarımına dair yeni bakış açıları sunmasına rağmen, uzun vadeli antibakteriyel özellikleri değerlendirebilmek amacıyla, diş hekimliği ve biyomedikal alanlarda daha fazla çalışmaya ihtiyaç olduğu vurgulanmıştır.

Sonuç

Günümüz diş hekimliğinde alternatif monomer tasarımı, dental rezin kompozitleri yalnızca restore eden bir malzeme olarak değerlendirmekle kalmayıp, aynı zamanda biyofilm oluşumunu sınırlayan, büzülme gerilimini düşüren, ağız koşullarında bozunmaya dirençli ve gerektiğinde remineralizasyon kapasitesi taşıyan çok işlevli malzemeler haline dönüştürmenin etkili bir yolu olarak görülmektedir. Literatürde sıklıkla mekanik dayanım, polimerizasyon verimi, işlenebilirlik veya uzun dönem stabilite gibi parametreler araştırılmış, farklı formülasyonların matriks içeriğini ve dolayısıyla kompozitin mekanik ve fizikokimyasal yapısını değişen düzeylerde etkilediği görülmüştür. Geleneksel metakrilat

esaslı sistemlerin sınırlılıkları, yeni nesil monomerlerin senteziyle aşılmaya çalışılmakta olup, alternatif monomer tasarımları dental kompozitlerin klinik performansını iyileştirme yönünde önemli bir potansiyele sahiptir. Bununla birlikte, bu yeni materyallerin uzun vadeli biyouyumluluğu, polimerizasyon davranışları ve mekanik dayanıklılıkları henüz tam olarak aydınlatılamamış olup, bu alanlarda daha derinlemesine ve sistematik araştırmalara ihtiyaç duyulmaktadır.

Kaynakça

Alhussein, A., Alsahafi, R., Wang, X., Mitwalli, H., Filemban, H., Hack, G. D., Xu, H. H. (2023). Novel Dental Low-Shrinkage-Stress Composite with Antibacterial Dimethylaminododecyl Methacrylate Monomer. *Journal of Functional Biomaterials*, 14(7), 335.

Asmussen, E., & Peutzfeldt, A. (1998). Influence of UEDMA, BisGMA and TEGDMA on selected mechanical properties of experimental resin composites. *Dental Materials*, 14(1), 51-56.

Catel, Y., Fässler, P., Fischer, U., Gorsche, C., Liska, R., Schörpf, S., . . . Moszner, N. (2018). Synthesis and polymerization of vinylcyclopropanes bearing urethane groups for the development of low-shrinkage composites. *European Polymer Journal*, 98, 439-447.

Dai, S., Zhou, W., Duan, L., Tang, K., Yang, Z., Cao, R., . . . Chen, J. (2024). High-Performance Dental Resins Containing a Starburst Monomer. *Journal of dental research*, 103(5), 536-545.

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

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

Fugolin, A. P., de Paula, A. B., Dobson, A., Huynh, V., Consani, R., Ferracane, J. L., & Pfeifer, C. S. (2020). Alternative monomer for BisGMA-free resin composites formulations. *Dental materials*, 36(7), 884-892.

Gariani, R. A., Wodtke, F., Boll, F. G., Xavier, F. R., & Meier, M. M. (2023). New dimethacrylate monomers based on phenolphthalein and resveratrol for the application of dental materials. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 140, 105701.

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

González-López, J. A., Pérez-Mondragón, A. A., Cuevas-Suárez, C. E., González, S. C. E., & Herrera-González, A. M. (2020). Dental composite resins with low polymerization stress based on a new allyl carbonate monomer. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 110, 103955.

Gouveia, Z., Finer, Y., & Santerre, J. P. (2025). Development of Functional and Hydrolytically Stable Vinyl Monomers as Methacrylate Dental Resin Restorative Alternatives. *Advanced Healthcare Materials*, 14(7), 2403427.

He, J., Garoushi, S., Säilynoja, E., Vallittu, P., & Lassila, L. (2021). Surface integrity of dimethacrylate composite resins with low shrinkage comonomers. *Materials*, 14(7), 1614.

He, J., Garoushi, S., Säilynoja, E., Vallittu, P. K., & Lassila, L. (2019). The effect of adding a new monomer “Phene” on the polymerization shrinkage reduction of a dental resin composite. *Dental Materials*, 35(4), 627-635.

He, J., & Kopperud, H. M. (2018). Preparation and characterization of Bis-GMA-free dental composites with dimethacrylate monomer derived from 9, 9-Bis [4-(2-hydroxyethoxy) phenyl] fluorene. *Dental Materials*, 34(7), 1003-1013.

He, J., Lassila, L., Garoushi, S., & Vallittu, P. Tailoring the monomers to overcome the shortcomings of current dental resin composites-Review. *Biomater Investig Dent* 2023; 10 (1): 2191621. In.

He, X., Ye, L., He, R., He, J., Ouyang, S., & Zhang, J. (2022). Antibacterial dental resin composites (DRCs) with synthesized bis-quaternary ammonium monomethacrylates as antibacterial agents.

Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 135, 105487.

Jun, S.-K., Cha, J.-R., Knowles, J. C., Kim, H.-W., Lee, J.-H., & Lee, H.-H. (2020). Development of Bis-GMA-free biopolymer to avoid estrogenicity. *Dental Materials*, 36(1), 157-166.

Kilambi, H., Cramer, N. B., Schneidewind, L. H., Shah, P., Stansbury, J. W., & Bowman, C. N. (2009). Evaluation of highly reactive mono-methacrylates as reactive diluents for BisGMA-based dental composites. *Dental Materials*, 25(1), 33-38.

