

EDİTÖR

Doç. Dr. Nihat LAÇIN

Alanında Araştırmalar
ve Değerlendirmeler

DİŞ HEKİMLİĞİ

Haziran 2025

İmtiyaz Sahibi • Yaşar Hız
Genel Yayın Yönetmeni • Eda Altunel
Yayına Hazırlayan • Gece Kitaplığı
Editör • Doç. Dr. Nihat LAÇİN

Birinci Basım • Haziran 2025 / ANKARA

ISBN • 978-625-388-428-4

© copyright

Bu kitabın yayın hakkı Gece Kitaplığı'na aittir.
Kaynak gösterilmeden alıntı yapılamaz, izin almadan
hiçbir yolla çoğaltılamaz.

Gece Kitaplığı

Adres: Kızılay Mah. Fevzi Çakmak 1. Sokak Ümit Apt
No: 22/A Çankaya/ANKARA Tel: 0312 384 80 40

www.gecekitapligi.com
gecekitapligi@gmail.com

Baskı & Cilt
Bizim Buro
Sertifika No: 42488

Diş Hekimliği Alanında Araştırmalar ve Değerlendirmeler

Haziran 2025

Editör:
Doç. Dr. Nihat LAÇİN

İÇİNDEKİLER

BÖLÜM 1

DİŞ HEKİMLİĞİNDE NANOTEKNOLOJİNİN KULLANIM ALANLARI VE KLİNİK YANSIMALARI

Adem ÖZTÜRK, Elif Nur TAŞGIN1

BÖLÜM 2

ENDODONTİDE İRRİGASYON: KLASİK YAKLAŞIMLARDAN MODERN AKTİVASYON TEKNİKLERİNE

Ömer ÖZKILIÇ, Gamze DURAK ÖZKILIÇ25

BÖLÜM 3

DEJENERATİF TEMPOROMANDİBULAR EKLEM HASTALIKLARINDA MULTİDİSİPLİNER YAKLAŞIMLAR

Serkan BAHRİLLİ, Fatma ALTIPARMAK43



BÖLÜM

1

DİŞ HEKİMLİĞİNDE NANOMALZEMELERİN KULLANIM ALANLARI VE KLİNİK YANSIMALARI

Adem ÖZTÜRK¹

Elif Nur TAŞGIN²

1 Endodonti Uzm. Dt. Selçuk Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi 0009-0008-5512-8729

2 Pedodonti Uzm. Dt. Kocaeli Darıca Ağız ve Diş Sağlığı Merkezi 0009-0000-6441-5035

GİRİŞ

Nanoteknoloji, malzemelerin atom ve moleköl düzeyinde kontrol edilerek işlevlendirilmesini mümkün kılan yenilikçi bir bilim dalıdır. Son yıllarda tıpta ve biyomedikal alanda hızla gelişen bu teknoloji, diş hekimliğinde de önemli uygulama alanları bulmuştur (Malik & Waheed, 2023). Tanıdan tedaviye kadar uzanan geniş bir yelpazede nanoteknolojik yaklaşımlar; daha dayanıklı restoratif materyallerin geliştirilmesi, antimikrobiyal etkili yüzeylerin oluşturulması, biyoyumlu ilaç taşıyıcı sistemlerin tasarlanması ve rejeneratif tedavilere uygun hücre dostu yapılar sunulması gibi pek çok avantaj sağlamaktadır (AlKahtani, 2018; Bapat et al., 2018). Özellikle gümüş, hidroksiapatit ve silika gibi nanoyapılı bileşenlerin kullanımıyla hem biyolojik performans artırılmakta hem de enfeksiyon kontrolünde önemli başarılar elde edilmektedir (Jandt & Watts, 2020). Diş hekimliğinde nanoteknolojinin entegrasyonu, klinik başarının artırılması ve hastaya özgü çözümler sunulması açısından dikkat çekici bir potansiyel taşımaktadır. Bu bağlamda, nanoteknolojik materyal ve uygulamaların güncel durumu; literatürde bildirilen avantajları, sınırlılıkları ve olası biyolojik etkileri ışığında değerlendirilmektedir (Acharya et al., 2022).

Nanomalzemelerin yüksek yüzey/hacim oranı, biyolojik sistemlerle daha güçlü ve kontrollü etkileşim kurmalarına olanak tanımaktadır. Bu özellik, diş hekimliğinde kullanılan nano boyuttaki yapıların klasik formlara kıyasla daha iyi doku penetrasyonu, artmış biyoyumluluk ve uzun süreli antimikrobiyal etki gibi avantajlar sunmasına katkı sağlamaktadır. Örneğin, nano-hidroksiapatit (nHA) partikülleri, diş dokularının doğal mineral yapısıyla uyumlu olup, mine ve dentin yüzeylerinde remineralizasyonu destekler. Nitekim, nHA içeren diş macunlarının erken çürük lezyonlarının remineralizasyonunda etkili olduğunu gösteren çeşitli çalışmalar mevcuttur (Huang et al., 2009; Najibfard et al., 2011). Bununla birlikte, nano-gümüş partikülleri de kök kanalı sistemlerinde dirençli mikroorganizmalar üzerinde etkili bir dezenfeksiyon sağlayarak, diş hekimliğinde geniş bir kullanım alanı bulmaktadır (Yin et al., 2024). Nanoteknoloji, yalnızca materyal bazlı yenilikler sunmakla kalmayıp, biyolojik süreçleri doğrudan etkileyen çok boyutlu bir tedavi stratejisi olarak diş hekimliğinde giderek daha fazla yer edinmektedir.

1. Endodonti Alanında Nanoteknolojinin Kullanımı

Endodonti uygulamalarında nanoteknolojinin sağladığı yenilikler, enfekte kök kanallarının dezenfeksiyonu ve doldurulması gibi zorlu işlemlerin etkinliğini artırmayı hedeflemektedir (Mierzejewska et al., 2024). Nanopartiküller, boyutları ve geniş yüzey alanları sayesinde kök kanallarının karmaşık anatomisine daha iyi nüfuz ederek mikroorganiz-

maları etkili bir şekilde elimine edebilir (Chandak et al., 2021). Örneğin, gümüş nanopartiküller (AgNP) güçlü antimikrobiyal özellikleriyle dikkat çekmektedir; *Enterococcus faecalis* ve *Candida albicans* gibi kök kanal enfeksiyonlarına sık yol açan patojenleri inhibe edebildiği ve kök kanalında biyofilm oluşumunu engellediği deneysel çalışmalarda gösterilmiştir (Chávez-Andrade et al., 2019; Wu et al., 2014). Ayrıca AgNP'lerin kök kanal irrigasyon solüsyonlarına eklenmesi, yalnızca antimikrobiyal etki sağlamakla kalmayıp aynı zamanda smear tabakasının uzaklaştırılmasında da etkili olmaktadır. Martinez-Andrade ve arkadaşlarının (2018) çalışmasında, %17 EDTA'ya gümüş nanopartiküller eklenerek oluşturulan solüsyonun hem antimikrobiyal etkinlik gösterdiği hem de smear tabakasının uzaklaştırılmasında EDTA ile benzer bir performans sergilediği raporlanmıştır (Martinez-Andrade et al., 2018). Bununla birlikte, %0,02 konsantrasyonda gümüş nanopartikül içeren jelin medikament olarak kullanılması, laboratuvar koşullarında oluşturulan *E. faecalis* biyofilmlerini yedi günlük uygulama sonunda neredeyse tamamen ortadan kaldırmayı başarmıştır (Wu et al., 2014).

Nanopartiküller, geleneksel dezenfektanlara karşı direnç geliştirebilen kök kanalı mikroorganizmalarına karşı alternatif bir antimikrobiyal ajan olarak dikkat çekmektedir. Küçük boyutları sayesinde dentin tübüllerine derinlemesine nüfuz edebilmeleri, özellikle *E. faecalis* gibi inatçı patojenlerin eliminasyonunda etkili olmalarını sağlamaktadır (Mierzejewska et al., 2024). Üstelik nanopartiküller yalnızca dezenfeksiyon amacıyla değil, aynı zamanda intrakanal ilaç taşıyıcısı veya dolgu/sealer materyallerinin içeriğine dahil edilerek de endodontide çeşitli şekillerde kullanılabilir. Nanoteknolojik taşıyıcı sistemler sayesinde ilaçlar, nanoboyutlu yapılar içerisinde kök kanalına uygulanarak dentin tübülleri içinde daha etkin dağılım ve kontrollü salım sağlayabilmekte, bu da mikrobiyal eliminasyonu artırarak tedavinin başarısını olumlu yönde etkilemektedir (Mierzejewska et al., 2024). Örneğin, kalsiyum hidroksit ve klorheksidin gibi ajanların nanopartikül formda uygulanması, dentin tübüllerine daha etkin penetre olmalarını sağlayarak kalıcı antimikrobiyal etki potansiyelini artırmaktadır. Ayrıca, bazı kök kanal patları ve sealerları, gümüş veya çinko oksit nanopartikülleri (AgNP, ZnO-NP) ile modifiye edilerek geliştirilmiştir. Bu tür modifikasyonların, materyallerin hem uzun dönem sızdırmazlığını artırdığı hem de *E. faecalis* gibi dirençli mikroorganizmalara karşı antimikrobiyal özellik kazandırdığı gösterilmiştir. Özellikle gümüş nanoparçacıklar içeren sealerların dolgu sonrası yeniden enfeksiyon riskini azalttığı ve uzun süreli antibakteriyel koruma sağladığı bildirilmiştir (Afkhami et al., 2023).

Endodontide nanoteknolojinin umut vadeden bir diğer kullanım alanı ise rejeneratif endodonti ve doku mühendisliği uygulamalarıdır. Özellikle

nekrotik pulpalı genç daimi dişlerde kök gelişiminin devamını hedefleyen rejeneratif protokollerde, nanofiber yapıları iskele sistemleri ve nanopartikül bazlı büyüme faktörü taşıyıcıları dikkat çekmektedir. Bu tür nanoyapılı yapılar, hücrelerin yapışması, proliferasyonu ve farklılaşması için uygun bir mikroçevre oluşturarak pulpa dokusunun yeniden oluşumunu teşvik edebilir. Nitekim, nanofiber iskelelerin hücre farklılaşmasını ve mineralize doku oluşumunu desteklediği; ayrıca mezenkimal kök hücrelerle yüklü bu iskelelerin pulpa-dentin kompleksinin yeniden yapılandırılmasında etkili olabileceği gösterilmiştir (Huang et al., 2022). Benzer şekilde, biyomalzeme temelli nano-ölçekli iskelelerin, büyüme faktörü salımlı bir şekilde hücre davranışlarını düzenleyerek rejeneratif endodontik terapilere önemli katkılar sunduğu da bildirilmiştir (Raddall et al., 2019). Yapılan bir hayvan çalışmasında ise mezo gözenekli silika nanoparçacıklar (MSN) içeren iskelelerin, büyüme faktörü (BMP-2) ile desteklenerek nekrotik pulpalı genç dişlerde kök uzamasını ve dentin oluşumunu önemli ölçüde artırdığı bildirilmiştir. Bu nanoyapılı iskeleler, geleneksel kan pıhtısı yöntemine kıyasla kök gelişimi ve doku iyileşmesinde belirgin üstünlük sağlamıştır (Talaat et al., 2024).

Tüm bu bulgular, nanoteknolojinin endodontide enfeksiyon kontrolünden doku rejenerasyonuna kadar geniş bir yelpazede yenilikçi çözümler sunduğunu ortaya koymaktadır (Mierzejewska et al., 2024). Ancak bu teknolojilerin klinik uygulamalara güvenle entegre edilebilmesi için, uzun vadeli biyouyumluluklarının ve olası toksik etkilerinin ayrıntılı olarak değerlendirilmesi gerekmektedir. Örneğin, gümüş nanopartiküller güçlü antimikrobiyal etkilerine rağmen dokularda renklenmeye (grileşme) yol açabilmektedir. Bu sorunu gidermek amacıyla AgNP'lerin potasyum iyodür ile kombine kullanımı önerilmiş, ancak bu yöntemin etki süresinin kısıllığı ve dentine bağlanan restoratif materyallerin bağlanma dayanımını azaltması gibi bazı dezavantajları olduğu bildirilmiştir (Roberts et al., 2020). Bu nedenle, nanomalzemelerin endodontik uygulamalardaki uzun dönem etkilerini ve güvenliğini değerlendiren ileri düzey klinik çalışmalara ihtiyaç vardır (Mierzejewska et al., 2024).

2. Ağız, Diş ve Çene Cerrahisi Alanında Nanoteknoloji Kullanımı

Ağız, Diş ve Çene Cerrahisi alanında nanoteknolojinin en belirgin katkısı, dental implantların yüzey modifikasyonları ve kemik rejenerasyonu amaçlı biyomalzemelerin geliştirilmesidir. Dental implantların yüzeyinde nano ölçekte yapılan değişiklikler, kemik hücrelerinin tutunmasını ve osseointegrasyonu hızlandırarak implant başarısını artırmaktadır (Marasli et al., 2024). Geleneksel implant yüzeyleri genellikle mikrometre düzeyinde pürüzlendirilerek hücre tutunması artırılmaya çalışılmıştır. Ancak güncel araştırmalar, implant yüzeyine entegre edilen nanoyapıların

örneğin, elektrokimyasal anodizasyon yoluyla elde edilen titanyum dioksit nanotüpler (TiO_2 nanotubes) ve hidroksiapatit (HA) nanopartiküller ile oluşturulan nanoboyutlu kaplamaların osseointegrasyonu daha da güçlendirdiğini ortaya koymuştur. Bu nanoyapılar, hücre adezyonunu, proliferasyonunu ve farklılaşmasını teşvik ederek implant çevresi kemik dokusunun biyolojik entegrasyonunu optimize etmekte ve implant başarısını artırmaktadır (Marasli et al., 2024).

Titanyum dioksit nanotüpler (TNT), implant yüzeyine elektrokimyasal anodizasyon ile oluşturulan ve bir nanotüp topografyası sağlayan yapılar olup, kemik hücre göçü ve farklılaşmasını teşvik etmede etkili bulunmuştur. TNT yüzeyler, sadece kemik hücrelerinin adezyonunu artırmakla kalmaz; aynı zamanda bu nanotüplerin içine çeşitli büyüme faktörleri veya ilaçlar da yerleştirilebilmektedir. Örneğin, TNT içine kemik morfogenetik protein-2 (BMP-2) yüklenmesi, implant çevresi kemik oluşumunu anlamlı derecede hızlandırmıştır (Lee et al., 2015). Benzer şekilde, titanyum dioksit nanotüplerin (TiO_2 nanotüpler) yüzeyine hidroksiapatit (HA) nanopartiküllerinin sol-jel yöntemiyle uygulanması, implant yüzeyinde biyomimetik bir mineral tabakanın oluşmasını sağlamaktadır. Literatürde bu yöntemin implant uygulamalarında kullanımının yüzeyde apatit birikimini hızlandırdığı ve biyouyumluluğu artırdığı rapor edilmiştir. HA kaplı nanotüp yüzeylerin, osteoblastik hücre adezyonunu ve kemik benzeri doku oluşumunu destekleyerek implant çevresi kemik iyileşmesini kolaylaştırabileceği gösterilmiştir. Bu tür nanoyapılı kaplamaların, özellikle erken dönemde implantın stabilitesini artırma potansiyeline sahip olduğu düşünülmektedir (Lim et al., 2018).

Nanoteknolojik yüzey modifikasyonlarının bir diğer boyutu, implant materyallerine antimikrobiyal ajanların entegre edilmesidir. Özellikle titanyum implant yüzeyine gümüş nanoparçacıkların (AgNP) kaplanması, peri-implant bölgedeki mikrobiyal kolonizasyonu önlemek amacıyla dikkat çekici bir strateji olarak değerlendirilmektedir. Madiwal ve Rajwade (2024) tarafından yapılan çalışmada, gümüş kaplı titanyum yüzeylerin başta *Streptococcus oralis*, *Streptococcus sanguinis*, *Aggregatibacter actinomycetemcomitans* ve *Porphyromonas gingivalis* olmak üzere çeşitli peri-implant patojenlerin tutunmasını anlamlı ölçüde azalttığı gösterilmiştir. Ayrıca bu yüzeylerin osteoblastik hücrelerle yüksek düzeyde biyouyumluluk gösterdiği de bildirilmiştir. Bu bulgular, gümüş kaplı implantların hem antimikrobiyal etkinlik hem de doku uyumu açısından potansiyel taşıdığını ortaya koymaktadır (Madiwal & Rajwade, 2024).

Bununla birlikte, nanopartiküllerin çevre dokulara salınması durumunda biyouyumluluk önemli bir konu haline gelmektedir. Özellikle 20 nm'den küçük gümüş nanoparçacıkların (AgNP'ler), insan periodontal ligament fibroblastlarında doza ve zamana bağlı olarak sitotoksisiteye yol

açabileceği bildirilmiştir. Hernández-Sierra ve arkadaşlarının yaptığı bir in vitro çalışmada, 15–20 nm boyutundaki AgNP’lerin 24 saatten 7 güne kadar olan maruziyet sürelerinde hücre canlılığını anlamlı şekilde azalttığı gösterilmiştir. Öte yandan, 80–100 nm boyutundaki AgNP’lerin aynı koşullarda hücre canlılığı üzerinde belirgin bir etkisi olmadığı rapor edilmiştir (Hernández-Sierra et al., 2011).

Kemik rejenerasyonu açısından bakıldığında, nanoteknoloji destekli greft materyalleri ve iskeleler, oral cerrahinin vazgeçilmez unsurları arasında yer almaktadır. Bu materyaller arasında, kemiğin mineral yapısına benzerliği ve biyouyumluluğu nedeniyle nanokristalin hidroksiapatit (nHA) öne çıkmaktadır. nHA’nın nanometre boyutlu kristaller hâlinde sunulması, greftin osteojenik potansiyelini artırarak kemik rejenerasyonunu desteklemektedir. Shaheen (2022) tarafından yapılan sistematik derlemede, nHA’nın periodontal kemik defektlerinin tedavisinde konvansiyonel greft materyalleri kadar başarılı sonuçlar verdiği ve klinik ile radyografik parametrelerde anlamlı iyileşmeler sağladığı belirtilmiştir. Nanoyapılı greftler, geniş yüzey alanları sayesinde büyüme faktörlerini ve hücreleri üzerinde taşıyabilir; böylece kemik iyileşmesinin biyolojisini olumlu yönde etkileyebilir (Shaheen, 2022).

Biyoaktif cam nanopartikülleri içeren kompozit membranlar veya iskeleler, kemik defektlerinde hem mekanik destek sağlamakta hem de biyoaktivite göstererek kemik oluşumunu uyarmaktadır. Örneğin, kitosan membranlara eklenen nanoboyutlu biyoaktif camın, membranın mekanik dayanımını bir miktar azaltsa da, yapay vücut sıvısında apatitle kaplanma ve osteoblastik hücre aktivitesini artırma yönünde belirgin faydalar sağladığı bulunmuştur (Sohrabi et al., 2020). Benzer şekilde, kitosan nanopartiküllerine platelet kaynaklı büyüme faktörü (PDGF) yüklenip kollajen iskelelerle uygulandığında, bu büyüme faktörünün 28 gün boyunca kontrollü salınımı sağlanmış ve periodontal doku mühendisliğinde hücre proliferasyonunu destekleyen üç boyutlu bir ortam oluşturulmuştur (Raftery et al., 2015).

3. Restoratif Diş Hekimliğinde Nanoteknoloji

Diş çürüklerinin tedavisi ve diş dokusunun restorasyonunda kullanılan materyaller, nanoteknolojinin sağladığı gelişmelerle önemli ölçüde iyileştirilmiştir. Restoratif rezin kompozitler, diş estetiğini ve fonksiyonunu yeniden kazandırmada yaygın olarak tercih edilen materyaller olup, nanoteknoloji bu kompozitlerin hem mekanik hem de biyolojik özelliklerini geliştirme potansiyeline sahiptir. Geleneksel kompozitlerde yer alan dolgu partikülleri mikrometre ölçeğinde iken, nano dolgulu kompozitlerde (nanofill veya nanohibrit kompozitler) bu partiküller 20–100 nm aralığına

kadar küçültülmüştür. Bu sayede materyalin aşınma direnci, polisaj sonrası yüzey düzgünlüğü ve mekanik dayanımı anlamlı düzeyde artış göstermektedir (Hamouda & Abd Elkader, 2012; Han et al., 2012). Nanometrik boyuttaki silika veya zirkonya partikülleri, rezin matrisine daha homojen biçimde dağılabilmekte ve yüksek oranda yüklenebilmektedir. Bunun sonucunda, nanokompozitler hem parlatılabilirliği hem de parlaklık koruma açısından üstünlük sergilemekte hem de yüksek dolgu oranı sayesinde sıkışma direnci ile elastik modülü artırmaktadır. Han ve arkadaşlarının gerçekleştirdiği bir çalışmada, nanodoldurucu içeren kompozit rezinlerin, mikrohibrit kompozitlere kıyasla daha düşük yüzey pürüzlülüğü ve daha homojen aşınma yüzeyleri oluşturduğu bildirilmiştir (Han et al., 2012).