Lamparth, I., Wottawa, D., Angermann, J., Fässler, P., Liska, R., & Catel, Y. (2021). Synthesis of allyl sulfones bearing urethane groups as efficient addition-fragmentation chain transfer agents for the development of low-shrinkage composites. *European Polymer Journal*, 158, 110672.

Liu, X., Wang, Z., Zhao, C., Bu, W., Zhang, Y., & Na, H. (2018). Synthesis, characterization and evaluation of a fluorinated resin monomer with low water sorption. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 77, 446-454.

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

Luo, S., Liu, F., & He, J. (2019). Preparation of low shrinkage stress dental composite with synthesized dimethacrylate oligomers. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 94, 222-228.

Moreira, M. M., da Silva, A. L., Pereira, R. d. C. S., da Silva, L. R. R., Feitosa, V. P., & Lomonaco, D. (2024). Effect of replacing Bis-GMA with a biobased trimethacrylate on the physicochemical and

mechanical properties of experimental resin composites. *Clinical Oral Investigations*, 28(11), 578.

Moszner, N., Fischer, U. K., & Angermann, J. (2016). New diluents for dental composites. *Macromolecular Materials and Engineering*, 301(6), 750-759.

Peer, G., Kury, M., Gorsche, C., Catel, Y., Frühwirt, P., Gescheidt, G., . . . Liska, R. (2020). Revival of cyclopolymerizable monomers as low-shrinkage cross-linkers. *Macromolecules*, 53(19), 8374-8381.

Pérez-Mondragón, A. A., Cuevas-Suárez, C. E., González-López, J. A., Trejo-Carbajal, N., Meléndez-Rodríguez, M., & Herrera-González, A. M. (2020). Preparation and evaluation of a BisGMA-free dental composite resin based on a novel trimethacrylate monomer. *Dental Materials*, 36(4), 542-550.

Salazar, A., Anderson, N., & Stansbury, J. (2025). Formulating Mechanically Robust Composite Restorative Materials for High Performance. *Journal of Functional Biomaterials*, 16(3), 101.

Silva, J. D. S., de Almeida, L. N., Machado, A. S., de Torres, É. M., de Souza Gil, E., Gonçalves, C., . . . Lopes, L. G. (2024). Novel matrix formulation for resin composite: Chemical and biomechanical characterization—Part 1. *Dental Materials*, 40(11), e53-e62.

Srivastava, R., Liu, J., He, C., & Sun, Y. (2018). BisGMA analogues as monomers and diluents for dental restorative composite materials. *Materials Science and Engineering: C*, 88, 25-31.

Sun, Y., Zhou, Z., Jiang, H., Duan, Y., Li, J., Liu, X., . . . Zhao, C. (2022). Preparation and evaluation of novel bio-based Bis-GMA-free dental composites with low estrogenic activity. *Dental Materials*, 38(2), 281-293.

Szczesio-Wlodarczyk, A., Domarecka, M., Kopacz, K., Sokolowski, J., & Bociong, K. (2021). An evaluation of the properties of urethane dimethacrylate-based dental resins. *Materials*, 14(11), 2727.

Tauscher, S., Catel, Y., Fässler, P., Fischer, U., & Moszner, N. (2017). Development of low-shrinkage composites based on novel crosslinking vinylcyclopropanes. *Journal of Applied Polymer Science*, 134(48), 45577.

Vasudeva, G. (2009). Monomer systems for dental composites and their future: a review. *Journal of the California Dental Association*, 37(6), 389-398.

Wang, X., Huyang, G., Palagummi, S. V., Liu, X., Skrtic, D., Beauchamp, C., . . . Sun, J. (2018). High performance dental resin composites with hydrolytically stable monomers. *Dental Materials*, 34(2), 228-237.

Wang, Y., Costin, S., Zhang, J.-f., Liao, S., Wen, Z. T., Lallier, T., . . . Xu, X. (2018). Synthesis, antibacterial activity, and biocompatibility of new antibacterial dental monomers. *American Journal of Dentistry*, 31(SP IS B), 17B.

Wu, Z., Sun, K., Wang, W., Xue, Q., Tonin, B. S., Watts, D. C., . . . Wang, H. (2024). Characterization of dental light-curing resin composites incorporating multiple modified low-shrink monomers. *Dental Materials*, 40(8), 1244-1251.

Yoshinaga, K., Yoshihara, K., & Yoshida, Y. (2021). Development of new diacrylate monomers as substitutes for Bis-GMA and UDMA. *Dental Materials*, 37(6), e391-e398.

Yu, B., He, J., Garoushi, S., Vallittu, P. K., & Lassila, L. (2021). Enhancing toughness and reducing volumetric shrinkage for Bis-GMA/TEGDMA resin systems by using hyperbranched thiol oligomer HMDI-6SH. *Materials*, 14(11), 2817.

Zhang, L., Ma, Z., Wang, R., & Zhu, M. (2021). Synthesis and characterization of methacrylate-functionalized betulin derivatives as antibacterial comonomer for dental restorative resins. *ACS Biomaterials Science & Engineering*, 7(7), 3132-3140.

Zhou, Z., Li, A., Sun, K., Guo, D., Li, T., Lu, J., . . . Wang, T. (2024). Synthesis of a novel monomer “DDTU-IDI” for the development of low-shrinkage dental resin composites. *Dental Materials*, 40(4), 608-618.

Zimmerli, B., Strub, M., Jeger, F., Stadler, O., & Lussi, A. (2010). Composite materials: composition, properties and clinical applications. A literature review. *Schweizer Monatsschrift fur Zahnmedizin= Revue Mensuelle Suisse D'odonto-Stomatologie= Rivista Mensile Svizzera di Odontologia e Stomatologia*, 120(11), 972-986.