Nanoteknolojinin restoratif materyallere sağladığı bir diğer önemli katkı ise antibakteriyel ve remineralize edici özelliklere sahip restorasyonların geliştirilmesidir. Sekonder çürük oluşumu, kompozit restorasyonların uzun dönem başarısını kısıtlayan temel nedenlerden biri olarak öne çıkmaktadır (Melo et al., 2013). Bu sorunun önlenmesi amacıyla restoratif materyallere çeşitli antimikrobiyal nanopartiküllerin ilavesi gündeme gelmiştir. Gümüş nanopartiküller (AgNP), bu alanda en yaygın şekilde araştırılan ajanlar arasında yer almaktadır. Nanogümüşün, bakteri hücre duvarı ve membran yapısını bozarak, aynı zamanda iyon salımı yoluyla metabolik süreçleri etkileyerek *Streptococcus mutans* gibi çürük etkenlerine karşı yüksek düzeyde antibakteriyel etki gösterdiği rapor edilmiştir (Yin et al., 2020). AgNP'lerin antibakteriyel etkisi; hücre membranı bütünlüğünün bozulması, protein fonksiyonlarının inhibisyonu ve DNA replikasyonunun engellenmesi gibi çeşitli mekanizmalarla ilişkilendirilmektedir (Rai et al., 2009). Kompozit rezinlere gümüş nanoparçacık ilavesi üzerine yapılan pek çok çalışmada, bu modifikasyonun *S. mutans* biyofilmi oluşumunu anlamlı ölçüde azalttığı ortaya konmuştur. Örneğin, %5 oranında haloisit nanotüp içerisine yüklenen AgNP'ler ile oluşturulan hibrit dolgu sisteminin, kompozit yapıya eklendiğinde hem *S. mutans*'a karşı anlamlı antibakteriyel aktivite sağladığı hem de eğilme dayanımı ve basma direnci gibi mekanik özellikleri geliştirdiği bildirilmiştir (Barot et al., 2020).

Benzer biçimde, çinko oksit nanoparçacıkları (ZnO-NP) da restoratif materyallere geniş spektrumlu antimikrobiyal özellik kazandırmak amacıyla kullanılmaktadır. ZnO nanoparçacıklarının beyaz renkte olması ve yüksek biyouyumluluk sunması, estetik restorasyonlarda kullanımını desteklemektedir. Bu nanoparçacıklar, bakteri hücre zarına bağlanarak membran bütünlüğünü bozar ve aynı zamanda reaktif oksijen türleri oluşturarak bakterisidal etki göstermektedir. Ancak, ZnO nanopartiküllerin doğrudan yüksek oranlarda kompozitlere eklenmesi, materyalin mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Bu sınırlılığı aşmak amacıyla ZnO NP'ler selüloz nanokristaller ile birleştirilerek hibrit nanodoldurucular ge-

liştirilmiştir. Nitekim, %0,1–0,5 aralığında ZnO içeren nanokompozitlerin hem *S. mutans* popülasyonunu anlamlı ölçüde azalttığı hem de materyalin dayanıklılığını koruduğu saptanmıştır. Wang ve arkadaşlarının 2018 yılında gerçekleştirdiği bir çalışmada, selüloz nanokristal/ZnO hibritlerinin kompozitlere ilavesiyle, yalnızca ZnO içeren sistemlere kıyasla daha yüksek mekanik dayanım ve korunan antibakteriyel etki elde edildiği bildirilmiştir (Wang et al., 2018).

Nanopartiküller, özellikle ağız ortamında pH'nın asidik düzeylere düştüğü durumlarda çözünerek kalsiyum ve fosfat iyonları salmakta; bu durum, başlangıç aşamasındaki mine lezyonlarının remineralizasyonunu desteklemektedir. Xu ve arkadaşları tarafından geliştirilen kalsiyum-fosfat içeren amorf nanopartikül (NACP) katkılı nanokompozitlerin, pH 7'den 4'e düştüğünde iyon salınımını 5–10 kat artırdığı ve bu özellikleriyle akıllı materyaller olarak tanımlandığı belirtilmiştir (Xu et al., 2011). Bu kompozitler, yalnızca restoratif materyalin mekanik dayanıklılığını artırmakla kalmayıp aynı zamanda çürük inhibitör özellikleriyle sekonder çürüklerin önlenmesinde önemli katkılar sunmaktadır. Ayrıca, kuarterner amonyum tuzu içeren nano kapsüller kompozit yapı içerisine entegre edildiğinde, restorasyon yüzeyinde bakteriyel aktivitenin 2–3 log düzeyinde azaldığı ve bu kapsüllerin zamanla yenilenerek uzun süreli antibakteriyel etkinlik sağladığı rapor edilmiştir (Ge et al., 2015).

Aynı şekilde, mesoporöz silika nanopartiküller içerisine çürük önleyici ajanların (örneğin çinko) doping edilerek kompozitlere entegre edilmesiyle geliştirilen sistemlerin, %15 oranında nanopartikül içeren kompozitlerde %100'e varan antibakteriyel etkinlik sergilediği ve mekanik dayanımın da anlamlı biçimde arttığı ortaya konmuştur (Bai et al., 2020).

Diş adeziv sistemleri (bonding ajanlar) de nanoteknolojiden önemli ölçüde yararlanmıştır. Mikro sızıntının önlenmesi ve bağlanma dayanımının uzun vadede korunması amacıyla, adeziv reçinelere nano dolgu partikülleri ilave edilmektedir. Özellikle nanoboyutlu silika partikülleri içeren adezivlerin, dentin hibrid tabakasına daha homojen şekilde penetre olduğu, boşluk ya da zayıf bölge oluşturmada bağlanma arayüzünü güçlendirdiği gösterilmiştir. Yapılan bir çalışmada, %10 ve %15 oranlarında nano-silika içeren adezivlerin mikro-gerilim bağlanma dayanımı testlerinde en yüksek ortalama değerlere ulaştığı ve daha yoğun bir hibrid tabaka oluşturduğu bildirilmiştir. Bu bulgular, nano-silika katkılı adeziv sistemlerinin dentinle bağlanma performansını artırabileceğini ve hibrid tabaka oluşumunu iyileştirme potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir (Alhenaki et al., 2021).

4.Periodontoloji Alanında Nanoteknoloji

Periodontoloji, dişleri çevreleyen destek dokuların (dişeti, periodontal ligament ve alveoler kemik) sağlığını inceleyen bir diş hekimliği dalıdır. Bu alanda nanoteknoloji hem periodontal hastalıkların tedavisinde hem de doku rejenerasyonunun desteklenmesinde yenilikçi çözümler sunmaktadır. Periodontal hastalıkların tedavisindeki temel hedef, dişeti ceplerinde yerleşik bakteriyel biyofilmin ortadan kaldırılması ve buna bağlı gelişen inflamatuvar yanıtın kontrol altına alınmasıdır. Bu doğrultuda geliştirilen nanoteknoloji temelli ilaç taşıyıcı sistemler, özellikle antimikrobiyal ve anti inflamatuvar ajanların periodontal ceplere doğrudan ve kontrollü bir şekilde ulaştırılmasını sağlayarak tedavi etkinliğini artırmaktadır (Chen et al., 2022).

İlaçların doğrudan enfekte bölgeye yönlendirilmesi ve kontrollü salım yoluyla uzun süreli etki sağlanması, periodontal tedavide önemli bir terapötik yaklaşımdır. Bu amaca yönelik geliştirilen pH-duyarlı ilaç taşıyıcı sistemler, özellikle periodontal cepler gibi lokal enfeksiyon bölgelerine antibiyotiklerin etkin şekilde ulaştırılmasına olanak tanımaktadır. Marzaman ve arkadaşlarının (2025) gerçekleştirdiği bir çalışmada, kitosan kaplı PLGA mikropartiküller içerisine doksisisiklin yüklenmiş; elde edilen bu formülasyonun hem planktonik bakterilere hem de biyofilm yapısına karşı güçlü antibakteriyel etki gösterdiği, aynı zamanda periodontal ligament kök hücreleriyle biyouyumlu olduğu ortaya konmuştur. Geliştirilen sistemin, düşük pH ortamında ilacı yavaş ve kontrollü şekilde salarak tek uygulamayla uzun süreli tedavi potansiyeli sunduğu belirtilmiştir (Marzaman et al., 2025).

İnorganik nanopartiküller de periodontal tedavilerde, doğrudan antimikrobiyal ajan olarak kullanılabilme potansiyelleri nedeniyle yoğun şekilde araştırılmaktadır. Gümüş (Ag), altın (Au), çinko oksit (ZnO) ve titanyum dioksit (TiO₂) gibi metal ya da metal oksit nanopartiküllerinin, geniş spektrumlu antimikrobiyal etkileri sayesinde periodontitis etkeni bakterilere karşı etkili olduğu gösterilmiştir. Bu nanopartiküller; biyofilm oluşumunu engelleyebilme, mikroorganizma hücre zarlarını bozabilme ve oksidatif stres yoluyla antimikrobiyal etki gösterebilme özellikleriyle dikkat çekmektedir. Ayrıca, bu ajanların diş yüzeyine uygulanabilir formlarda entegre edilebilmesi, periodontal hastalıkların yönetiminde yeni nesil tedavi yaklaşımlarının geliştirilmesine olanak tanımaktadır (Yin et al., 2025).

Bununla birlikte, inorganik nanopartiküllerin olgun biyofilm yapılarına penetrasyonu ve dokularda uzun süreli kalıcılığı hâlâ araştırma konusudur. Bazı nanopartiküllerin yalnızca serbest haldeki bakterilere karşı etkili olduğu, ancak yoğun ekstrasellüler matriksle çevrili olgun biyofilmlere yeterince nüfuz edemediği bildirilmektedir. Bu sorunu aşmak amacıyla,

metal nanopartiküller fototermal veya fotodinamik tedavi sistemlerine entegre edilmektedir. Özellikle altın nanoparçacıklar, ışıkla aktive edilerek lokal ısı üretimi yoluyla bakteriyel hücreleri hedef alan fototermal ajanlar olarak değerlendirilmektedir. Sun ve arkadaşlarının (2022) yaptığı bir çalışmada, altın nanoparçacıklarla modifiye edilmiş titanyum dioksit nanotüplerin sonodinamik terapiyle birlikte uygulanması sonucunda olgun biyofilmlere karşı antibakteriyel etkinliğin belirgin şekilde arttığı gösterilmiştir. Bu yaklaşım, periodontal ve peri-implant enfeksiyonlarda dirençli biyofilmlerin ortadan kaldırılması açısından umut vadeden bir strateji olarak değerlendirilmektedir.

Son yıllarda, titanyum dioksit nanotüplerin yüzeyine tetrasiklin gibi antibiyotiklerin yüklenmesiyle implant çevresinde ilaca dirençli bakterilere karşı hızlı salım ve etkin antimikrobiyal etki sağlanabileceği gösterilmiştir. Bu sistemler, antibiyotiklerin lokal ve kontrollü salımına olanak tanıyarak biyofilm oluşumunu önlemeyi hedeflemektedir. Benzer şekilde, gümüş ile modifiye edilmiş titanyum dioksit nanotüpler (Ag-TiO_2 nanokompozitleri), hem gümüşün güçlü antimikrobiyal etkisinden hem de titanyumun biyouyumlu yüzey özelliklerinden yararlanarak diş yüzeylerinde bakteri kolonizasyonunu ve biyofilm gelişimini etkili şekilde baskılamıştır. Ancak bu inorganik nanoyapıların periodontal dokular üzerindeki güvenliği hâlâ araştırılmaktadır. Özellikle periodontal ligament fibroblastları ve osteoblastlar gibi hücreler üzerinde olası sitotoksik etkileri ayrıntılı şekilde incelenmekte olup, bu materyallerin klinik uygulamaya geçmeden önce biyolojik sınırlarının net biçimde belirlenmesi gerekmektedir (Sun et al., 2022).

Periodontal hastalıklarda nanoteknolojinin öne çıktığı bir diğer önemli alan ise rejeneratif tedavilerdir. Periodontitis sonucu kaybedilen alveolar kemik ve bağ dokusunun yeniden oluşturulması, geleneksel yöntemlerle sınırlı başarı sağlamaktadır. Bu nedenle, nanoteknolojiye dayalı doku mühendisliği yaklaşımları geliştirilmektedir. Özellikle polimerik nanopartiküller, nanolifli iskele sistemleri ve nanokompozit membranlar; biyouyumlulukları, hücresel adezyonu destekleyen yüzey özellikleri ve kontrollü salım kapasiteleri sayesinde periodontal rejenerasyon açısından umut verici materyaller olarak değerlendirilmektedir (Zong et al., 2023).

Periodontal defektlerin onarımında, kök yüzeyine yerleştirilebilen ilaça yüklü nanopartiküller önemli bir potansiyel sunmaktadır. Özellikle büyüme faktörleri veya hücresel farklılaşmayı teşvik eden ajanları taşıyan polimerik nano sistemlerin rejeneratif süreçleri hızlandırabileceği bildirilmiştir. Bu kapsamda, kitosan ve PDGF (platelet-derived growth factor) içeren nanopartikül sistemlerinin, kollajen temelli iskeleler üzerinde kontrollü salım göstererek periodontal ligament ve kemik hücrelerinin göçünü ve proliferasyonunu artırdığı ortaya konmuştur. Benzer şekilde, PLGA (polilak-

tik-ko-glikolik asit), kitosan ve gümüş nanoparçacıkların belirli oranlarda birleştirilmesiyle elde edilen kompozit yapıların, antimikrobiyal özellik göstermesinin yanı sıra hücreler için toksik olmadığı ve mineralizasyonu teşvik ettiği gösterilmiştir. Bu tür kompleks nanokompozit sistemler hem enfeksiyon kontrolü hem de doku yenilenmesini destekleyen çift etkili biyomalzemeler olarak periodontal rejenerasyonda dikkat çekmektedir (Xue et al., 2019; Zong et al., 2023).

Nanoteknoloji, periodontoloji alanında yalnızca tedavi edici değil, aynı zamanda koruyucu uygulamalarda da önemli bir rol oynamaktadır. Diş eti iltihabının ve erken evredeki periodontal hastalıkların önlenmesinde, nanopartikül içeren diş macunları ve ağız gargaralarının kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Özellikle nano hidroksiapatit içeren diş macunlarının, diş yüzeyine bağlanarak hem mineyi güçlendirdiği hem de bakteriyel tutunmayı azalttığı gösterilmiştir. Nano hidroksiapatit, diş minesinin temel bileşeni olan hidroksiapatitin biyomimetik bir formudur ve hassas yüzeylerin onarımında, beyaz nokta lezyonlarının (erken demineralizasyon) giderilmesinde etkili bir ajan olarak değerlendirilmektedir. Ayrıca çeşitli klinik ve in situ çalışmalar, bu bileşiği içeren ürünlerin küçük çürük lezyonlarını yeniden mineralize edebildiğini ve asit saldırılarına karşı mine kaybını önleyebildiğini göstermiştir. Bununla birlikte, periodontitis gelişme riski taşıyan bireylerde nanoteknoloji temelli ağız gargaralarının plak kontrolünü daha etkin sağlayabileceği öne sürülmektedir. Ancak bu tür ürünlerin uzun vadeli güvenliği ve klinik etkinliği ile ilgili daha fazla bilimsel kanıtı ihtiyaç vardır.

5.Ortodonti Alanında Nanoteknoloji

Ortodonti alanında nanoteknoloji uygulamaları, hem ortodontik aparatların yapısal ve biyolojik özelliklerini geliştirmeye hem de tedaviye bağlı komplikasyonları azaltmaya yönelik çözümler sunmaktadır. Sabit ortodontik tedavilerde kullanılan braket, ark teli ve bant gibi elemanlar, diş yüzeylerinde plak birikimini kolaylaştırarak beyaz nokta lezyonları olarak adlandırılan mine demineralizasyonlarına ve çürük başlangıçlarına neden olabilmektedir. Bu nedenle ortodontik materyallerin antimikrobiyal özelliklerle güçlendirilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu amaçla, nanoteknolojik yaklaşımlar doğrultusunda braket yüzeylerinin antimikrobiyal nanopartiküllerle kaplanması ya da ortodontik yapıştırıcılara nanopartikül ilavesi gibi stratejiler geliştirilmiştir (Zeidan et al., 2022).

Gümüş nanopartiküller (AgNP) içeren ortodontik materyaller, ağız ortamında *Streptococcus mutans* ve *Lactobacillus* gibi çürük yapıcı bakterilerin tutunmasını ve çoğalmasını azaltmada etkili bulunmuştur. Sánchez-Tito ve Tay (2021) tarafından yapılan bir çalışmada, gümüş nano-

partiküllerle modifiye edilmiş ortodontik rezinlerin kullanımıyla, braket çevresindeki antibakteriyel etkinliğin anlamlı düzeyde arttığı ve bu etkinin beyaz nokta lezyonlarının oluşumunu önlemede önemli rol oynayabileceği gösterilmiştir. AgNP'lerin sürekli gümüş iyonu salarak rezin çevresinde antibakteriyel bir ortam oluşturduğu, bu yolla plak birikimini ve mine yüzeyinde asit üretimini baskıladığı belirtilmiştir. Beyaz nokta lezyonları, ortodontik tedavi sırasında oluşan ilk çürük belirtisi olup, estetik açıdan dikkat çeken opak beyaz alanlar şeklinde kendini göstermektedir. Gümüş nanopartiküllerle zenginleştirilmiş ortodontik rezinlerin, bu lezyonların oluşumunu önlemede potansiyel bir koruyucu yaklaşım sunduğu vurgulanmaktadır. Ancak bu tür materyallerin yaygın klinik kullanımına geçilmeden önce, uzun dönemli in vivo çalışmalarla etkinlikleri ve olası renklenme gibi yan etkileri ayrıntılı biçimde değerlendirilmelidir (Sánchez-Tito & Tay, 2021).

Ortodontide nanoteknolojinin bir diğer uygulama alanı da ortodontik yapıştırıcılar ve simanlardır. Braketlerin dişe yapıştırılmasında kullanılan rezin esaslı ortodontik adezivlere antimikrobiyal nanoparçacıklar eklendiğinde, braket çevresinde plak birikiminin azaldığı ve *Streptococcus mutans* gibi çürük yapıcı bakterilerin kolonizasyonunun anlamlı biçimde gerilediği bildirilmektedir (Sánchez-Tito & Tay, 2021). Gümüş nanoparçacıklarının (AgNP) ortodontik yapıştırıcılara eklenmesi, bu materyallerin antibakteriyel etkinliğini artırmakta ve aynı zamanda yapışma dayanımını klinik olarak kabul edilebilir düzeyde tutmaktadır. Tristán-López ve arkadaşlarının (2023) gerçekleştirdiği bir in vitro çalışmada, AgNP eklenmiş ortodontik yapıştırıcıların *S. mutans* ve *Lactobacillus acidophilus* üzerinde belirgin antibakteriyel etki gösterdiği ve plak oluşumunu azalttığı belirtilmiştir (Tristán-López et al., 2023). Benzer şekilde, çinko oksit nanoparçacıkları (ZnO-NP) ile modifiye edilen yapıştırıcıların da hem bakteriyel üremeyi engellediği hem de yapışma dayanımını olumsuz yönde etkilemediği gösterilmiştir (Saeed et al., 2024). Bu tür nanoparçacık katkılı yapıştırıcı sistemler, ortodontik tedavi süresince beyaz nokta lezyonları ve dekalsifikasyon riskini azaltabilecek pratik ve etkili yaklaşımlar olarak değerlendirilmektedir (Saeed et al., 2024).

Nanoteknolojinin ortodontideki bir diğer katkısı ise apareylerin mekanik performansını iyileştirmesidir. Ortodontik braket-tel arasındaki sürtünme kuvvetini azaltmak, diş hareketlerini daha verimli hâle getirerek tedavi süresini kısaltabilir. Bu amaçla, braketlerin sürtünen yüzeyleri nanomalzemelerle kaplanarak lubrikasyon etkisi yaratılmaya çalışılmaktadır. Özellikle titanyum dioksit (TiO₂) ve bakır oksit (CuO) nanoparçacıkları ile yapılan kaplamalar üzerinde durulmuştur. Ameli ve arkadaşlarının (2022) yaptığı çalışmada, paslanmaz çelik braketler sırasıyla TiO₂, CuO ve gümüş-hidroksiapatit (Ag-HA) nanoparçacıkları ile kaplanmış ve çeşit-

li tellerle sürtünme testlerine tabi tutulmuştur. Sonuçlar, TiO_2 nano-kaplı braketlerin sürtünmesinin kontrol grubuna göre anlamlı derecede düşük olduğunu; CuO kaplamanın ise sürtünme açısından belirgin bir fark yaratmadığını göstermiştir. Ayrıca, nikel-titanyum (NiTi) yuvarlak ark tellerinin, kare kesitli NiTi ya da paslanmaz çelik tellere kıyasla tüm braket türlerinde en düşük sürtünmeyi oluşturduğu teyit edilmiştir. TiO_2 kaplı braketlerin yüzey pürüzlülüğünü azalttığı ve tel ile braket arasındaki etkileşimi daha kaygan hâle getirdiği düşünülmektedir. Bu bulgular, nanoteknoloji sayesinde ortodontik tedavilerin biyomekaniğinde anlamlı iyileşmeler sağlanabileceğini ortaya koymaktadır: Daha düşük sürtünme, aynı kuvvetle daha hızlı diş hareketi ve potansiyel olarak daha kısa tedavi süresi anlamına gelebilir (Ameli et al., 2022).

Ortodontik tedavilerde kullanılan ark telleri de nanoteknolojik yöntemlerle hem mekanik hem de biyolojik açıdan geliştirilmektedir. Özellikle nikel-titanyum (NiTi) alaşımlı tellerin yüzeyine uygulanan elmas benzeri karbon kaplamalar, sürtünme kuvvetini azaltmanın yanı sıra florür içeren ortamlarda korozyon direncini de artırmaktadır. Zhang ve arkadaşlarının (2023) derlemesine göre, DLC kaplamalar tel yüzeyindeki pürüzlülüğü azaltmakta, kayganlığı artırmakta ve ortodontik sistemlerin biyomekanik verimliliğini yükseltmektedir. Ayrıca bu kaplamalar, florür kaynaklı korozyona karşı koruyucu etkiler göstermekte ve biyouyumlu yapıları sayesinde uzun süreli kullanım açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Nanoteknoloji destekli bu yüzey modifikasyonları, ortodontik tellerin sürtünme performansını artırma potansiyeline sahiptir (Zhang et al., 2023).

6. Pedodonti Alanında Nanoteknoloji

Pedodonti, çocukların diş sağlığıyla ilgilenen diş hekimliği dalıdır ve nanoteknoloji bu alanda hem koruyucu hem de tedavi edici uygulamalarda önemli avantajlar sunmaktadır. Çocuk hastalarda öncelik, diş çürüklerinin önlenmesi ve erken dönem çürük lezyonlarının durdurulmasıdır. Nanoteknoloji sayesinde geliştirilen yenilikçi koruyucu ürünler, florür uygulamalarına alternatif veya tamamlayıcı yaklaşımlar olarak öne çıkmaktadır. Bu ürünlerin başında nano hidroksiapatit (nano-HA) içeren diş macunları ve vernikler gelmektedir.

Bebeklik ve erken çocukluk döneminde sık görülen biberon çürüğü ve erken çocukluk çağı çürükleri (ECC), düşük doz florür uygulaması gerektirse de florürün yutulması çocuklar için toksisite riski oluşturabilir. Diş minesinin ana mineral bileşeni olan hidroksiapatitin nano boyutlu formu olan nano-HA, biyouyumlu ve toksik olmaması sayesinde çocuk diş sağlığında güvenli bir alternatif olarak öne çıkmaktadır (Paszynska et al., 2023). Araştırmalar, nano-HA'nın mine yüzeyine bağlanarak koruyucu bir tabaka

oluşturduğunu ve kalsiyum ile fosfat eksikliklerini gidererek beyaz nokta lezyonlarını remineralize edebildiğini göstermektedir (Amaechi et al., 2021). Özellikle fırçalama alışkanlığı düzensiz olan ya da ortodontik aparat kullanan çocuklarda, nano-HA içeren ürünlerin başlangıç çürüklerinde azalma sağladığı; %5 nano-HA içeren losyonların ise in situ ortamlarda erken mine lezyonlarını başarıyla yeniden mineralize ettiği bildirilmiştir. Ayrıca nano-HA'nın mine prizmaları arasına penetre olabilmesi sayesinde, yüzeyel etkili florüre kıyasla daha derin remineralizasyon sağlayabileceği ifade edilmektedir. Klinik karşılaştırmalı çalışmalar, nano-HA içeren diş macunlarının 500 ppm florür içeren ürünlerle benzer düzeyde koruyuculuk sağladığını ve ek olarak hassasiyet giderici ile beyazlatıcı etki sunduğunu göstermektedir (Paszynska et al., 2023).

Çocuk diş hekimliğinde gümüş nanopartiküller (AgNP) hem koruyucu hem de tedavi edici amaçlarla kullanılmaktadır. Gümüş diamin florür (SDF) uygulaması, özellikle çocuk hastalarda ilerlemiş çürüklerin ilerlemesini durdurmak amacıyla uzun süredir kullanılmaktadır. Her ne kadar SDF doğrudan bir nanoteknoloji ürünü olmasa da uygulandığı dentin tübüllerinde gümüş iyonlarının çökerek in situ nanopartikül oluşumuna neden olduğu gösterilmiştir. Bunun yanında, doğrudan AgNP içeren vernikler ve pit fissür örtücüler de geliştirilmiştir. Salas-López ve arkadaşlarının (2017) yaptığı randomize kontrollü klinik çalışmada, 6–10 yaş arası çocuklarda AgNP içeren fissür örtücülerinin, geleneksel sealantlara kıyasla diş minesindeki demineralizasyonu anlamlı düzeyde azalttığı ve çürük oluşumunu büyük ölçüde engellediği gösterilmiştir. Bu çalışma, AgNP katkılı fissür örtücülerin hem sızdırmazlık sağladığını hem de sürekli antimikrobiyel etkisiyle diş yüzeyini koruduğunu ortaya koymuştur. Çocuk hastalarda bu özellik özellikle değerlidir; zira genç bireylerin ağız hijyenini optimal düzeyde sürdürmeleri her zaman mümkün olmayabilir. Bu nedenle, materyalin pasif koruyuculuğu klinik açıdan önem taşımaktadır (Salas-López et al., 2017).

Antibakteriyel nanopartiküller aynı zamanda dolgu materyallerine de entegre edilmektedir. Cam iyonomer simanlar, florür salma özellikleri nedeniyle pedodontide sık tercih edilen materyaller arasında yer alır. Nanoteknolojiyle güçlendirilmiş cam iyonomerler, örneğin nano-gümüş katkılı formülasyonlar hem daha yüksek basınç dayanımı hem de artmış florür salınımı gösterebilir. Paiva ve arkadaşlarının (2018) yaptığı çalışmada, gümüş nanopartiküllerle modifiye edilmiş cam iyonomer simanların *Streptococcus mutans*'a karşı belirgin antibakteriyel etki gösterdiği ve sekonder çürük oluşumunu azalttığı saptanmıştır. Aynı zamanda bu materyallerin basınç dayanımının arttığı ve florür salınımının anlamlı şekilde yükseldiği belirtilmiştir (Paiva et al., 2018).

Molar-İnsisiv Hipomineralizasyonu (MIH) gibi gelişimsel mine defektleri ve travmatik diş yaralanmaları, çocuklarda restoratif tedavilerde özel dikkat gerektiren durumlar arasında yer almaktadır. Bu olgularda mine dokusunun zayıf yapısı, restoratif materyallerin adeziv bağlanması güçleştirmekte ve tedavi başarısını olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Son yıllarda nanoteknoloji tabanlı materyallerin bu klinik zorlukların aşılmasında umut verici sonuçlar sunduğu bildirilmektedir. Özellikle nanopartikül içeren akışkan kompozitler ve nano dolgu katkılı adeziv sistemler, hipomineralize mineye daha etkin penetre olarak bağlanma başarısını artırmakta; minimal invaziv yaklaşımlar sayesinde fonksiyonel ve estetik açıdan tatmin edici restorasyonlara olanak sağlamaktadır. Davidovich ve arkadaşlarının (2020) yaptığı çalışmada, dijital iş akışıyla desteklenen nanoteknolojik restoratif materyallerin MIH'li çocuk olgularında başarılı bir şekilde uygulanabildiği ve klinik açıdan etkin sonuçlar sunduğu gösterilmiştir. Bu bulgular, nanoteknolojinin pedodontide kişiye özel, biyouyumlu ve dayanıklı restoratif çözümler geliştirilmesine önemli katkılar sağladığını ortaya koymaktadır (Davidovich et al., 2020).

7.Protetik Diş Tedavisi Alanında Nanoteknoloji

Protetik diş tedavisi, kaybedilmiş dişlerin ve ağız dokularının yapay materyallerle restorasyonunu kapsar ve nanoteknoloji, bu alandaki malzemelerin performansını önemli ölçüde artırmaktadır. Total ve parsiyel protezlerde yaygın olarak kullanılan akrilik reçineler, nanopartikül modifikasyonları ile hem mekanik hem de biyolojik açıdan iyileştirilmektedir. Özellikle yaşlı ve bağışıklığı zayıf hastalarda protez kullanımına bağlı olarak sık karşılaşılan denture stomatitis (protez stomatiti), *Candida albicans*'ın protez yüzeyinde aşırı çoğalmasıyla ilişkilidir. Nanoteknolojik yaklaşımlar, protez baz materyallerinin antimikrobiyel özellikler kazanmasını sağlayarak bu enfeksiyonun önlenmesini hedeflemektedir. Bajunaid'in (2022) sistematik derlemesinde, gümüş nanopartiküller, çinko oksit ve zirkonyum oksit gibi biyosid salan ajanların polimetilmetakrilat (PMMA) akrilik rezinlere eklenmesinin, *Candida albicans* biyofilm oluşumunu anlamlı şekilde azalttığı ve protez stomatitine karşı etkili bir koruma sağladığı bildirilmektedir (Bajunaid, 2022). Literatürde, %0,5–1 oranında AgNP içeren akrilik rezin örneklerinin *Candida albicans*'ın yüzeye tutunmasını ve biyofilm oluşturma kapasitesini belirgin şekilde azalttığı gösterilmiştir. Bu etkinliğin, nanoparçacıkların protez yüzeyine homojen dağılımı ve ortamda sürekli olarak gümüş iyonları salarak mikrobiyal üremeyi baskılaması ile sağlandığı belirtilmektedir. Bajunaid (2022), bu tür nanoteknolojik modifikasyonların yalnızca biyofilm oluşumunu önlemekle kalmayıp, aynı zamanda protez stomatitinin klinik yönetiminde de etkili bir strateji olabileceğini vurgulamıştır. Ancak çalışmalarda, gümüş

iyonlarının zamanla tükenmesine bağlı olarak antifungal etkinliğin azalabileceği ve bu nedenle materyalin uzun dönem kullanımlarında etkinliğinin yeniden değerlendirilmesi gerektiği ifade edilmiştir (Bajunaid, 2022).

Gümüş dışında, çinko oksit (ZnO), titanyum dioksit (TiO₂) ve bakır oksit (CuO) gibi inorganik nanopartiküller de protez akriliklerine eklenerek antifungal ve antibakteriyel etkinlikleri bakımından araştırılmıştır. Bu nanopartiküller yalnızca mikrobiyal kontaminasyonu azaltmakla kalmaz, aynı zamanda uygun konsantrasyonlarda kullanıldığında akrilik materyalin fiziksel özelliklerini koruyabilir. Estetik açıdan beyaz renge sahip olan ZnO nanoparçacıkları, akriliklere renk bozulması oluşturmaktan entegre edilebilir ve *Candida albicans* dahil birçok mikroorganizmaya karşı etkilidir. Kamonkhantikul ve arkadaşlarının (2017) gerçekleştirdiği bir çalışmada, %0,5 ila %5 oranlarında ZnO nanoparçacığı ilavesiyle hazırlanan PMMA örneklerinin antifungal özellik kazandığı, ancak yüksek konsantrasyonlarda yüzey pürüzlülüğünde artış ve mekanik dayanımda azalma görüldüğü bildirilmiştir. Bu nedenle %1–2 aralığındaki oranlar, biyouyumluluk ve dayanıklılık açısından daha uygun kabul edilmektedir (Kamonkhantikul et al., 2017).

Benzer şekilde, TiO₂ nanoparçacıkları yalnızca antifungal etki göstermekle kalmaz, aynı zamanda ultraviyole (UV) ışık altında fotokatalitik aktivite sergileyerek protez yüzeyinde organik birikimlerin temizlenmesine katkıda bulunur. Ahmed ve arkadaşlarının (2023) yürüttüğü bir çalışmada, TiO₂ nanoparçacıkları ile zenginleştirilmiş yumuşak akrilik astarların *Candida albicans* biyofilm oluşumunu anlamlı düzeyde azalttığı; %1,5–2,0 aralığındaki konsantrasyonların hem antifungal etkinlik sağladığı hem de malzemenin esnekliğini ve bütünlüğünü koruduğu gösterilmiştir. Bu bulgular, nanoteknolojik katkıların protez materyallerine entegre edilmesinde kullanılan partikül tipi ve oranının dikkatle belirlenmesinin kritik öneme sahip olduğunu ortaya koymaktadır (Ahmed et al., 2023).

Protezlerde nanoteknolojinin bir diğer uygulama alanı ise kaplama ve astar malzemeleridir. Protezlerin ağızla temas eden yüzeylerine nano materyal içeren ince kaplamalar uygulanarak protezin takılıp çıkarılması ve temizliği kolaylaştırılabilir. 2024 yılında yayımlanan bir çalışmada, nistatin kaplı gümüş nanoparçacıklarının (Nys-AgNPs) PMMA akrilik rezinlere entegre edilmesiyle *Candida albicans* biyofilm oluşumunun %85 oranında inhibe edildiği ve kaplamanın uzun süreli antifungal etki gösterdiği bildirilmiştir. Bu hibrit kaplama sistemi yalnızca mikrobiyal kontaminasyonu önlemekle kalmamış, aynı zamanda akrilik rezin yüzeyinin mekanik ve estetik özelliklerini koruyarak klinik kullanım açısından da uygun bulunmuştur (Abar et al., 2024).

Benzer şekilde, 2023 yılında yayımlanan bir başka çalışmada, polimetilmetakrilat (PMMA) protez taban malzemesine uygulanan nano-seramik $\text{TiO}_2/\text{ZrO}_2$ kaplamaların *Candida albicans*'ın yüzeye tutunmasını ve biyofilm oluşumunu anlamlı düzeyde azalttığı gösterilmiştir. Bu kaplamaların protez yüzeyinin ıslanabilirliğini artırarak mikrobiyal kolonizasyonu engellediği ve aşınmaya karşı dayanıklılık sağladığı belirtilmiştir (Yang et al., 2023).

Sabit protetik restorasyonlarda (kuron, köprü, inley, onley gibi), nanoteknolojinin sunduğu yenilikler özellikle seramik bazlı materyallerin yapısal ve estetik özelliklerinin geliştirilmesine olanak tanımaktadır. Yitriyum ile stabilize edilmiş zirkonya (Y-TZP) seramikler, yüksek bükülme direnci, çatlak ilerlemesine karşı dayanıklılık ve biyouyumluluk özellikleri sayesinde protetik diş hekimliğinde yaygın olarak tercih edilmektedir. Özellikle 3Y-TZP formu, üstün mekanik özellikleri ile uzun köprülerde güvenle kullanılabilirken; daha yüksek yitriyum içeriğine sahip 4Y-TZP ve 5Y-TZP çeşitleri, artan translüsentlikleri sayesinde estetik ön bölge restorasyonlarında tercih edilmektedir. Bu gelişmeler, tam seramik protezlerin hem estetik hem de fonksiyonel başarısını artırmış ve kullanım alanlarını genişletmiştir. Ayrıca dijital diş hekimliğinde CAD/CAM sistemlerinin yaygınlaşması ile, nanometrik zirkonya bloklarının hassas biçimde işlenmesi mümkün hâle gelmiş ve klinik uygulamalarda hem zaman hem de kalite açısından önemli avantajlar sağlanmıştır (Kongkiatkamon et al., 2023).

SONUÇ

Nanoteknoloji, diş hekimliğinde materyal bilimi ile biyoteknolojinin birleştiği yenilikçi bir alan olarak hem koruyucu hem de tedavi edici uygulamalarda önemli gelişmeler sağlamaktadır. Endodonti, periodontoloji, ortodonti, pedodonti ve protetik diş tedavisi gibi pek çok uzmanlık alanında nanomalzemelerin kullanımı; antimikrobiyel etkinlik, biyouyumluluk, mekanik dayanım ve estetik başarı gibi birçok avantaj sunmaktadır. Özellikle gümüş, çinko oksit ve hidroksiapatit gibi nanopartiküllerle geliştirilen ürünler, enfeksiyon kontrolü, doku iyileşmesi ve rejenerasyon süreçlerinde kayda değer katkılar sağlamaktadır.

Bununla birlikte, nanoteknolojiye dayalı ürünlerin uzun dönem biyolojik güvenliği, toksisite potansiyeli ve klinik etkinliği açısından daha fazla bilimsel veriye ihtiyaç duyulmaktadır. Diş hekimliğinde kişiye özel tedavi yaklaşımlarını mümkün kılan bu teknolojilerin, çok disiplinli araştırmalarla desteklenmesi büyük önem taşımaktadır. Bu doğrultuda, nanoteknoloji yalnızca mevcut tedavileri daha etkili hale getirmekle kalmayacak; aynı zamanda diş hekimliğinde gelecekte geliştirilecek yeni ve gelişmiş tedavi yöntemlerine de önemli katkılar sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

- Abar, E. S., Vandghanooni, S., Memar, M. Y., Eskandani, M., & Torab, A. (2024). Enhancing antifungal and antibacterial properties of denture resins with nystatin-coated silver nanoparticles. *Scientific Reports*, 14(1), 23770.
- Acharya, S., Godhi, B. S., Saha, S., Singh, B., Dinsa, K., Bhagchandani, J., & Gautam, A. (2022). Use of nanoparticles in pediatric dentistry: A narrative review. *Journal of International Oral Health*, 14(4), 357-362.
- Afkhami, F., Forghan, P., Gutmann, J. L., & Kishen, A. (2023). Silver nanoparticles and their therapeutic applications in endodontics: A narrative review. *Pharmaceutics*, 15(3), 715.
- Ahmed, A. Q., Al-Hmedat, S. J. A.-Z., Hanweet, D. M., & Haider, J. (2023). Assessing the antifungal activity of a soft denture liner loaded with titanium oxide nanoparticles (TiO₂ NPs). *Dentistry Journal*, 11(4), 90.
- Alhenaki, A. M., Attar, E. A., Alshahrani, A., Farooq, I., Vohra, F., & Abduljabbar, T. (2021). Dentin bond integrity of filled and unfilled resin adhesive enhanced with silica nanoparticles—An SEM, EDX, micro-Raman, FTIR and micro-tensile bond strength study. *Polymers*, 13(7), 1093.
- AlKahtani, R. N. (2018). The implications and applications of nanotechnology in dentistry: A review. *The Saudi dental journal*, 30(2), 107-116.
- Amaechi, B. T., Alshareif, D. O., Azees, P. A. A., Shehata, M. A., Lima, P. P., Abdollahi, A., Kalkhorani, P. S., Evans, V., Bagheri, A., & Okoye, L. O. (2021). Anti-caries evaluation of a nano-hydroxyapatite dental lotion for use after toothbrushing: An in situ study. *Journal of dentistry*, 115, 103863.
- Ameli, N., Asadi, S., Ghorbani, R., Mohebi, S., & Hans, M. (2022). Comparative antibacterial efficacy of orthodontic brackets coated with titanium dioxide, copper oxide, and hydroxyapatite-silver nanoparticles against *Streptococcus mutans*. *Middle East J Rehabil Health Stud*, 9(1), e119536.
- Bai, X., Lin, C., Wang, Y., Ma, J., Wang, X., Yao, X., & Tang, B. (2020). Preparation of Zn doped mesoporous silica nanoparticles (Zn-MSNs) for the improvement of mechanical and antibacterial properties of dental resin composites. *Dental Materials*, 36(6), 794-807.
- Bajunaid, S. O. (2022). How effective are antimicrobial agents on preventing the adhesion of *Candida albicans* to denture base acrylic resin materials? A systematic review. *Polymers*, 14(5), 908.
- Bapat, R. A., Chaubal, T. V., Joshi, C. P., Bapat, P. R., Choudhury, H., Pandey, M., Gorain, B., & Kesharwani, P. (2018). An overview of application of silver nanoparticles for biomaterials in dentistry. *Materials Science and Engineering: C*, 91, 881-898.
- Barot, T., Rawtani, D., & Kulkarni, P. (2020). Physicochemical and biological assessment of silver nanoparticles immobilized Halloysite nanotubes-based resin composite for dental applications. *Heliyon*, 6(3).

- Chandak, P. G., Chandak, M. G., Relan, K. N., Chandak, M., Rath, C., & Patel, A. (2021). Nanoparticles in endodontics-a review. *J Evol Med Dent Sci*, 10(13), 976-982.
- Chávez-Andrade, G. M., Tanomaru-Filho, M., Bernardi, M. I. B., de Toledo Leonardo, R., Faria, G., & Guerreiro-Tanomaru, J. M. (2019). Antimicrobial and biofilm anti-adhesion activities of silver nanoparticles and farnesol against endodontic microorganisms for possible application in root canal treatment. *Archives of oral biology*, 107, 104481.
- Chen, H., Zhang, Y., Yu, T., Song, G., Xu, T., Xin, T., Lin, Y., & Han, B. (2022). Nano-based drug delivery systems for periodontal tissue regeneration. *Pharmaceutics*, 14(10), 2250.
- Davidovich, E., Dagon, S., Tamari, I., Etinger, M., & Mijiritsky, E. (2020). An innovative treatment approach using digital workflow and CAD-CAM part 2: The restoration of molar incisor hypomineralization in children. *International journal of environmental research and public health*, 17(5), 1499.
- Ge, Y., Wang, S., Zhou, X., Wang, H., Xu, H. H., & Cheng, L. (2015). The use of quaternary ammonium to combat dental caries. *Materials*, 8(6), 3532-3549.
- Hamouda, I. M., & Abd Elkader, H. (2012). Evaluation the mechanical properties of nanofilled composite resin restorative material.
- Han, J. M., Lin, H., Zheng, G., Shinya, A., Gomi, H., & Lin, J. (2012). Effect of nanofiller on wear resistance and surface roughness of resin composites. *The Chinese Journal of Dental Research*, 15(1), 41-47.
- Hernández-Sierra, J. F., Galicia-Cruz, O., Salinas-Acosta, A., Ruiz, F., Pierdant-Pérez, M., & Pozos-Guillén, A. (2011). In vitro cytotoxicity of silver nanoparticles on human periodontal fibroblasts. *Journal of Clinical Pediatric Dentistry*, 36(1), 37-42.
- Huang, F., Cheng, L., Li, J., & Ren, B. (2022). Nanofibrous scaffolds for regenerative endodontics treatment. *Front Bioeng Biotechnol*, 10, 1078453. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.1078453>
- Huang, S., Gao, S., & Yu, H. (2009). Effect of nano-hydroxyapatite concentration on remineralization of initial enamel lesion in vitro. *Biomedical materials*, 4(3), 034104.
- Jandt, K. D., & Watts, D. C. (2020). Nanotechnology in dentistry: Present and future perspectives on dental nanomaterials. *Dental Materials*, 36(11), 1365-1378.
- Kamonkhantikul, K., Arksornnukit, M., & Takahashi, H. (2017). Antifungal, optical, and mechanical properties of polymethylmethacrylate material incorporated with silanized zinc oxide nanoparticles. *International journal of nanomedicine*, 2353-2360.

- Kongkiatkamon, S., Rokaya, D., Kengtanyakich, S., & Peampring, C. (2023). Current classification of zirconia in dentistry: An updated review. *PeerJ*, 11, e15669.
- Lee, J.-K., Choi, D.-S., Jang, I., & Choi, W.-Y. (2015). Improved osseointegration of dental titanium implants by TiO₂ nanotube arrays with recombinant human bone morphogenetic protein-2: a pilot in vivo study. *International journal of nanomedicine*, 1145-1154.
- Lim, H.-P., Park, S.-W., Yun, K.-D., Park, C., Ji, M.-K., Oh, G.-J., Lee, J.-T., & Lee, K. (2018). Hydroxyapatite coating on TiO₂ nanotube by sol-gel method for implant applications. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 18(2), 1403-1405.
- Madiwal, V., & Rajwade, J. (2024). Silver-deposited titanium as a prophylactic ‘nano coat’ for peri-implantitis. *Nanoscale Advances*, 6(8), 2113-2128.
- Malik, S., & Waheed, Y. (2023). Emerging applications of nanotechnology in dentistry. *Dentistry Journal*, 11(11), 266.
- Marasli, C., Katifelis, H., Gazouli, M., & Lagopati, N. (2024). Nano-based approaches in surface modifications of dental implants: a literature review. *Molecules*, 29(13), 3061.
- Martinez-Andrade, J. M., Avalos-Borja, M., Vilchis-Nestor, A. R., Sanchez-Vargas, L. O., & Castro-Longoria, E. (2018). Dual function of EDTA with silver nanoparticles for root canal treatment—A novel modification. *PLoS One*, 13(1), e0190866.
- Marzaman, A. N. F., Mahfufah, U., Fauziah, N., Ulum Ar Rahman, F., Hidayati, N., Hasyim, R., Setiawati, D., Choiri, S., Nuzulia, N. A., & Madani, A. F. (2025). Doxycycline-Loaded pH-Sensitive Microparticles as a Potential Site-Specific Drug Delivery System against Periodontitis. *ACS Omega*.
- Melo, M. A. S., Cheng, L., Zhang, K., Weir, M. D., Rodrigues, L. K., & Xu, H. H. (2013). Novel dental adhesives containing nanoparticles of silver and amorphous calcium phosphate. *Dental Materials*, 29(2), 199-210.
- Mierzejewska, Ż. A., Rusztyn, B., Łukaszuk, K., Borys, J., Borowska, M., & Antonowicz, B. (2024). The Latest Advances in the Use of Nanoparticles in Endodontics. *Applied Sciences*, 14(17), 7912.
- Najibfard, K., Ramalingam, K., Chedjieu, I., & Amaechi, B. (2011). Remineralization of early caries by a nano-hydroxyapatite dentifrice. *Journal of Clinical Dentistry*, 22(5), 139.
- Paiva, L., Fidalgo, T., Da Costa, L., Maia, L., Balan, L., Anselme, K., Ploux, L., & Thiré, R. (2018). Antibacterial properties and compressive strength of new one-step preparation silver nanoparticles in glass ionomer cements (Nano-Ag-GIC). *Journal of dentistry*, 69, 102-109.
- Paszynska, E., Pawinska, M., Enax, J., Meyer, F., Schulze zur Wiesche, E., May, T. W., Amaechi, B. T., Limeback, H., Hernik, A., & Otulakowska-Skrzy-

- nska, J. (2023). Caries-preventing effect of a hydroxyapatite-toothpaste in adults: a 18-month double-blinded randomized clinical trial. *Frontiers in Public Health*, 11, 1199728.
- Raddall, G., Mello, I., & Leung, B. M. (2019). Biomaterials and scaffold design strategies for regenerative endodontic therapy. *Frontiers in bioengineering and biotechnology*, 7, 317.
- Raftery, R. M., Tierney, E. G., Curtin, C. M., Cryan, S.-A., & O'Brien, F. J. (2015). Development of a gene-activated scaffold platform for tissue engineering applications using chitosan-pDNA nanoparticles on collagen-based scaffolds. *Journal of Controlled Release*, 210, 84-94.
- Rai, M., Yadav, A., & Gade, A. (2009). Silver nanoparticles as a new generation of antimicrobials. *Biotechnology advances*, 27(1), 76-83.
- Roberts, A., Bradley, J., Merkley, S., Pachal, T., Gopal, J., & Sharma, D. (2020). Does potassium iodide application following silver diamine fluoride reduce staining of tooth? A systematic review. *Australian dental journal*, 65(2), 109-117.
- Saeed, F., Ilyas, M., & Shaheen, A. (2024). An In Vitro Study Comparing the Antibacterial and Mechanical Properties of Zinc Oxide-Based Nanofillers in Orthodontic Adhesives for White Spot Lesion Prevention in Fixed Orthodontic Therapy. *Cureus*, 16(8).
- Salas-López, E. K., Pierdant-Pérez, M., Hernández-Sierra, J. F., Ruíz, F., Mandeville, P., & Pozos-Guillén, A. J. (2017). Effect of silver nanoparticle-added pit and fissure sealant in the prevention of dental caries in children. *Journal of Clinical Pediatric Dentistry*, 41(1), 48-52.
- Sánchez-Tito, M., & Tay, L.-Y. (2021). Antibacterial and white spot lesions preventive effect of an orthodontic resin modified with silver-nanoparticles. *Journal of clinical and experimental dentistry*, 13(7), e685.
- Shaheen, M. Y. (2022). Nanocrystalline hydroxyapatite in periodontal bone regeneration: A systematic review. *The Saudi dental journal*, 34(8), 647-660.
- Sohrabi, M., Eftekhari Yekta, B., Rezaie, H., Naimi-Jamal, M. R., Kumar, A., Cochis, A., Miola, M., & Rimondini, L. (2020). Enhancing mechanical properties and biological performances of injectable bioactive glass by gelatin and chitosan for bone small defect repair. *Biomedicine*, 8(12), 616.
- Sun, Y., Xu, W., Jiang, C., Zhou, T., & Wang, Q. (2022). Gold nanoparticle decoration potentiate the antibacterial enhancement of TiO2 nanotubes via sonodynamic therapy against peri-implant infections. *Frontiers in bioengineering and biotechnology*, 10, 1074083.
- Talaat, S., Hashem, A. A., Abu-Seida, A., Abdel Wahed, A., & Abdel Aziz, T. M. (2024). Regenerative potential of mesoporous silica nanoparticles scaffold on dental pulp and root maturation in immature dog's teeth: a histologic and radiographic study. *BMC Oral Health*, 24(1), 817.

- Tristán-López, J.-D., Niño-Martínez, N., Kolosovas-Machuca, E.-S., Patiño-Marín, N., De Alba-Montero, I., Bach, H., & Martínez-Castañón, G.-A. (2023). Application of silver nanoparticles to improve the antibacterial activity of orthodontic adhesives: an in vitro study. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(2), 1401.
- Wang, X., Wei, C., Cao, B., Jiang, L., Hou, Y., & Chang, J. (2018). Fabrication of Multiple-Layered Hydrogel Scaffolds with Elaborate Structure and Good Mechanical Properties via 3D Printing and Ionic Reinforcement. *ACS Appl Mater Interfaces*, 10(21), 18338-18350. <https://doi.org/10.1021/acsami.8b04116>
- Wu, D., Fan, W., Kishen, A., Gutmann, J. L., & Fan, B. (2014). Evaluation of the antibacterial efficacy of silver nanoparticles against *Enterococcus faecalis* biofilm. *Journal of endodontics*, 40(2), 285-290.
- Xu, H. H., Moreau, J. L., Sun, L., & Chow, L. C. (2011). Nanocomposite containing amorphous calcium phosphate nanoparticles for caries inhibition. *Dental Materials*, 27(8), 762-769.
- Xue, Y., Hong, X., Gao, J., Shen, R., & Ye, Z. (2019). Preparation and biological characterization of the mixture of poly (lactic-co-glycolic acid)/chitosan/Ag nanoparticles for periodontal tissue engineering. *International journal of nanomedicine*, 483-498.
- Yang, B., Ginsburg, S., Li, W., Vilela, M. M., Shahmohammadi, M., Takoudis, C. G., & Wu, C. D. (2023). Effect of nano-ceramic coating on surface property and microbial adhesion to poly (methyl methacrylate). *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials*, 111(8), 1480-1487.
- 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*, 15(3), 209.
- Yin, I. X., Xu, V. W., Xu, G. Y., Yu, O. Y., Niu, J. Y., & Chu, C. H. (2024). Synthesis and Application of Silver Nanoparticles for Caries Management: A Review. *Pharmaceuticals*, 17(10), 1264.
- Yin, I. X., Zhang, J., Zhao, I. S., Mei, M. L., Li, Q., & Chu, C. H. (2020). The antibacterial mechanism of silver nanoparticles and its application in dentistry. *International journal of nanomedicine*, 2555-2562.
- Zeidan, N. K., Enany, N. M., Mohamed, G. G., & Marzouk, E. S. (2022). The antibacterial effect of silver, zinc-oxide and combination of silver/zinc oxide nanoparticles coating of orthodontic brackets (an in vitro study). *BMC Oral Health*, 22(1), 230.
- Zhang, R., Han, B., & Liu, X. (2023). Functional surface coatings on orthodontic appliances: Reviews of friction reduction, antibacterial properties, and corrosion resistance. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(8), 6919.

Zong, C., Bronckaers, A., Willems, G., He, H., & Cadenas de Llano-Pérula, M. (2023). Nanomaterials for Periodontal Tissue Regeneration: Progress, Challenges and Future Perspectives. *Journal of Functional Biomaterials*, 14(6), 290.



BÖLÜM

2

ENDODONTİDE İRRİGASYON: KLASİK YAKLAŞIMLARDAN MODERN AKTİVASYON TEKNİKLERİNE

Ömer ÖZKILIÇ¹

Gamze DURAK ÖZKILIÇ²

¹ Uzm.Dt., Diyarbakır Ağız Diş ve Sağlığı Hastanesi, Endodonti Bölümü, Diyarbakır, Türkiye

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0377-7117>

² Uzm.Dt., Dicle Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi, Endodonti Anabilim Dalı, Diyarbakır, Türkiye ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1514-992X>

GİRİŞ

Endodontik tedavinin nihai amacı, kök kanal sisteminde bulunan mikroorganizmaların, toksik yan ürünlerin ve pulpal kalıntıların etkili bir şekilde ortadan kaldırılmasıdır. Bu biyolojik temizlik, yalnızca enfeksiyonun kontrol altına alınmasını değil, aynı zamanda periapikal dokuların iyileşmesini ve uzun vadeli tedavi başarısını da hedefler. Ancak kök kanal sisteminin kompleks morfolojisi, örneğin lateral kanallar, isthmuslar ve apikal delta gibi ulaşılması zor bölgeler, geleneksel mekanik şekillendirme yöntemlerinin etkinliğini sınırlamaktadır. Bu noktada, irrigasyon süreci, mekanik enstrümantasyonun tamamlayıcısı olarak devreye girer ve tedavinin kritik bir bileşeni hâline gelir.

Etkin bir irrigasyon protokolü; kanal içinde biyofilm oluşturan mikroorganizmaların eliminasyonu, şekillendirme sırasında oluşan dentin talaşı ve smear tabakasının uzaklaştırılması, ayrıca irrigantın apikal ve lateral anatomilere nüfuz edebilmesi gibi çok yönlü hedefleri kapsar. Bu hedeflere ulaşmak, yalnızca kullanılan irrigantın kimyasal özelliklerine değil, aynı zamanda uygulama şekline, irrigasyon sırasındaki aktivasyon tekniklerine ve protokolün klinik doğruluğuna bağlıdır. Son yıllarda geliştirilen modern irrigasyon teknolojileri sayesinde, bu sürecin etkinliği önemli ölçüde artırılmış, böylece endodontik tedavilerde başarı oranı da yükselmiştir. (Mohammadi et al., 2021).

Kök Kanal İrrigasyonunda Kullanılan Başlıca İrrigantlar

Kök kanal tedavisinde irrigasyonun etkinliğini artırmak için çeşitli irrigantlar kullanılmaktadır. Her irrigantın kendine özgü kimyasal özellikleri, avantajları ve sınırlılıkları bulunur. Modern endodontik uygulamalarda en sık kullanılan başlıca irrigantlar şunlardır:

Sodyum Hipoklorit (NaOCl)

Sodyum hipoklorit, endodontik irrigasyonda en yaygın kullanılan çözücüdür ve güçlü antimikrobiyal etkisinin yanı sıra organik doku çözme kapasitesiyle de öne çıkar. Genellikle %0.5 ila %6 oranında değişen konsantrasyonlarda kullanılır. Bu çözeltinin başlıca avantajı, kök kanal sisteminde yer alan mikroorganizmaları etkili biçimde elimine etmesidir. Ayrıca nekrotik doku artıklarının uzaklaştırılmasında da oldukça etkilidir. Ancak NaOCl'nin yüksek sitotoksisiteye sahip olması ve periapikal dokuya taşması halinde ciddi komplikasyonlara yol açabilmesi, önemli bir dezavantaj olarak kabul edilmektedir. Bu nedenle irrigasyon sırasında çözelti kontrollü biçimde uygulanmalı ve güvenlik protokollerine titizlikle uyulmalıdır.

2024 yılında yayımlanan bir klinik çalışmada, %0.5 ve %3 NaOCl konsantrasyonlarının kök kanal tedavisindeki uzun dönem klinik sonuçları karşılaştırılmıştır. Altı yıllık takip sürecinde, her iki konsantrasyonun da benzer başarı oranlarına sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bu bulgular, daha düşük konsantrasyonlu NaOCl çözeltilerinin de etkili olabileceğini ve sitotoksikite riskini azaltılabileceğini göstermektedir (Dahlstrand Rudin, Dahlstrand Rudin, Ulin, & Kvist, 2024).

Etilen DiAminTetraAsetik Asit (EDTA)

EDTA, kök kanal duvarlarında oluşan smear tabakasının giderilmesinde etkili bir şelatlama ajanı olarak kullanılır ve genellikle %17'lik çözeltisi tercih edilir. İnorganik debrisleri çözerek dentin yüzeyinin açılmasını sağlar ve bu sayede hem irrigantların hem de kanal içi medikamentlerin dentin tübüllerine penetrasyonunu kolaylaştırır. EDTA, organik doku çözme kapasitesine sahip değildir; bu nedenle NaOCl gibi organik doku çözücülerle kombine edilerek kullanılır. Ancak uzun süreli ve yoğun kullanımı dentin yüzeyinde erozyona neden olabileceğinden, temas süresi klinik olarak dikkatle sınırlandırılmalıdır.

2023 yılında yayımlanan bir çalışmada, 17% EDTA çözeltisinin smear tabakası giderimi ve dentin erozyonu üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Çalışmada, farklı irrigasyon solüsyonlarının smear tabakası giderimi ve dentin erozyonu üzerindeki etkileri karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, 17% EDTA'nın smear tabakasını etkili bir şekilde giderdiğini, ancak dentin erozyonu riskinin de bulunduğunu göstermiştir. Bu bulgular, EDTA'nın irrigasyon protokolünde kontrollü süre ve dozda kullanılmasının önemini vurgulamaktadır (Mahajan, Kamra, & Dahiwal, 2010).

Klorheksidin Glukonat (CHX)

Klorheksidin, geniş spektrumlu antimikrobiyal özelliği ve kalıcı etkisi (substantivity) nedeniyle özellikle dirençli mikroorganizmaların eliminasyonunda kullanılan alternatif bir irriganttır. Genellikle %0.12 ile %2 konsantrasyonları arasında uygulanır. CHX, dentin yüzeyine bağlanarak uzun süreli antibakteriyel etki sağlar, ancak organik doku çözme özelliği yoktur. Bu nedenle, doku çözme etkisinin gerekli olduğu durumlarda NaOCl'nin yerine geçemez. Ayrıca CHX ile NaOCl'nin aynı kök kanal tedavisinde ardışık olarak kullanılması durumunda toksik ve potansiyel olarak karsinogenik olduğu düşünülen bir çökeltinin (parakloranilin) oluşması, klinik açıdan önemli bir güvenlik sorunu teşkil etmektedir. Bu etkileşim, irrigasyon sırasında solüsyonlar arasında ara yıkama uygulanmasını zorunlu kılar.

2023 yılında yayımlanan bir in vitro çalışmada, 2% CHX irrigasyonunun smear tabakası giderimi ve fiber postların kendiliğinden yapışan rezin simanlarla yapıştırılması üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Çalışmada, CHX irrigasyonunun smear tabakasını kısmen giderdiği, bağlanma dayanımını artırdığı ve nanoleakage değerlerini azalttığı bulunmuştur. Bu bulgular, CHX'nin endodontik tedavilerde post alanının temizlenmesi ve adeziv bağlanmanın iyileştirilmesinde etkili bir irrigant olduğunu göstermektedir (Alessi, Jitumori, Bittencourt, Gomes, & Gomes, 2023).

Yeni Nesil İrrigantlar ve Yardımcı Solüsyonlar

Endodontik irrigasyon protokollerini geliştirmek amacıyla son yıllarda yeni nesil irrigantlar ve yardımcı yöntemler geliştirilmiştir. Bu ajanlar, geleneksel irrigantların sınırlılıklarını aşmak ve klinik etkinliği artırmak üzere tasarlanmıştır.

MTAD (Mixture of Tetracycline, Acid, and Detergent); smear tabakasını etkili şekilde uzaklaştırırken aynı zamanda antibakteriyel etki sağlar. Doksisisiklin içeriği sayesinde özellikle *Enterococcus faecalis* gibi dirençli patojenlere karşı etkilidir. 2023 yılında yayımlanan bir çalışmada, MTAD'nin hem smear tabakası gideriminde hem de antibakteriyel etkinlikte yüksek başarı gösterdiği bildirilmiştir (Rao, Sandeep, Madhubala, & Mahalaxmi, 2023).

QMix; EDTA ve antimikrobiyal ajanların kombinasyonunu içeren çift etkili bir irriganttır. Hem smear çözme hem de mikrobiyal eliminasyon sağlama potansiyeline sahiptir. 2023 tarihli sistematik bir derlemede, QMix'in smear tabakası gideriminde MTAD, NaOCl ve phytic acid gibi irrigantlara kıyasla daha etkili olduğu; ancak %7 maleik asit ve %10 sitrik asit gibi solüsyonlara göre daha az etkili olduğu bildirilmiştir (Chia, Parolia, Lim, Jayaraman, & de Moraes Porto, 2020).

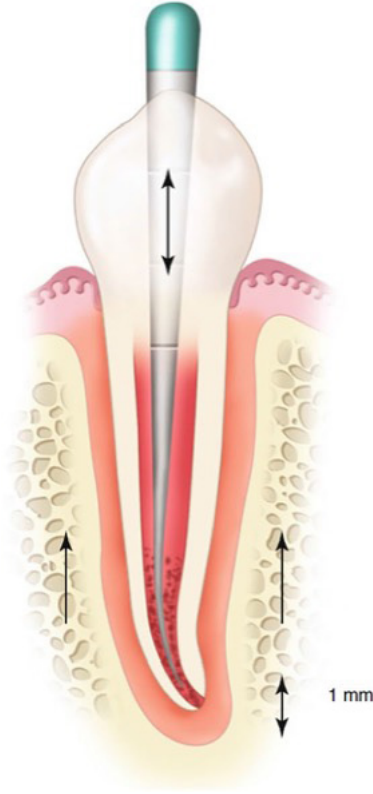
Fotodinamik Terapi (PDT) ise biyofiziksel bir yöntem olarak irrigasyon protokollerine entegre edilmeye başlanmıştır. Fotosensitizer ajanların belirli dalga boylarındaki ışıkla aktive edilerek reaktif oksijen türleri üretmesi esasına dayanır. 2023 yılında yayımlanan bir derlemede, fotodinamik terapinin özellikle antibiyotiklere dirençli mikroorganizmaların eliminasyonunda umut vadettiği belirtilmiş; ancak yüksek maliyet ve cihaz gereksinimleri nedeniyle rutin klinik uygulamalarda henüz geniş çapta benimsenemediği vurgulanmıştır (Muhammad, Chevalier, Rocca, Brulat-Bouchard, & Medioni, 2014).

İrrigasyon Aktivasyon Teknikleri: Gelenekselden Moderne

Kök kanal sisteminin karmaşık anatomik yapısı nedeniyle, sadece manuel irrigasyonla yeterli dezenfeksiyon sağlanamayabilir. Bu nedenle irrigantların etkinliğini artırmak amacıyla çeşitli aktivasyon teknikleri geliştirilmiştir. Aktivasyon, irrigantın kanal sistemine daha derinlemesine nüfuz etmesini, biofilm ve debrislerin daha etkili uzaklaştırılmasını sağlar.

Manuel Agitasyon (Manual Dynamic Irrigation)

Manuel dinamik agitasyon (MDA), kök kanal tedavisinde irrigantın etkinliğini artırmak amacıyla kullanılan basit ve düşük maliyetli bir tekniktir. Bu yöntemde, kanalın çalışma boyuna uygun şekilde yerleştirilen bir gutta-perka konisi veya el aleti, kısa ve ritmik yukarı-aşağı hareketlerle irrigantın kanal içinde hareket etmesini sağlar. Bu mekanik hareket, irrigantın dentin duvarlarıyla daha iyi temas etmesine ve debrislerin uzaklaştırılmasına yardımcı olur. MDA'nın uygulanması kolaydır ve ek ekipman gerektirmez; ancak etkinliği, daha gelişmiş aktivasyon yöntemlerine kıyasla sınırlı olabilir. 2023 yılında yayımlanan bir in vitro çalışmada, farklı irrigasyon aktivasyon tekniklerinin smear tabakası giderimi üzerindeki etkinlikleri karşılaştırılmıştır. Çalışmada, manuel agitasyon, ultrasonik aktivasyon ve lazer aktivasyonu yöntemleri değerlendirilmiştir. Sonuçlar, ultrasonik ve lazer aktivasyonunun smear tabakasını manuel agitasyona göre daha etkili bir şekilde giderdiğini göstermiştir. Özellikle apikal bölgede, manuel agitasyonun smear tabakasını uzaklaştırmada daha az etkili olduğu belirlenmiştir (Rao et al., 2023).



Şekil 1. Gutta perka ile agitasyon (Machtou, 2018)

Ultrasonik Aktivasyon

Ultrasonik aktivasyon, endodontik irrigasyonun etkinliğini artırmak amacıyla sıklıkla tercih edilen yöntemlerden biridir. Bu teknikte, irrigant sıvısı kanal içinde ultrasonik enerjiyle aktive edilerek yüksek frekanslı titreşimler oluşturulur. Bu titreşimler sayesinde sıvının kanal duvarlarıyla teması artar, böylece debris uzaklaştırma ve bakteriyel eliminasyon daha etkili hale gelir. Özellikle apikal bölgelerdeki kompleks anatomilerin temizliğinde, bu yöntemin manuel veya sonik yöntemlere kıyasla daha üstün performans gösterdiği bildirilmektedir.

Endodontik irrigasyonda kullanılan ultrasonik aktivasyon sistemlerinden biri olan Irrisafe, kanal içerisindeki irrigantın etkinliğini artırmak amacıyla yüksek frekanslı titreşimler üretir. Bu sistemin kullanımı sırasında irrigant sıvısı, Irrisafe uçları aracılığıyla ultrasonik enerji ile aktive edilir. Bu sayede, dentin duvarlarına daha etkin temas sağlanır ve debris ile mikroorganizmaların uzaklaştırılması önemli ölçüde kolaylaşır. Özellikle dar

ve apikal bölgelerdeki temizliği artırarak, geleneksel yöntemlere kıyasla daha yüksek klinik başarı sunar. Gösterilen görselde, cihazın ergonomik tasarımı ve dar yapısı, ulaşılması zor alanlara müdahaleyi kolaylaştıracak şekilde optimize edilmiştir.

2021 yılında Khaord et al. tarafından gerçekleştirilen bir in vitro çalışmada, %17 EDTA ile ultrasonik aktivasyonun smear tabakasının ortadan kaldırılmasında geleneksel enjektörle uygulamaya göre anlamlı derecede daha etkili olduğu gösterilmiştir. Araştırmacılar, ultrasonik aktivasyonun dentin tübüllerine daha derin penetrasyon sağladığını ve irrigantın kanal içi sirkülasyonunu önemli ölçüde artırdığını vurgulamıştır (Hosny, El Khodary, El Boghdadi, & Shaker, 2021).



Şekil 2. Bir ultrasonik aktivatör olan Irrisafe (Satelec Acteon Group, Mérignac, France)

Sonik Aktivasyon

Sonik aktivasyon, irrigasyon çözeltisinin hareketini artırmak amacıyla düşük frekansta (genellikle 1–6 kHz) çalışan sistemler kullanılarak gerçekleştirilir. Bu yöntem, özellikle daha az invaziv olması, ekipman maliyetinin düşük olması ve kolay uygulanabilirliği ile öne çıkar. Sonik sistemlerde oluşan sıvı hareketi, kanal içindeki irrigantın daha geniş bir alana yayılmasına ve mikrobiyal eliminasyonun artmasına yardımcı olur. Bununla birlikte, bu yöntemle elde edilen kaviteasyon ve akustik mikroakım etkisi, ultrasonik sistemlere kıyasla daha zayıftır. Sonik aktivasyon sistemleri arasında yaygın olarak kullanılan cihazlardan biri olan EndoActivator (Dentsply Sirona, York, Pensilvanya, Ameika Birleşik Devletleri), pratik kullanımı ve esnek polimer uçları sayesinde güvenli bir irrigasyon aktivasyonu sağlamaktadır. 2022 yılında yapılan bir çalışmada, sonik aktivasyon

sistemlerinin smear tabakası temizliği üzerindeki etkisi değerlendirilmiş ve geleneksel şırınga ile irrigasyona göre daha etkili sonuçlar elde edildiği bildirilmiştir. Ancak çalışma aynı zamanda, sonik sistemlerin ultrasonik sistemlere kıyasla apikal bölgede daha sınırlı temizlik sağladığını da ortaya koymuştur (Paixão, Rodrigues, Grenho, & Fernandes, 2022).



Şekil 3. Bir sonik aktivatör çeşidi olan EndoActivator (Ruddle, 2015)



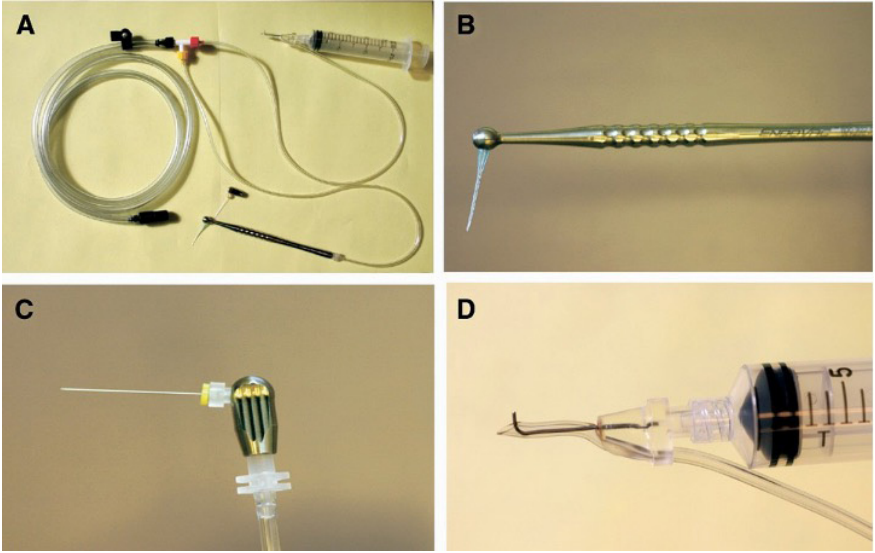
Şekil 4. Kök kanal irrigasyonunda EndoActivator sistem kullanımı örneği (Ruddle, 2015)

Negatif Basıncılı İrrigasyon Sistemleri

Negatif basınçlı irrigasyon sistemleri, irrigantın kök kanalına pozitif basınçla gönderilmesi yerine, apikalden emilerek geri çekilmesi prensibine dayanır. Bu yaklaşım, irrigantın apikal foramenin ötesine taşma riskini azaltarak güvenliği artırırken, aynı zamanda apikal bölgede etkili bir irrigasyon sağlar. Bu sistemler özellikle apikal ekstrüzyonun önlenmesi gereken vakalarda tercih edilir ve klinik olarak daha kontrollü bir irrigasyon sağlar. Yapılan araştırmada, EndoVac sistemi ile uygulanan negatif basınçlı

irrigasyonun, geleneksel şırınga yöntemine kıyasla apikal için irrigasyonu açısından daha etkili ve güvenli olduğu rapor edilmiştir. Araştırmada, irrigantın apikal bölgeye ulaşımı ve geri emilimi detaylı olarak incelenmiş ve irrigant ekstrüzyonunun minimal olduğu gözlemlenmiştir (Paixão et al., 2022).

Yapılan araştırmalar, bu sistemlerin geleneksel enjektörle uygulanan yöntemlere kıyasla daha güvenli ve etkili olduğunu göstermektedir. Örneğin, Nielsen ve Baumgartner tarafından yapılan bir çalışmada, EndoVac sistemi ile uygulanan negatif basınçlı irrigasyonun, apikal için irrigasyonunda daha başarılı olduğu rapor edilmiştir. Çalışma, irrigantın apikal bölgeye etkili bir şekilde ulaştığını ve irrigant ekstrüzyonunun minimal seviyede olduğunu göstermiştir (Nielsen & Baumgartner, 2007).



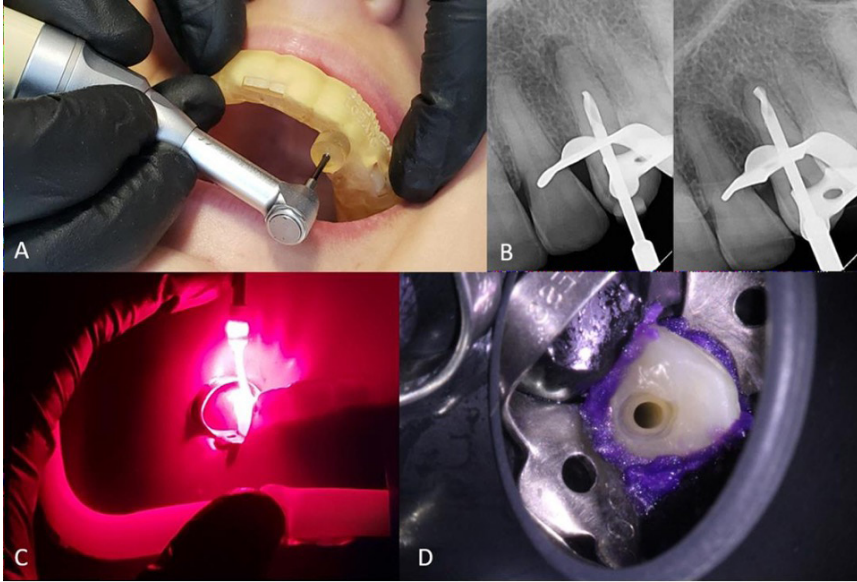
Şekil 5. EndoVac negatif basınçlı irrigasyon sisteminin bileşenleri.

(A) Tüm sistemin genel görünümü: hortumlar, “T” bağlantısı, enjektör ve emiş bağlantısı. (B) Kanalin koronal kısmının yıkanması için kullanılan makrokannül. (C) Kanalin apikal kısmında, çalışma boyuna kadar irrigasyon sağlayan mikrokannül. (D) Irrigantın pulpa odasına verilmesini sağlayan enjektöre bağlı özel uç; fazla solüsyon aynı anda emilir (Nielsen & Baumgartner, 2007).

Fotodinamik Terapi (PDT)

Fotodinamik terapi (PDT), endodontik irrigasyon protokollerine entegre edilen modern biyofiziksel bir yöntemdir. Temel prensibi, fotosensitizer bir ajanın kök kanalına uygulanması ve ardından belirli bir dalga

boyundaki ışıkla aktive edilerek reaktif oksijen türlerinin oluşturulmasıdır. Bu reaktif moleküller, bakteriyel hücre zarlarını parçalayarak mikroorganizmaları yok eder. Antibiyotiklere dirençli patojenler üzerinde de etkili olabilmesi, PDT'yi özellikle zorlayıcı vakalarda cazip hale getirmektedir. 2023 yılında yayımlanan bir çalışmada, fotodinamik terapinin *Enterococcus faecalis* biyofilmleri üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Çalışmada, riboflavin fotosensitizeri ve mavi diyot lazer (BDL) kullanılarak yapılan PDT'nin, *E. faecalis* biyofilmlerini etkin bir şekilde azalttığı bulunmuştur. Ayrıca, bu yöntemin SWEEPS (Shock Wave-Enhanced Emission Photoacoustic Streaming: Şok Dalga Destekli Yayınımli Fotoakustik Akış) tekniği ile kombinasyonu, antibakteriyel etkinliği daha da artırmıştır. Bu sonuçlar, PDT'nin endodontik tedavilerde etkili bir yardımcı yöntem olabileceğini göstermektedir (Shahi Ardakani et al., 2023).



Şekil 6.A) Kök kanalı girişini yönlendirmek amacıyla ağıza yerleştirilmiş 3D baskı rehber şablon. B) Yönlendirilmiş giriş sırasında frezin pozisyonunun radyografik olarak kontrolü. C) Fotodinamik terapi uygulaması. D) Biyoseramik sealer ile kanal dolumundan önceki klinik görünüm. (Olivi et al., 2011)

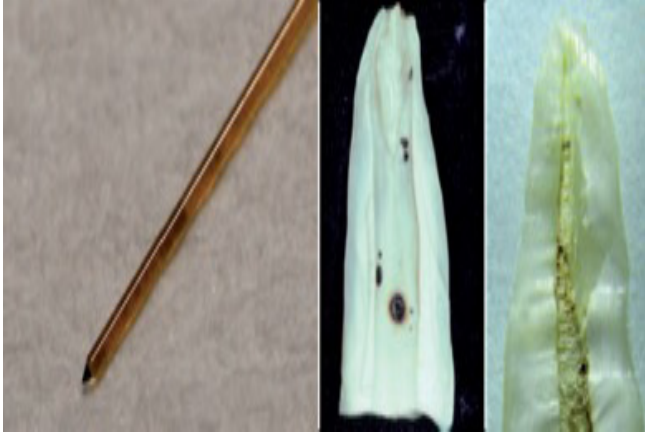
Lazer Destekli İrrigasyon

Lazer destekli irrigasyon, endodontik tedavilerde dezenfeksiyon etkinliğini artırmak amacıyla geliştirilen yenilikçi bir yöntemdir. Bu teknikte, lazer enerjisi ile kanal içerisindeki irrigant aktive edilerek sıvının daha derinlere ulaşması sağlanır. Özellikle Er:YAG ve Er,Cr:YSGG lazerleri, dentin üzerinde minimal termal hasar oluşturarak hem güvenli hem de et-

kili bir dezenfeksiyon sağlar. Bu sistemlerde kullanılan özel uçlar sayesinde (bkz. Şekil 7), lazer ışını kanal duvarlarına yönlendirilmeden radial olarak yayılır ve sıvı içerisinde mikroakımlar ile kavitasyon etkisi oluşturur.

PIPS (Photon-Induced Photoacoustic Streaming: Işıkla İndüklenen Fotoakustik Akış) yöntemi, lazerin uç kısmı kanal içine sokulmadan, erişim kavitesinde uygulanarak irrigantta fotoakustik dalgalar oluşturur (Şekil 9). Bu dalgalar, sıvının kanal sistemi boyunca hareketini hızlandırır ve biyofilm ile smear tabakasının uzaklaştırılmasına katkı sağlar (Şekil 8). SWEEPS (Shock Wave-Enhanced Emission Photoacoustic Streaming) tekniğinde ise çift darbe lazer atımları ile oluşan şok dalgaları, PIPS'e göre daha güçlü akustik etkiler sağlar. Bu teknik, irrigantın kanal anatomisinin derin bölgelerine erişimini kolaylaştırır.

2023 yılında yayımlanan bir sistematik derlemede, Er:YAG lazer destekli irrigasyonun smear tabakasını daha etkili kaldırdığı, dentin tübüllerine daha iyi penetrasyon sağladığı ve özellikle apikal bölgede geleneksel ve ultrasonik yöntemlere göre üstün sonuçlar verdiği rapor edilmiştir (Fiegler-Rudol et al., 2025).



Şekil 7. Er,Cr:YSGG lazeri için radyal atış uçları



Şekil 8. PIPS (Photon-Induced Photoacoustic Streaming: Işıklı İndüklenen Fotoakustik Akış) yönteminde kullanılan lazer ucu (Olivi et al., 2011)

Diğer İrrigasyon Aktivasyon Teknikleri

Gelişen teknolojiyle birlikte, endodontik irrigasyonun etkinliğini artırmaya yönelik yeni ve alternatif yöntemler geliştirilmektedir. Bunlar arasında pozitif ve negatif basınç sistemleri (EndoVac gibi), mikrokannül teknolojileri, ozonlu su irrigasyonu ve elektrokinetik irrigasyon sistemleri yer almaktadır. Özellikle negatif basınçlı sistemler, irrigantın apikal bölgeye güvenli bir şekilde ulaştırılmasına olanak tanırken, apikal ekstrüzyon riskini de azaltmaktadır. Ayrıca, son yıllarda araştırmalarda öne çıkan ozonlu irrigasyon sistemleri, yüksek antimikrobiyal etkisi ve biyouyumluluğu nedeniyle ilgi görmektedir. Örneğin, 2022 yılında yapılan bir karşılaştırmalı çalışmada, EndoVac sisteminin apikalde irrigant penetrasyonu açısından geleneksel iğne irrigasyonuna göre anlamlı şekilde üstün olduğu bildirilmiştir. Aynı çalışmada, ozonlu irrigasyonun da biyofilm eliminasyonunda etkili olduğu ve geleneksel yöntemlerle karşılaştırıldığında daha az sitotoksik etki gösterdiği vurgulanmıştır (Ma et al., 2022).

Gelecek Perspektifi: Bütüncül ve Yüksek Teknoloji Tabanlı İrrigasyon Yaklaşımları

Endodontide irrigasyon protokollerinin geleceği, yalnızca daha etkili dezenfeksiyon sağlamayı değil, aynı zamanda tedavi sürecini daha güvenli, öngörülebilir ve hasta dostu hâle getirmeyi amaçlayan multidisipliner teknolojiler etrafında şekillenmektedir. Bu kapsamda özellikle üç önemli alan öne çıkmaktadır: nanoteknoloji, yapay zekâ ve mikrobotik sistemler.

Nanoteknolojiye Dayalı İrrigant Sistemleri

Nanoparçacık teknolojisi, irrigantların dentin tübüllerine daha derinlemesine nüfuz etmesini sağlayarak, klasik irrigantların ulaşamadığı mikroorganizmaların elimine edilmesinde büyük bir potansiyel sunmaktadır. Gümüş, çinko oksit veya klorheksidin gibi antimikrobiyal özelliklere sahip nanoparçacıkların kullanımı, hem biyofilmleri çözmede hem de antibiyotik direnciyle savaşta yeni bir çıkış açabilir. Ayrıca, hedefe yönelik ilaç salımı sağlayan akıllı nano-kapsüller sayesinde, irrigasyon sadece pasif temizlik değil, aynı zamanda biyolojik modülasyon aracı hâline gelebilir.

Yapay Zekâ Destekli Uygulama Protokolleri

Yapay zekâ, irrigasyon sürecinde optimal irrigant seçimi, doz ayarlamaları ve aktivasyon sürelerinin belirlenmesinde klinisyene yardımcı olabilecek algoritmaların geliştirilmesini mümkün kılmaktadır. AI tabanlı klinik destek sistemleri, önceki tedavi verilerinden öğrenerek kişiselleştirilmiş irrigasyon protokolleri önerebilir ve hata riskini azaltabilir. Özellikle karmaşık anatomili vakalarda irrigasyon stratejilerini otomatik olarak optimize edebilecek bu sistemlerin, geleceğin dijital endodontisinde yaygınlaşması beklenmektedir.

Mikrobotik İrrigasyon Sistemleri

Mikrobotik uygulamalar henüz erken araştırma aşamasında olsa da, mikro düzeyde hareket edebilen otonom irrigasyon araçlarının geliştirilmesi, kanal içindeki dezenfeksiyonun fiziksel sınırlarını genişletebilir. Bu sistemler, kök kanal içinde hedeflenen bölgelere yönlendirilebilir, lokal olarak irrigant salabilir veya biyoaktif yüzeyleri sayesinde dezenfeksiyon sağlayabilir. Böylece konvansiyonel iğne veya pasif taşıma yöntemlerine kıyasla çok daha etkin ve minimal invaziv irrigasyon yapılabilecektir.

İrrigantların Kombinasyonu ve Sıralaması: Klinik Stratejiler

Geleneksel İrrigasyon Stratejileri ve Kökleri

Endodontide irrigasyonun tarihçesi, ilk olarak sodyum hipoklorit (NaOCl) kullanımının önerilmesiyle başlar. 1940’larda Grossman, NaOCl’nin organik doku çözme özelliğinden yararlanarak kök kanal dezenfeksiyonu için kullanılabileceğini göstermiştir. Ancak o dönemde irrigantların sıralı ve kombine kullanımı değil, tek başına uygulamaları daha yaygındı.

Eski Bir Yöntem: Tek İrrigant Kullanımı

Uzun yıllar boyunca klinik uygulamalarda yalnızca NaOCl ya da yalnızca salin (tuzlu su) gibi irrigantların tek başına kullanımı söz konusuydu. Bu durum, hem smear tabakasının etkin şekilde uzaklaştırılamaması hem de mikrobiyal yükün tam anlamıyla elimine edilememesi gibi sınırlılıklar doğuruyordu. Özellikle smear tabakasının varlığının öneminin anlaşılmasından önceki dönemlerde, bu faktörler göz ardı edilmekteydi.

İlk Kombinasyon Yaklaşımları

Endodontik irrigasyon protokollerinin evrimi, irrigantların bireysel etkilerinin ötesinde, kombine kullanımlarının oluşturduğu sinerjinin fark edilmesiyle ivme kazanmıştır. Özellikle 1980’li ve 1990’lı yıllarda yapılan çalışmalar, sodyum hipokloritin (NaOCl) organik doku çözme kabiliyeti ile etilendiamintetraasetik asidin (EDTA) inorganik debrisleri uzaklaştırma etkisinin birbirini tamamladığını göstermiştir. Bu bilimsel farkındalık, irrigantların ardışık kullanımı esasına dayanan klasik irrigasyon protokolünün temellerini atmıştır. Protokole göre, öncelikle NaOCl ile mikrobiyal kontaminasyonun azaltılması ve nekrotik dokuların çözünmesi hedeflenmekte, ardından EDTA ile smear tabakasının etkin bir şekilde uzaklaştırılması sağlanmaktadır. Bu yaklaşım, günümüzde hâlâ yaygın olarak benimsenmekte olup irrigasyonun temel taşlarından biri kabul edilmektedir. Ancak son yıllarda irrigantların kimyasal etkileşimleri, uygulama süreleri ve sıralama stratejileri üzerine yapılan araştırmalar, bu klasik protokolün daha hassas ve biyoyumlu şekilde optimize edilmesine yönelik yeni bilgiler sunmuştur.

Modern Yaklaşımlar: İrrigant Kombinasyonlarının Optimizasyonu ve Akıllı Sıralama Stratejileri

Geleneksel irrigasyon protokolleri klinik başarıda önemli bir yer tutsa da, günümüzde irrigantların kombinasyonu ve sıralamasına yönelik daha rafine, biyoyumlu ve etkili stratejiler geliştirilmektedir. Modern endodontik uygulamalarda yalnızca irrigantların kimyasal özellikleri değil, aralarındaki etkileşimler, uygulama süresi, kanal morfolojisi ve aktivasyon teknikleri de göz önünde bulundurulmaktadır. Bu kapsamda “akıllı sıralama” kavramı ön plana çıkmıştır. Bu yaklaşımda irrigantlar, birbirlerinin etkisini maksimum düzeye çıkaracak ve potansiyel toksik etkileşimleri en aza indirecek biçimde sıralanır.

Örneğin, NaOCl ile CHX’nin ardışık uygulanmasının toksik para-klo-roanilin (PCA) bileşiği oluşturduğu bilinmektedir. Bu nedenle araya salin veya alkol gibi bir arındırıcı sıvı konulması önerilmektedir. Benzer şekilde,

EDTA'nın uzun süreli uygulanması dentin erozyonuna yol açabildiği için, uygulama süresi sınırlandırılarak ideal etkinlik-zarar dengesi kurulmaya çalışılmaktadır.

Ayrıca güncel protokollerde QMix gibi kombinasyon irrigantlarının kullanımı artmaktadır. Bu tür ajanlar hem smear tabakası giderimi hem de mikrobiyal eliminasyonu tek aşamada sağlayarak zaman kazancı ve klinik kolaylık sunmaktadır. Bununla birlikte, bu irrigantların diğer ajanlarla etkileşimi hâlâ araştırma konusudur. 2022 yılında Zhang ve arkadaşlarının gerçekleştirdiği bir sistematik derlemede, irrigantların ardışık kullanımı sırasında araya tamponlayıcı sıvı yerleştirmenin çözünür doku miktarını ve antibakteriyel etkinliği önemli ölçüde artırdığı bildirilmiştir. Bu tür bulgular, irrigasyon protokollerinin gelecekte daha kişiselleştirilmiş ve doku dostu hâle getirilebileceğini göstermektedir (Liang et al., 2022)

Yapay Zekâ ve Dijital Teknolojilerin İrrigasyon Protokollerine Entegrasyonu

Endodontide irrigasyon protokolleri günümüzde yalnızca kimyasal ajanlar ve mekanik aktivasyon teknikleriyle sınırlı kalmayıp, dijital teknolojilerin desteğiyle daha akılcı ve kişiselleştirilmiş hale gelmektedir. Özellikle yapay zekâ (YZ), makine öğrenmesi ve dijital görüntüleme sistemlerinin kullanımı, irrigasyon planlamasını kök kanal morfolojisine ve hasta bazlı risk faktörlerine göre optimize etme potansiyeline sahiptir.

Yapay zekâ algoritmaları, CBCT verilerinden elde edilen üç boyutlu anatomik analizler sayesinde kök kanal sisteminin varyasyonlarını detaylı şekilde haritalandırabilir. Bu veriler ışığında, en uygun irrigant tipi, konsantrasyonu, uygulama süresi ve aktivasyon tekniği dijital olarak önerilebilir. Bu sistemler özellikle karmaşık anatomilere sahip dişlerde tedavi sürecini kolaylaştırmakta ve başarısızlık oranını azaltmaktadır.

2023 yılında yapılan bir çalışmada, yapay zekâ destekli irrigasyon planlamasının kök kanal dezenfeksiyon oranlarını manuel planlamaya kıyasla %23 oranında artırdığı ve uygulama süresini önemli ölçüde kısalttığı bildirilmiştir. Bu gelişme, yalnızca irrigasyon etkinliğini artırmakla kalmamış, aynı zamanda hasta konforunu ve tedavi süresini olumlu yönde etkilemiştir.

Buna paralel olarak, robotik destekli mikroiirrigasyon sistemlerinin geliştirildiği ve deneysel aşamada olduğu da bilinmektedir. Bu sistemler, irrigantın kanalda dolaşımını mikron düzeyinde yönlendirerek hem israfı azaltmakta hem de daha güvenli bir uygulama sağlamaktadır. Gelecekte bu tür akıllı sistemlerin klinik pratiğe daha fazla entegre olması beklenmektedir (Khanagar et al., 2023).

SONUÇ

Endodontik tedavinin başarısı, kök kanal sisteminin mümkün olan en yüksek düzeyde dezenfekte edilmesine bağlıdır. Mekanik şekillendirmenin sınırlılıkları göz önüne alındığında, etkili irrigasyonun rolü daha da belirgin hale gelmektedir. Bu bağlamda, irrigantların kimyasal özellikleri kadar, bunların kanal içinde etkinliğini artıran aktivasyon teknikleri de klinik başarıda kritik öneme sahiptir.

Geleneksel irrigasyon yaklaşımlarından modern aktivasyon tekniklerine uzanan bu süreçte, sodyum hipoklorit ve EDTA gibi standart çözeltilerin yanı sıra QMix, MTAD ve fotodinamik terapi gibi ileri teknolojilere dayalı ajanlar irrigasyon etkinliğini artırmak üzere geliştirilmiştir. Ayrıca sonik, ultrasonik, negatif basınçlı ve lazer destekli aktivasyon yöntemleri, irrigantların kanal sistemine daha etkin nüfuz etmesini ve biyofilm eliminasyonunun artırılmasını sağlamıştır.

Yapılan araştırmalar, bu yöntemlerin her birinin farklı avantaj ve sınırlılıkları olduğunu ortaya koymuştur. Bu nedenle irrigasyon protokollerinin klinik karar süreçlerinde hasta bazlı olarak seçilmesi büyük önem taşır. Gelecekte ise yapay zekâ destekli karar sistemleri, mikrobotik uygulamalar ve nanoteknolojik irrigantlar ile irrigasyon protokollerinin daha öngörülebilir, güvenli ve bireyselleştirilmiş hale gelmesi beklenmektedir.

Sonuç olarak, klasik irrigasyon anlayışından ileri düzey aktivasyon stratejilerine geçiş, endodontik tedavilerin hem etkinliğini hem de uzun dönem başarısını önemli ölçüde artırmaktadır. Bu alandaki bilimsel ve teknolojik gelişmelerin takip edilerek klinik uygulamalara entegre edilmesi, modern endodontinin vazgeçilmez bir parçası hâline gelmiştir.

KAYNAKLAR

- Alessi, R. S., Jitumori, R. T., Bittencourt, B. F., Gomes, G. M., & Gomes, J. C. (2023). Effect of irrigation protocols on smear layer removal, bond strength and nanoleakage of fiber posts using a self-adhesive resin cement. *Restorative Dentistry & Endodontics*, 48(3).
- Chia, M. S. Y., Parolia, A., Lim, B. S. H., Jayaraman, J., & de Moraes Porto, I. C. C. (2020). Effect of QMix irrigant in removal of smear layer in root canal system: a systematic review of in vitro studies. *Restorative Dentistry & Endodontics*, 45(3).
- Dahlstrand Rudin, A., Dahlstrand Rudin, A., Ulin, C., & Kvist, T. (2024). The use of 0.5% or 3% N a OCl for irrigation during root canal treatment results in similar clinical outcome: A 6-year follow-up of a quasi-randomized clinical trial. *International Endodontic Journal*, 57(12), 1745–1757.
- Fiegler-Rudol, J., Grzech-Leśniak, Z., Tkaczyk, M., Grzech-Leśniak, K., Zawilska, A., & Wiench, R. (2025). Enhancing Root Canal Disinfection with Er: YAG Laser: A Systematic Review. *Dentistry Journal*, 13(3), 101.
- Hosny, N. S., El Khodary, S. A., El Boghdadi, R. M., & Shaker, O. G. (2021). Effect of Neem (*Azadirachta indica*) versus 2.5% sodium hypochlorite as root canal irrigants on the intensity of post-operative pain and the amount of endotoxins in mandibular molars with necrotic pulps: a randomized controlled trial. *International Endodontic Journal*, 54(9), 1434–1447.
- Khanagar, S. B., Alfadley, A., Alfouzan, K., Awawdeh, M., Alaqla, A., & Jamleh, A. (2023). Developments and performance of artificial intelligence models designed for application in endodontics: A systematic review. *Diagnostics*, 13(3), 414.
- Liang, A., Huang, L., Li, B., Huang, Y., Zhou, X., Zhang, X., & Gong, Q. (2022). Micro-CT evaluation of different root canal irrigation protocols on the removal of accumulated hard tissue debris: a systematic review and meta-analysis. *Journal of Clinical Medicine*, 11(20), 6053.
- Ma, X., Yamaguchi, A., Maeshige, N., Uemura, M., Noguchi, H., Kondo, H., & Fujino, H. (2022). Enhancement of astaxanthin incorporation by pulsed high-intensity ultrasound in LPS-stimulated macrophages. *Journal of Medical Ultrasonics*, 49(2), 125–132.
- Machtou, P. P. (2018). Manual dynamic activation technique. *Clinical Dentistry Reviewed*, 2, 1–5.
- Mahajan, V. A., Kamra, A. I., & Dahiwal, S. S. (2010). The effect of 17% EDTA and MTAD on smear layer removal and on erosion of root canal dentin when used as final rinse: An: in vitro: SEM study. *Journal of the International Clinical Dental Research Organization*, 2(3), 113–118.
- Mohammadi, Z., Shalavi, S., Kinoshita, J.-I., Giardino, L., Gutmann, J. L., Rad, S. B., ... Jafarzadeh, H. (2021). A Review on Root Canal Irrigation Solutions in Endodontics. *Journal of Dental Materials & Techniques*, 10(3).

- Muhammad, O. H., Chevalier, M., Rocca, J.-P., Brulat-Bouchard, N., & Medioni, E. (2014). Photodynamic therapy versus ultrasonic irrigation: interaction with endodontic microbial biofilm, an ex vivo study. *Photodiagnosis and Photodynamic Therapy*, 11(2), 171–181.
- Nielsen, B. A., & Baumgartner, J. C. (2007). Comparison of the EndoVac system to needle irrigation of root canals. *Journal of Endodontics*, 33(5), 611–615.
- Olivi, G., Crippa, R., Iaria, G., Kaitsas, V., DiVito, E., & Benedicti, S. (2011). Laser in endodontics (Part II). *Roots*, 2, 6–12.
- Paixão, S., Rodrigues, C., Grenho, L., & Fernandes, M. H. (2022). Efficacy of sonic and ultrasonic activation during endodontic treatment: a meta-analysis of in vitro studies. *Acta Odontologica Scandinavica*, 80(8), 588–595.
- Rao, P. D., Sandeep, A. H., Madhubala, M. M., & Mahalaxmi, S. (2023). Comparative evaluation of effect of nisin-incorporated ethylenediamine tetraacetic acid and MTAD on endodontic biofilm eradication, smear layer removal, and depth of sealer penetration. *Clinical Oral Investigations*, 27(12), 7247–7259.
- Ruddle, C. J. (2015). Endodontic disinfection: Tsunami irrigation. *Saudi Endodontic Journal*, 5(1), 1–12.
- Shahi Ardakani, A., Afrasiabi, S., Sarraf, P., Benedicenti, S., Solimei, L., & Chini-forush, N. (2023). In vitro assessment of SWEEPS and antimicrobial photodynamic therapy alone or in combination for eradicating *Enterococcus faecalis* biofilm in root canals. *Pharmaceutics*, 15(11), 2628.



BÖLÜM

3

DEJENERATİF TEMPOROMANDİBULAR EKLEM HASTALIKLARINDA MULTİDİSİPLİNER YAKLAŞIMLAR

Serkan BAHRİLLİ¹

Fatma ALTIPARMAK²

1 Araş. Gör., Necmettin Erbakan Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi, Ağız Diş ve Çene Radyolojisi AD.

0009-0006-3730-7235

2 Araş. Gör., Necmettin Erbakan Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi Periodontoloji AD.

[0000-0002-3077-0968](https://doi.org/10.1501/0000-0002-3077-0968)

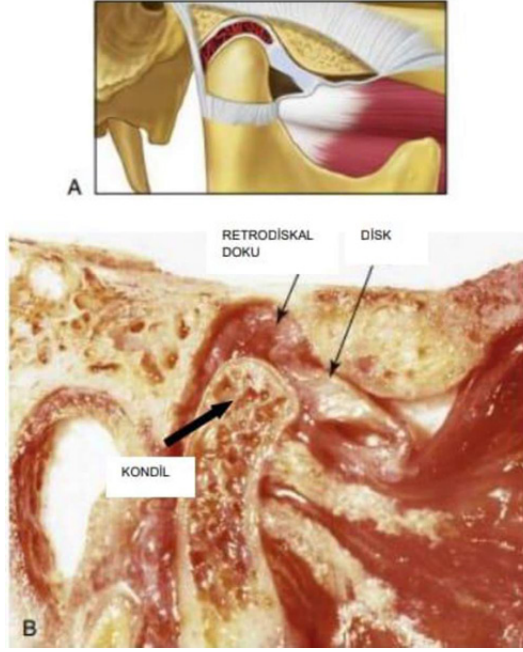
1. TEMPOROMANDİBULAR EKLEM ANATOMİSİ VE FİZYOLOJİSİ

Temporomandibular eklem (TME), mandibula ile temporal kemik arasında yer alan, çift taraflı ve sinovyal özellik taşıyan bir yapıdır. Kokuşma, çiğneme ve yutma gibi temel fonksiyonların gerçekleştirilmesinde görev alır (Okeson & Ckeson, 2013). Anatomik olarak mandibular kondil, temporal kemikteki artiküler eminens, bikonkav yapıdaki artiküler disk, eklem kapsülü ve destekleyici ligamentler bu yapıyı oluşturur. Kondilin yüzeyi fibröz bağ dokusuyla kaplıdır; bu durum, eklemde dejeneratif değişimlere karşı daha dirençli olmasını sağlar (De Leeuw, Klasser, & Pain, 2018). Temporal kemiğin oluşturduğu mandibular fossa ve artiküler eminens, kondilin hareketlerine yön verirken, artiküler disk yük dağılımını sağlar ve sürtünmeyi azaltır (Okeson & Ckeson, 2013).

Eklem kapsülü, TME çevresini sararak sinovyal sıvının bütünlüğünü koruyarak önemli bir rol oynar. Geleneksel olarak önerilen stabilite, lateral (temporomandibular), sfenomandibular ve stilomandibular ligamentlerin etkinliği ile sağlanmaktadır (Peck et al., 2014).

Fonksiyonel olarak, TME, hem rotasyonel hem de translasyonel hareketleri gerçekleştirme kapasitesine sahiptir. Ağız açma hareketinin ilk evresinde mandibular kondil, alt eklem boşluğunda döner ve bu hareket ortalama 20–25 mm’lik bir açıklık sağlar. Bu aşamanın ardından, kondil ve disk birlikte artiküler eminens boyunca anteriora doğru kayar; bu translasyonel hareket, ağız açıklığının ileri safhalarında ve protrüzyon sırasında belirginleşir. Bu iki hareketin eşzamanlı koordinasyonu, çiğneme ve kokuşma gibi karmaşık mandibular fonksiyonların sağlıklı yürütülmesi için gereklidir (List & Jensen, 2017).

Bu hareketlerin denetimi, kaslar ve proprioseptif mekanizmaların uyumu ile gerçekleşir. Masseter, temporalis, medial ve lateral pterygoid kaslar mandibulanın farklı yönlerdeki hareketlerinden sorumludur. Özellikle lateral pterygoid kasın artiküler diske tutunması, disk-kondil kompleksinin hareket koordinasyonunda kilit rol oynar (Okeson & Ckeson, 2013). Eklem fonksiyonları, kas içicikleri, periodontal reseptörler ve sinovyal zar içindeki duyu uçları aracılığıyla merkezi sinir sistemine aktarılan geri bildirimlerle düzenlenir (Juhl, Jensen, Nørholt, & Svensson, 2009). Bu nöromüsküler uyum sayesinde TME, günlük yaşamdaki yüksek frekanslı ve değişken yüklenmelere karşı fizyolojik direncini koruyabilir.



Şekil 1:

- A.** Diskin normal anatomik konumundan kalıcı olarak yer değiştirdiği redüksiyonsuz disk deplasmanı örneği gösterilmektedir. Diskin posterior bölgesi belirgin şekilde incelmış ve diskal bağ dokularında aşırı gevşeme meydana gelmiştir. Bu durum, diskın artiküler yüzey boyunca anteriora kaymasına olanak tanımıştır. Kondil, bu durumda doğrudan retrodiskal bölgeyle temas halindedir.
- B.** İkinci görselde de redüksiyonsuz disk deplasmanına ait benzer bir tablo sunulmaktadır. Disk, kondilin önünde konumlanmış şekilde kalıcı olarak yer değiştirmiştir ve çene hareketi sırasında diskın normal pozisyona dönmesi mümkün değildir.

2. TME DEJENERATİF BOZUKLUKLARININ ETYOLOJİSİ VE PATOFİZYOLOJİSİ

Temporomandibular eklemlerdeki işlevsel bozukluklar, çiğneme ile ilgili sorunlar araştırılırken sıklıkla karşılaşılan klinik durumlardan biridir. Bu durum, özellikle belirtilerin toplumda oldukça yaygın görülmesinden kaynaklanmaktadır. Örneğin, eklem sesleri gibi bulgular çoğunlukla ağrıya neden olmadığından hastalar tarafından önemsenmeyebilir ve bu nedenle tıbbi yardım arayışı olmayabilir (Rajesh, 2010).

Bu bozukluklar genellikle üç temel grupta sınıflandırılır: kondil-disk kompleksine ilişkin problemler, eklem yüzeyleri arasındaki yapısal uyum-

suzluklar ve inflamatuvar kaynaklı eklem bozuklukları. İlk iki grup, birlikte değerlendirildiğinde literatürde “disk interferens bozuklukları” olarak tanımlanır. Bu terim ilk olarak Welden Bell tarafından, kondil ve disk arasındaki etkileşimden doğan işlevsel sorunları tanımlamak amacıyla kullanılmıştır.

Bu tür bozukluklar; diskin kondile bağlanma mekanizmasının bozulması, kondil-disk-fossa yüzeyleri arasındaki yapısal uyumsuzluklar veya anatomik olarak normal olan yapıların fizyolojik sınırları aşan hareketler göstermesi gibi çeşitli mekanizmalarla ortaya çıkabilir. Her ne kadar benzer klinik bulgular sergileseler de, bu alt grupların tedavi yaklaşımları birbirinden farklılık gösterdiği için doğru klinik ayrımın yapılması büyük önem taşır (Chen et al., 2012).

İnflamatuvar bozukluklar ise genellikle TME ile ilişkili dokuların lokal inflamatuvar cevabından kaynaklanır ve çoğu zaman uzun süreli veya ilerleyici disk patolojilerinin bir sonucudur. Genel olarak, TME’nin fonksiyonel sorunlarında en sık bildirilen semptomlar ağrı ve hareket kısıtlılığı gibi disfonksiyonel belirtilerdir (Yılmaz, 2008).

3. KLİNİK BULGULAR VE SEMPTOMATOLOJİ

TME dahil olmak üzere herhangi bir eklemden hissedilen ağrı, artralji olarak adlandırılır. Bu tip ağrının, eklem uygulanan yük sonucunda yüzeylerden kaynaklanması ilk bakışta mantıklı görünse de, eklem yüzeylerinde sinir uçları bulunmadığından sağlıklı bir eklemden doğrudan bu yapılar üzerinden ağrı oluşması mümkün değildir. Dolayısıyla artralji, yalnızca eklemi çevreleyen yumuşak dokularda bulunan nosiseptörlerin aktivasyonu ile ortaya çıkabilir (Park, 2015).

Bu nosiseptif algının kaynağı olan üç ana periartiküler yapı şunlardır: diskal bağlar, kapsüler ligamentler ve retrodiskal dokular. Bu yapılardan herhangi biri gerildiğinde ya da özellikle retrodiskal alanlar kompresyona uğradığında, burada bulunan nosiseptörler aktive olur ve ağrı sinyalleri beyne iletilir. Ancak birey, bu üç yapı arasında ağrının tam olarak hangi dokudan kaynaklandığını ayırt edemez; bu nedenle nosiseptif uyarılar, genel olarak “eklem ağrısı” şeklinde algılanır. Nosiseptörlerin uyarılması yalnızca ağrı hissine neden olmakla kalmaz, aynı zamanda alt çeneyi hareket ettiren kaslar üzerinde inhibisyon yaratır. Bu da, ağrı aniden ve beklenmedik şekilde ortaya çıktığında çene hareketlerinin ani olarak durmasına yol açar; bu durum “nosiseptif refleks” olarak adlandırılır. Eğer ağrı kronikleşirse, çene hareketleri daha sınırlı ve kontrollü hale gelir; bu da koruyucu kas aktivasyonu şeklinde kendini gösterir.

Sağlıklı eklem dokularında ortaya çıkan artralji genellikle hareketle ilişkilidir ve karakteristik olarak kısa sürede ortaya çıkan, keskin ve şiddetli bir ağrıdır. Eklem dinlenme durumuna geçmesiyle birlikte bu ağrının da hızla ortadan kalktığı gözlemlenir. Bu hastalık grubunda en sık gözlenen klinik bulgular şunlardır:

Psikolojik Etkenlerin Rolü

Kronik ağrı ile başvuran hastaların önemli bir kısmında eşlik eden psikolojik stres, anksiyete veya depresyon tespit edilmiştir. Psikojenik faktörler hem ağrı algısını şiddetlendirebilir hem de tedaviye olan uyumu azaltabilir. Bu nedenle, tanısal ve terapötik süreçlerde hastaların psikososyal durumunun da değerlendirilmesi önerilir (Rugh & Solberg, 1976).

4. TANI YÖNTEMLERİ

Temporomandibular eklem dejeneratif bozukluklarının tanısı, hem klinik hem de radyolojik değerlendirmeyi içeren çok yönlü bir süreçtir. TME'ye özgü semptomlar; baş, boyun ve çene bölgesindeki birçok hastalıkla benzerlik gösterebildiğinden, sistematik ve dikkatli bir yaklaşım gereklidir (Okeson & Ckeson, 2013)

4.1. Klinik Değerlendirme

Tanının ilk aşaması ayrıntılı bir anamnez ve fizik muayenedir. Hastadan ağrının yeri, süresi, karakteri ve şiddeti hakkında bilgi alınır. Ayrıca eklem sesleri, çene hareketleri, parafonksiyonel alışkanlıklar, geçirilmiş travmalar ve sistemik hastalık öyküsü sorgulanmalıdır (De Leeuw et al., 2018).

Klinik muayene sırasında şu parametreler değerlendirilir:

- Ağız açıklığı ve lateral hareketlerin ölçülmesi
- Çene deviasyonunun gözlenmesi
- Preauriküler bölgede palpasyonla hassasiyet
- Eklem seslerinin dinlenmesi (klik, krepitasyon)
- Çiğneme kaslarının palpasyonu
- Tetik noktalar ve kas spazmları

Bu değerlendirme, semptomların lokalizasyonunu ve ciddiyetini ortaya koyarak tanısal sürecin yönlendirilmesine yardımcı olur (Manfredini, Lobbezoo, & Endodontology, 2010).

4.2. Fonksiyonel Değerlendirme

Mandibular hareketlerin (açma, kapama, lateral deviasyon, protrüzyon) açıklığı ve simetrisi analiz edilir. Hastanın çiğneme sırasında yaşadığı rahatsızlık, yorgunluk ve fonksiyonel kısıtlılık seviyesi göz önüne alınarak fonksiyonel kapasite hakkında fikir sahibi olunur (Koolstra & Van Eijden, 1997).

4.3. Görüntüleme Yöntemleri

Görüntüleme, TME'deki yapısal değişikliklerin objektif olarak değerlendirilmesini sağlar ve tedavi planlamasında yol göstericidir.

- **Panoramik Radyografi:** İlk basamak olarak sıklıkla kullanılır. Kondil morfolojisi, eklem boşluğu darlığı ve osteofitler gözlemlenebilir, ancak yumuşak dokuların değerlendirilmesinde sınırlıdır
- **Manyetik Rezonans Görüntüleme (MRG):** Disk pozisyonu, morfolojisi ve sinovyal yapıların değerlendirilmesinde altın standarttır. Dinamik görüntüleme ile disk-kondil ilişkisi hareket sırasında izlenebilir.
- **Bilgisayarlı Tomografi (BT):** Kemik yapılarıdaki erozyonlar, osteofitler ve ankilozun değerlendirilmesinde etkilidir. Subkondral değişikliklerin net gösterimi için tercih edilir.
- **Ultrasonografi:** Yüzeyel yapıların dinamik değerlendirmesinde kullanılabilir. Deneyimli ellerde disk pozisyonu hakkında bilgi verebilir, ancak derin dokuların görüntülenmesinde yetersiz kalabilir (Kirkhus et al., 2016).

4.4. Laboratuvar Testleri ve Ayırıcı Tanı

TME kaynaklı ağrı ve fonksiyon kaybı, sistemik inflamatuvar hastalıkların bir yansıması da olabilir. Bu durumda bazı laboratuvar testlerinden yararlanılır:

- Romatoid Faktör (RF)
- Antinükleer Antikor (ANA)
- Anti-CCP
- Eritrosit Sedimentasyon Hızı (ESR)
- C-Reaktif Protein (CRP)

Bu testler, özellikle romatoid artrit ve benzeri sistemik durumların dışlanması açısından önemlidir (Gauer & Semidey, 2015).

5. TME DEJENERATİF BOZUKLUKLARINDA AYIRICI TANI

Temporomandibular eklem dejeneratif bozuklukları, semptomatik benzerlik gösteren birçok hastalıkla karışabileceğinden, tanı sürecinde ayırıcı tanı büyük önem taşır. Özellikle baş-boyun bölgesindeki romatolojik, neoplastik, enfeksiyöz ve psikojenik durumlar, TME osteoartriti ile benzer klinik belirtiler oluşturabilir (De Leeuw et al., 2018; Okeson & Ckeson, 2013). Bu nedenle ayırıcı tanı yaklaşımı multidisipliner değerlendirme, detaylı klinik muayene ve ileri görüntüleme yöntemlerinin birlikte ele alınmasını gerektirir.

Başlıca Ayırıcı Tanılar

- **İnflamatuvar Eklem Hastalıkları:**

Romatoid artrit, TME'yi sıklıkla tutan sistemik bir hastalıktır. Bilateral eklem tutulumu, sabah tutukluğu ve istirahat ağrısı ile karakterizedir. Psöriyatik artrit (PsA) ve ankilozan spondilit gibi diğer inflamatuvar hastalıklar da TME'yi etkileyebilir. Bu durumda dermatolojik ve romatolojik bulgular, tanıyı destekler (Gauer & Semidey, 2015; Voog et al., 2003).

- **Travmatik ve Mekanik Bozukluklar:**

Geçirilmiş kondil fraktürleri, subluksasyonlar veya parafonksiyonel alışkanlıklara bağlı mikrotravmalar, TME'de benzer dejeneratif değişikliklere neden olabilir. Bu olgularda dikkatli travma öyküsü alınmalı ve BT ile kemik yapı değerlendirilmelidir.

- **Neoplastik ve Enfeksiyöz Nedenler:**

Osteokondroma, osteosarkom ve kondrosarkom gibi tümöral oluşumlar, TME bölgesinde progresif fonksiyon kaybı ve deformiteye yol açabilir. Enfeksiyöz artritler ise ani başlayan ağrı, ödem, ateş ve şiddetli kısıtlılıkla kendini gösterir. Kan kültürleri ve eklem sıvısı analizi tanı için önemlidir.

- **Psikojenik ve Fonksiyonel Bozukluklar:**

Bazı hastalarda organik bir lezyon olmaksızın, stres, anksiyete ve depresyona bağlı olarak kas ağrısı ve fonksiyon kısıtlılığı görülebilir. Psikojenik kökenli ağrılar genellikle yaygın ve değişken karakterdedir. Psikiyatrik destek ve davranışsal analizler bu hastalarda tedavi sürecine dâhil edilmelidir (Manfredini et al., 2010).

Ayırıcı tanıda görüntüleme bulguları ile birlikte sistemik belirti ve laboratuvar testlerinin dikkatli yorumlanması, gereksiz invaziv işlemlerden kaçınmak ve uygun tedaviye yönlendirmek açısından büyük önem taşır.

6. TEDAVİ PLANLAMASI

Temporomandibular eklem dejeneratif bozukluklarının tedavisinde amaç; ağrıyı azaltmak, eklem fonksiyonlarını korumak veya iyileştirmek, hastanın yaşam kalitesini artırmak ve dejeneratif sürecin ilerlemesini durdurmaktır (De Leeuw et al., 2018). Bu hedeflere ulaşmak için bireyselleştirilmiş ve basamaklı bir tedavi modeli benimsenmelidir. Her hastanın yaşı, klinik semptomları, fonksiyonel düzeyi, psikolojik durumu ve sistemik hastalıkları tedavi planında dikkate alınmalıdır (Okeson & Ckeson, 2013).

Basamaklı Tedavi Yaklaşımı

Tedavi süreci genellikle şu aşamalarla yapılandırılır:

- **Konservatif Tedavi:** İlk basamakta tercih edilir. Non-invaziv, geri dönüşümlü ve düşük yan etki riski taşıyan yöntemleri içerir.
- **Minimal İnvaziv Müdahaleler:** Konservatif tedaviye yanıt alınamayan veya semptomları şiddetli seyreden olgularda uygulanır.
- **Cerrahi Girişimler:** İleri yapısal bozukluklar, fonksiyon kaybı ve diğer yöntemlere yanıtsızlık durumlarında gündeme gelir.
- **Rehabilitasyon ve Uzun Dönem Takip:** Tedavi sonrası fonksiyonun devamlılığını sağlamak ve komplikasyonları önlemek için önemlidir (Manfredini et al., 2010).

6.1. Konservatif Yöntemler

Konservatif tedavi, TME bozukluklarının çoğu hastada ilk tercih edilen tedavi yaklaşımıdır. Genellikle başarılı sonuçlar verir ve cerrahi müdahale ihtiyacını azaltır (Okeson & Ckeson, 2013).

a) Farmakolojik Tedavi:

İlaç tedavisi genellikle semptomların kontrolünde kullanılır.

- **NSAİİ:** İbuprofen, naproksen gibi ilaçlar inflamasyonu ve ağrıyı azaltır.
- **Analjezikler:** Parasetamol hafif ağrı için tercih edilir.

- **Kas Gevşeticiler:** Kas spazmı eşlik eden olgularda kısa süreli kullanılır.
- **Antidepresanlar:** Trisiklik antidepresanlar (örneğin amitriptilin), kronik ağrı yönetiminde etkilidir.
- **Antikonvülsanlar:** Nöropatik ağrı durumlarında gabapentin veya pregabalin düşünülebilir (Gauer & Semidey, 2015; Schiffman et al., 2014).

b) Oklüzal Splintler:

Bruksizm, diş sıkma ve oklüzal dengesizlik durumlarında etkili olan bu apareyler, TME üzerine binen yükü azaltır.

- Stabilizasyon splinti (Michigan tipi): En yaygın kullanılan tiptir.
- Anterior repozisyon splinti: Disk dislokasyonlarında kısa süreli olarak kullanılır.
- Yumuşak splintler: Bazı hastalarda tolere edilebilir, ancak uzun vadede dikkatli olunmalıdır (Okeson & Ckeson, 2013).



Şekil 2: Splint kullanımı sonrası alt çenenin rehber rampa ile daha stabilize bir konuma yönlendirildiği ve posterior segmentte daha dengeli bir temas sağlandığı gözlemlenmektedir. Bu düzenleme, temporomandibular ekleme binen yükün azaltılması ve kas-iskelet dengesinin korunması açısından önem taşımaktadır.

c) Fizik Tedavi ve Egzersizler:

Kas spazmını azaltmak ve eklem fonksiyonunu artırmak için uygulanır:

- Çene açma ve lateral hareket egzersizleri
- Isı/soğuk uygulamaları
- Ultrason ve lazer terapisi
- TENS (Transkutanöz elektriksel sinir stimülasyonu) (Koolstra & Van Eijden, 1997).

d) Psikolojik Destek ve Davranışsal Müdahaleler:

TME bozukluklarında stres ve anksiyete sıklıkla semptomları artırır.

- Bilişsel Davranışçı Terapi (BDT)
- Biyogeribildirim teknikleri
- Gevşeme egzersizleri
- Uyku hijyeni ve stres yönetimi (Manfredini et al., 2010).

e) Hasta Eğitimi ve Alışkanlık Değişikliği:

Tedavide hastanın aktif katılımı oldukça önemlidir.

- Diş sıkma, tırnak yeme, sakız çiğneme gibi alışkanlıkların azaltılması
- Doğru çene istirahati pozisyonlarının öğretilmesi
- Sert gıdalardan ve aşırı çene açımından kaçınılması (De Leeuw et al., 2018).

6.2. Minimal İnvaziv Müdahaleler

Konservatif tedaviye yeterli yanıt alınamayan veya semptomları ilerleyici seyreden olgularda, cerrahiye geçmeden önce minimal invaziv girişimsel yöntemler tercih edilebilir. Bu uygulamalar, eklem içi patolojileri doğrudan hedef alır ve genellikle düşük komplikasyon riski ile etkili sonuçlar verir (Manfredini et al., 2010).

a) Artrosentez

Artrosentez, eklem boşluğunun steril sıvılarla yıkanarak inflamatuvar mediatörlerin uzaklaştırılmasını amaçlayan basit ve etkili bir uygulamadır.

Disk hareketliliğini artırır

Yapışıklıkları çözer

Eklem içi basıncı dengeler

- İnflamasyonu azaltır. Özellikle erken dönem disk dislokasyonu ve osteoartrit olgularında başarılı sonuçlar bildirilmiştir.

b) İntraartiküler İnjesiyonlar

Eklem içine uygulanan çeşitli ajanlar, inflamasyonu azaltmak ve ağrıyı kontrol etmek amacıyla kullanılır:

- **Kortikosteroidler:** Güçlü anti-inflamatuvar etkiye sahiptir, ancak tekrarlayan enjeksiyonlarda kondral hasar riski taşır (Lundh, Westesson, Kopp, & Tillström, 1985).
- **Hyaluronik Asit:** Eklem sıvısının viskoelastik özelliklerini iyileştirerek sürtünmeyi azaltır ve şok absorpsiyonunu artırır (Manfredini et al., 2010).
- **Platelet Rich Plasma (PRP):** İçerdiği büyüme faktörleri ile rejeneratif süreçleri uyarır. Eklem dokularının biyolojik iyileşmesini destekler.

c) Botulinum Toksin A Uygulamaları

Çiğneme kaslarındaki hiperaktivite ve spazmı azaltmak amacıyla kullanılan botulinum toksin, özellikle bruksizm eşlik eden olgularda TME üzerindeki aşırı yükü azaltabilir. Ancak uzun dönem güvenilirliği hâlen tartışmalıdır (Guarda-Nardini et al., 2008).

Aşırı çiğneme kuvvetleri, travmatik oklüzyon ya da hatalı sentrik kapanış gibi etkenlerin neden olduğu TME bozuklukları, genellikle ağız içi splintler, oklüzal düzeltmeler, restoratif işlemler veya cerrahi müdahalelerle yönetilmektedir. Ancak bu tedavi yöntemlerinin büyük bir kısmı, hastalar açısından hem invaziv hem de geri dönüşü olmayan uygulamalar olup, maliyet açısından da yük oluşturabilmektedir (CAMBAZOĞLU, ERDİNER, SÖĞÜTÖZÜ, & Topics, 2023).

Mandibular kondilin artiküler eminensin ön bölgesine doğru kayması durumunda TME dislokasyonu gelişir. Bu durum, tüm eklem çıkıklarının yaklaşık %3'ünü oluşturur. TME dislokasyonlarında botulinum toksin tip A (BTX-A) enjeksiyonu, özellikle lateral pterygoid kasa uygulanarak gerçekleştirilen, invazif olmakla birlikte cerrahiye göre daha koruyucu bir yaklaşım sunar. Bu yöntem, özellikle cerrahinin yüksek risk taşıdığı, tekrarlayan TME çıkıklarında öncelikli olarak tercih edilmektedir. Ayrıca, oromandibular distoni, epilepsi ya da beyin sapı kaynaklı nörolojik bozukluklara bağlı kas kontrol sorunlarında ortaya çıkan TME dislokasyonlarının yönetiminde de BTX-A enjeksiyonu uygulanabilir bir tedavi seçeneğidir (Kim, Park, & Park, 2010; Sekertzı & Journal-Review, 2022).

d) Endikasyonlar ve Değerlendirme

Minimal invaziv yöntemler şu durumlarda öncelikli olarak değerlendirilir:

- Konservatif tedaviye yanıtızlık

- Persistan ağrı ve fonksiyonel kısıtlılık
- Eklem içi inflamasyon ve yapışıklık varlığı
- Cerrahiye geçmeden önce ara basamak ihtiyacı

Bu müdahaleler, cerrahiye kıyasla daha az invaziv oldukları için hasta uyumu yüksektir. Ancak ileri vakalarda tek başına yetersiz kalabilecekleri unutulmamalıdır.

6.3. Cerrahi Tedavi Yöntemleri

Temporomandibular eklem bozukluklarında cerrahi girişimler, konservatif ve minimal invaziv tedavilere yanıt alınamayan, ileri yapısal deformasyonların eşlik ettiği ve fonksiyon kaybının belirginleştiği durumlarda gündeme gelir. Cerrahi planlama öncesinde ayrıntılı klinik ve radyolojik değerlendirme yapılmalı; hasta beklentileri ve sistemik durumu dikkatle analiz edilmelidir (Mercuri, Bertini, & Iannaccone, 2012).

a) Artroskopik Cerrahi

Artroskopik girişimler, TME iç yapılarının minimal invaziv tekniklerle doğrudan görüntülenmesini ve müdahale edilmesini sağlar. Genellikle lokal veya genel anestezi altında yapılır.

- Disk reponasyonu
- Adhezyonların serbestleştirilmesi
- Enflamatuvar debrislerin temizlenmesi gibi işlemler uygulanabilir. Avantajları arasında düşük morbidite, kısa iyileşme süresi ve hastanede yatış gereksiniminin azalması sayılabilir (Wolfe et al., 1992).

b) Açık Eklem Cerrahisi

Artroskopik yöntemlerin yetersiz kaldığı ileri vakalarda açık cerrahi teknikler uygulanır.

- **Diskektomi:** Hasarlanmış disk dokusunun çıkarılması
- **Disk Repozisyonu:** Dislokasyona uğrayan diskin anatomik konuma getirilmesi
- **Artroplasti:** Eklem yüzeylerinin yeniden şekillendirilmesi
- **Kondilektomi/Subkondilektomi:** Kondilin kısmi veya tam rezeksiyonu

Bu girişimlerde yüz siniri yaralanması, kanama, enfeksiyon gibi komplikasyon riskleri cerrahın deneyimi ve anatomik dikkat ile minimize edilmelidir (Dimitroulis, 2018).

c) Total Eklem Replasmanı

Total temporomandibular eklem replasmanı (TTMER), TME'nin tüm yapılarının biyouyumlu protezlerle değiştirilmesini kapsayan ileri düzey bir cerrahidir.

- Endikasyonları arasında kondil erozyonu, ankiloz, tümör rezeksiyonları sonrası rekonstrüksiyon ve başarısız cerrahi girişimler yer alır.
- Genellikle kobalt-krom, titanyum alaşımı veya UHMWPE gibi materyaller kullanılır.
- Hem modüler hem de hastaya özel tasarımda uygulanabilir (Mercuri et al., 2012).

Bu cerrahinin avantajları arasında kalıcı ağrı kontrolü, fonksiyonel iyileşme ve estetik denge yer alırken; protez aşınması, gevşeme ve uzun vadeli revizyon gerekliliği gibi riskler de göz önünde bulundurulmalıdır.

6.4. Postoperatif İzlem ve Uzun Dönem Yönetimi

Temporomandibular eklem (TME) cerrahisinin başarısı, yalnızca operasyonun teknik başarısıyla değil, aynı zamanda postoperatif bakım, rehabilitasyon ve uzun dönem izlem süreçlerinin etkinliği ile doğrudan ilişkilidir. Bu süreçler; komplikasyonların önlenmesi, fonksiyonun korunması ve hasta memnuniyetinin artırılması açısından kritik öneme sahiptir (Dimitroulis, 2018).

a) Erken Dönem Takibi

Cerrahiden sonraki ilk günler, ödem, enfeksiyon ve hematoma gelişimi açısından hassas bir dönemdir.

- **Ağrı yönetimi:** NSAİİ ve analjezikler ile sağlanır. Gerekirse kısa süreli opioid desteği verilebilir.
- **Ödem kontrolü:** Başın yükseltilmesi, soğuk uygulamalar ve anti-inflamatuvar tedavi önerilir.
- **Antibiyotik profilaksisi:** Özellikle açık cerrahilerde enfeksiyon riskini azaltmak amacıyla uygulanabilir.

- **Beslenme önerileri:** İlk günlerde yumuşak ve düşük çiğneme gücü gerektiren diyet tercih edilmelidir.

b) Fonksiyonel Rehabilitasyon

Cerrahi sonrası fonksiyonun yeniden kazanılması, çene hareketlerinin kontrollü şekilde başlatılması ve kas dengesinin sağlanması için yapılandırılmış bir rehabilitasyon programı uygulanmalıdır (Wolfe et al., 1992).

- Pasif ve aktif egzersizlerle ağız açıklığı korunur.
- Çiğneme kaslarına yönelik gevşetici teknikler kullanılır.
- TENS, ultrason, sıcak-soğuk uygulamaları ağrı kontrolünü destekler.
- Postür eğitimi ile boyun ve çene yüklenmeleri dengelenir.

c)Psikososyal Destek ve Davranışsal Müdahale

Cerrahi sonrası iyileşme süreci, hastanın psikolojik durumu ile yakından ilişkilidir. Özellikle kronik ağrısı olan hastalarda anksiyete ve depresyon sık görülür.

- Bilişsel davranışçı terapi (BDT), ağrı algısını düzenlemeye yardımcı olur.
- Stres yönetimi, gevşeme teknikleri ve parafonksiyonel alışkanlıkların kontrolü bu süreçte desteklenmelidir (Manfredini et al., 2010).

d) Uzun Dönem İzlem

İzlem programları, komplikasyonların erken tanısı ve tedavi başarısının sürdürülebilirliği için gereklidir:

- İlk yıl içerisinde 1., 3., 6. ve 12. aylarda kontrol önerilir.
- Fonksiyonel değerlendirme ile birlikte gerekirse panoramik radyografi, BT veya MRG görüntülemeleri yapılabilir.
- Total eklem replasmanı yapılan olgularda implant stabilitesi ve protez yüzeylerinin durumu değerlendirilir.

e) Geç Komplikasyonlar ve Müdahale

Cerrahiden aylar sonra gelişebilecek bazı komplikasyonlar izlem sürecinde fark edilmelidir:

- Fibrozis ve hareket kısıtlılığı
- Protez gevşemesi ve mekanik arızalar
- Nörolojik disfonksiyonlar (örneğin fasiyal sinir hasarı)
- Persistan veya nüks eden ağrılar

Bu durumlarda multidisipliner yaklaşım ve gerekirse yeniden müdahale planı oluşturulmalıdır.

7. GÜNCEL ARAŞTIRMALAR VE GELECEK PERSPEKTİFLER

Son yıllarda temporomandibular eklem hastalıklarının tanı ve tedavisine yönelik araştırmalar biyoteknolojik ve disiplinlerarası bir boyuta evrilmiştir. Geleneksel tedavi yaklaşımlarının sınırlarını aşmak adına, rejeneratif tıp, yapay zeka, hücresel tedavi yöntemleri ve doku mühendisliği gibi alanlarda önemli ilerlemeler kaydedilmektedir. Biyolojik ajanların ve büyüme faktörlerinin intraartiküler uygulamaları, eklem içi iyileşme süreçlerini uyararak kıkırdak rejenerasyonunu desteklemeyi hedeflemektedir. Özellikle trombositten zengin plazma ve mezenkimal kök hücre temelli enjeksiyonlar, dejeneratif süreci yavaşlatma ve semptomları hafifletme konusunda umut vadetmektedir. Ancak bu tedavilerin protokolleri henüz standardize edilmemiştir ve uzun dönem klinik etkileri hâlen araştırma aşamasındadır. Biyoteknolojik yaklaşımlar arasında rejeneratif tıp uygulamaları da yer almakta, özellikle osteokondral doku mühendisliği üzerine yapılan çalışmalar dikkat çekmektedir (Van Bellinghen et al., 2018).

Yapay zeka uygulamaları da son yıllarda TME tanı sistemlerinin dijitalleşmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Derin öğrenme algoritmaları, manyetik rezonans ve konik ışınli tomografi görüntülerinden otomatik lezyon tanıma ve sınıflandırma gibi görevleri yüksek doğrulukla yerine getirebilmektedir. Bu gelişmeler, tanı sürecinin hem hızını hem de objektifliğini artırarak hekim-yüküne katkı sağlamaktadır (Mehta, Tripathy, Noor, Mathur, & research, 2025).

Robotik cerrahi ve navigasyon destekli girişimler ise, TME cerrahisinin daha hassas ve güvenli şekilde uygulanabilmesini sağlamaktadır. Özellikle karmaşık anatomik deformitelerde üç boyutlu planlama ve hastaya özel protez tasarımı ile cerrahi başarı oranı artmaktadır (Panahi, 2025).

Tüm bu gelişmeler ışığında, TME bozukluklarının gelecekte daha bireyselleştirilmiş, hedefe yönelik ve minimal invaziv yöntemlerle yönetileceği öngörülmektedir. Ancak bu dönüşümün sağlıklı biçimde ilerleyebilmesi için, multidisipliner klinik araştırmaların artırılması, biyoteknolojik

uygulamaların validasyonunun sağlanması ve etik sorumlulukların titizlikle gözetilmesi gerekmektedir.

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Temporomandibular eklem dejeneratif bozuklukları, klinik pratiğin tanı ve tedavi açısından en karmaşık alanlarından birini oluşturmaktadır. Multifaktöriyel etiyojisi, geniş semptom yelpazesi ve ilerleyici doğası nedeniyle bu hastalık grubunun yönetimi, basit protokollerle sınırlı kalamayacak kadar kapsamlıdır. Bu nedenle yaklaşım hem yapısal hem de işlevsel olarak eklemi bir bütün hâlinde değerlendirebilmeyi, hastayı biyopsikososyal bir çerçevede ele alabilmeyi gerektirir.

Bu kitap bölümünde, TME'nin anatomik ve biyomekanik özellikleri detaylı biçimde ele alınmış; dejeneratif süreçlerin temel mekanizmaları, klinik belirtileri ve ayırıcı tanı kriterleri güncel literatür ışığında değerlendirilmiştir. Tedavi planlamasında bireyselleştirilmiş ve basamaklı yaklaşımların gerekliliği vurgulanmış, konservatif seçeneklerden cerrahi yöntemlere kadar geniş bir tedavi yelpazesi yapılandırılmıştır. Ayrıca, postoperatif takip ve uzun dönem rehabilitasyon süreçlerinin tedavi başarısı üzerindeki belirleyici etkisine dikkat çekilmiştir.

Son yıllardaki teknolojik gelişmeler, TME bozukluklarının tanı ve tedavisinde yeni olanaklar sunmaktadır. Hücresel tedaviler, yapay zekâ destekli sistemler ve kişiye özel cerrahi yaklaşımlar gibi yenilikçi yöntemlerin, önümüzdeki yıllarda daha yaygın klinik uygulamalara dönüşmesi beklenmektedir. Ancak bu potansiyelin sürdürülebilir biçimde değerlendirilebilmesi için yüksek kaliteli klinik çalışmalara ve multidisipliner yaklaşımlara ihtiyaç duyulmaktadır.

Genel olarak değerlendirildiğinde, TME bozukluklarının yönetimi yalnızca semptomları hedeflemekle sınırlı kalmamalı; fonksiyonel iyileşme, yaşam kalitesi artışı ve hasta eğitimi gibi çok boyutlu hedefleri kapsayan bir çerçevede ele alınmalıdır. Bu yaklaşım, hem mevcut tedavi seçeneklerinin etkinliğini artıracak hem de gelecekteki klinik uygulamalara yön verecektir.

KAYNAKÇA

- Cambazoğlu, M., Erdiner, E., & Söğütözü, S. (2023). Botoks ve diş hekimliğindeki uygulamaları. *Türkiye Klinikleri Oral Diş Bilimleri - Special Topics*, 9(2), 40–46.
- Chen, H., Slade, G. D., Lim, P. F., Miller, V., Maixner, W., & Diatchenko, L. (2012). Relationship between temporomandibular disorders, widespread palpation tenderness, and multiple pain conditions: A case-control study. *Journal of Pain*, 13(10), 1016–1027. <https://doi.org/10.1016/j.jpain.2012.07.011>
- De Leeuw, R., & Klasser, G. J. (2018). *Orofacial pain: Guidelines for assessment, diagnosis, and management* (6th ed.). American Academy of Orofacial Pain.
- Dimitroulis, G. (2018). Management of temporomandibular joint disorders: A surgeon's perspective. *Australian Dental Journal*, 63(S1), S79–S90.
- Gauer, R. L., & Semidey, M. J. (2015). Diagnosis and treatment of temporomandibular disorders. *American Family Physician*, 91(6), 378–386.
- Guarda-Nardini, L., Manfredini, D., Salamone, M., Salmaso, L., Tonello, S., & Ferronato, G. (2008). Efficacy of botulinum toxin in treating myofascial pain in bruxers: A controlled placebo pilot study. *Cranio*, 26(2), 126–135.
- Juhl, G. I., Jensen, T. S., Nørholt, S. E., & Svensson, P. (2009). Incidence of symptoms and signs of TMD following third molar surgery: A controlled, prospective study. *Journal of Oral Rehabilitation*, 36(3), 199–209. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2842.2008.01925.x>
- Kim, N.-H., Park, R.-H., & Park, J.-B. (2010). Botulinum toxin type A for the treatment of hypertrophy of the masseter muscle. *Plastic and Reconstructive Surgery*, 125(6), 1795–1805.
- Kirkhus, E., Gunderson, R. B., Smith, H.-J., Flatø, B., Hetlevik, S. O., Larheim, T. A., & Arvidsson, L. Z. (2016). Temporomandibular joint involvement in childhood arthritis: Comparison of ultrasonography-assessed capsular width and MRI-assessed synovitis. *Dental Radiology*, 45(8), 20160195.
- Koolstra, J., & Van Eijden, T. J. (1997). The jaw open-close movements predicted by biomechanical modelling. *Journal of Biomechanics*, 30(9), 943–950.
- List, T., & Jensen, R. (2017). Temporomandibular disorders: Old ideas and new concepts. *Cephalalgia*, 37(7), 692–704. <https://doi.org/10.1177/0333102416686302>
- Lundh, H., Westesson, P.-L., Kopp, S., & Tillström, B. (1985). Anterior repositioning splint in the treatment of temporomandibular joints with reciprocal clicking: Comparison with a flat occlusal splint and an untreated control group. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology*, 60(2), 131–136.
- Manfredini, D., & Lobbezoo, F. (2010). Relationship between bruxism and temporomandibular disorders: A systematic review of literature from 1998 to

2008. Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontology, 109(6), e26–e50.
- Mehta, V., Tripathy, S., Noor, T., & Mathur, A. (2025). Artificial intelligence in temporomandibular joint disorders: An umbrella review. *Computers in Biology and Medicine*, 11(1), e70115.
- Mercuri, E., Bertini, E., & Iannaccone, S. T. (2012). Childhood spinal muscular atrophy: Controversies and challenges. *The Lancet Neurology*, 11(5), 443–452.
- Okeson, J. P. (2013). Management of temporomandibular disorders and occlusion (7th ed.). Elsevier/Mosby.
- Panahi, O. (2025). The evolving partnership: Surgeons and robots in the maxillofacial operating room of the future. *Journal of Dental Surgery and Oral Care*, 1(1), 1–7.
- Park, C. K. (2015). Maresin 1 inhibits TRPV1 in temporomandibular joint-related trigeminal nociceptive neurons and TMJ inflammation-induced synaptic plasticity in the trigeminal nucleus. *Mediators of Inflammation*, 2015, Article ID 275126. <https://doi.org/10.1155/2015/275126>
- Peck, C. C., Goulet, J. P., Lobbezoo, F., Schiffman, E., Alstergren, P., Anderson, G. C., ... List, T. (2014). Expanding the taxonomy of the diagnostic criteria for temporomandibular disorders. *Journal of Oral Rehabilitation*, 41(1), 2–23. <https://doi.org/10.1111/joor.12132>
- Rajesh, S. (2010). Prevalence of signs of temporomandibular joint dysfunction in asymptomatic edentulous subjects: A cross-sectional study. *The Journal of Indian Prosthodontic Society*, 10(2), 96–101. <https://doi.org/10.1007/s13191-010-0018-9>
- Rugh, J., & Solberg, W. J. (1976). Psychological implications in temporomandibular pain and dysfunction. *Orofacial Pain Series*, 7, 3–30.
- Schiffman, E., Ohrbach, R., Truelove, E., Look, J., Anderson, G., Goulet, J.-P., ... & The International RDC/TMD Consortium. (2014). Diagnostic criteria for temporomandibular disorders (DC/TMD) for clinical and research applications. *Journal of Orofacial Pain and Headache*, 28(1), 6.
- Sekertzi, S. (2022). Diş hekimliğinde botulinum toksininin tedavi amaçlı uygulamaları. *Journal of Dentistry Review*, 4(3), 205–216.
- Van Bellinghen, X., Idoux-Gillet, Y., Pugliano, M., Strub, M., Bornert, F., Clauss, F., ... Kuchler-Bopp, S. (2018). Temporomandibular joint regenerative medicine. *International Journal of Molecular Sciences*, 19(2), 446.
- Voog, Ü., Alstergren, P., Eliasson, S., Leibur, E., Kallikorm, R., & Kopp, S. (2003). Inflammatory mediators and radiographic changes in temporomandibular joints of patients with rheumatoid arthritis. *Archives of Oral Biology*, 61(1), 57–64.

- Wolfe, F., Simons, D., Friction, J., Bennett, R., Goldenberg, D., Gerwin, R., ... Sanders, H. (1992). The fibromyalgia and myofascial pain syndromes: A preliminary study of tender points and trigger points. *The Journal of Rheumatology*, 19(6), 944–951.
- Yılmaz, S. (2008). Temporomandibular eklem artroskopisinde intraartiküler ketaminin postoperatif ağrı üzerine etkisi [Yüksek lisans tezi, Marmara Üniversitesi].

