

PROTETİK DİŞ TEDAVİSİ

ALANINDA ARAŞTIRMALAR
VE DEĞERLENDİRMELER

— EKİM 2026 —



EDİTÖR

Prof. Dr. Sabiha Zelal ÜLKÜ

İmtiyaz Sahibi / Yaşar Hız
Yayına Hazırlayan / Gece Kitaplığı

Birinci Basım / Ekim 2026 - Ankara
ISBN / 978-625-321-309-1

© copyright

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

Gece Kitaplığı

Kızılay Mah. Fevzi Çakmak 1. Sokak
Ümit Apt No: 22/A Çankaya/ANKARA
0312 384 80 40
www.gecekitapligi.com / gecekitapligi@gmail.com

Baskı & Cilt

Bizim Büro
Sertifika No: 42488

**PROTETİK DİŞ TEDAVİSİ
ALANINDA ARAŞTIRMALAR VE
DEĞERLENDİRMELER**

EKİM 2026

EDİTÖR

Prof. Dr. Sabiha Zela ÜLKÜ

gece
kitaplığı

İÇİNDEKİLER

BÖLÜM 1

3 BOYUTLU (3B) BASKI PROTEZ KAİDE MATERYALLERİNDE POST-WASHING VE TAMİR YÜZEY İŞLEMLERİ

Bengisu YILDIRIM..... 7

BÖLÜM 2

ORAL MİKROBİYOTA VE KRONİK OROFASİYAL AĞRI: OLASI TRİGEMİNAL MEKANİZMALAR VE KLİNİK KANITLAR

Neslihan TINASTEPE..... 22

BÖLÜM 3

TAM ARK İMPLANT DESTEKLİ SABİT PROTEZLERDE MATERYAL SEÇİMİ: GÜNCEL YAKLAŞIMLAR VE KLİNİK DEĞERLENDİRMELER

Berfu ERHAN GÜRESER, Süheyla ESEN, Simay BOZKURT..... 41

BÖLÜM 4

DİŞSİZ MAKSİLLANIN TAM ARK İMPLANT REHABİLİTASYONUNDA GÜNCEL UZLAŞI RAPORLARI

Süheyla ESEN, Berfu ERHAN GÜRESER, Simay BOZKURT..... 55

BÖLÜM 5

PROTETİK DİŞ TEDAVİSİNDE EKLEMELİ ÜRETİM TEKNOLOJİLERİ: GEÇİCİ VE DAİMİ RESTORATİF MATERYALLERİN MEKANİK VE BİYOUYUMLULUK ÖZELLİKLERİ

Burcu DERELİ İNAN..... 70

BÖLÜM 6

PROTETİK DİŞ TEDAVİSİNDE PLAZMA UYGULAMALARI

Muhammet Fatih BULUT..... 92

BÖLÜM 7

PEEK MATERYALİ VE DİŞ HEKİMLİĞİNDE KULLANIM ALANLARI

Bilal AYAZ..... 111

BÖLÜM 1

3 BOYUTLU (3B) BASKI PROTEZ KAİDE MATERYALLERİNDE POST-WASHING VE TAMİR YÜZEY İŞLEMLERİ

Bengisu YILDIRIM¹

¹ Doç. Dr., Uşak Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi Protetik Diş Tedavisi ABD, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9208-5827>

3B Baskı ve Post-Washing İşlemleri

3 boyutlu (3B) bilgisayar destekli tasarım ve üretim (BDT/BDÜ-CAD/CAM) teknolojilerinin diş hekimliğinde kullanılmaya başlanması ile dijital protezlerin kullanımı; hasta verilerinin güvenli bir şekilde saklanabilmesi, tedavi süresinin kısalması, gelişmiş mekanik özellikler elde edilmesi ve laboratuvar süreçlerinin kolaylaşması gibi pek çok avantaj sunmaktadır.(Valenti et al., 2024)

CAD-CAM teknolojisindeki kayda değer gelişmeler sayesinde, tam protezler artık eklemeli üretim ve eksiltmeli üretim teknikleri dahil olmak üzere yeni yöntemlerle üretilmektedir. Eksiltmeli yöntemde, protez tabanı önceden polimerize edilmiş büyük bir reçine bloktan freze edilerek oluşturulur. Frezeleme tekniğinde, yüksek sıcaklık ve basınç altında polimerize edilmiş, homojen akrilik rezin bloklar kullanılır. Bu yöntem, daha az artık monomer içermesi, daha az büzülme göstermesi, dokuya daha iyi uyum sağlaması gibi avantajlar sunar.(Steinmassl et al., 2017) Ancak karmaşık tasarımların üretilmesinde sınırlıdır. Bu yöntem kaliteli sonuçlar verse de maliyetli olması ve fazla miktarda malzeme israfına yol açması önemli dezavantajlardır.(Fiore et al., 2022; Sahin et al., 2024) 3B baskı yöntemi dijital tasarımlardan elde edilen STL dosyaları kullanılarak katman katman üretim yapılmasına olanak tanıyan eklemeli yöntemdir. Bu yöntem, malzeme israfını en aza indirirken daha ekonomik bir üretim süreci sunar ve karmaşık geometrilere sahip protezlerin üretimini mümkün kılar. Bu nedenle, 3B baskılı protezlerin gelecekte tam protez üretiminde daha yaygın bir rol üstleneceği öngörülmektedir.(Alharbi et al., 2017; Rekow, 2020; Sahin et al., 2024). Ancak yüzey pürüzlülüğü ve mekanik özellikler açısından bazı dezavantajlara sahiptir.(Gad et al., 2022; Kalberer et al., 2019; Lankes et al., 2023; Lim & Shin, 2020; Sahin et al., 2024) 3B baskılı protezler, fotopolimerize edilmiş reçinenin katman katman üretilmesi nedeniyle daha düşük mekanik performans gösterir. Bu üretim yöntemi, daha fazla artık monomer bırakır, daha az çift bağ dönüşümüne sahiptir ve daha zayıf katmanlı bir protezle sonuçlanır.(Gad et al., 2022)

3B baskı teknolojileri, diş hekimliği uygulamalarında hızla yaygınlaşmakta ve protez üretim süreçlerine önemli esneklikler kazandırmaktadır. Mevcut 3B baskı teknolojileri arasında stereolitografi (SLA) ve dijital ışık işleme (DLP) yöntemleri en çok kullanılanlardır. Her iki yöntem de sıvı fotopolimerleri kürlemek için ultraviyole (UV) ışık kaynaklarına dayanır.

Işıkla sertleşen kompozit materyallere benzer şekilde, 3B baskılı fotopolimer reçineler oksijene duyarlı serbest radikal polimerizasyon sürecinden geçer. Fotopolimerizasyon sırasında

meydana gelen oksijen inhibisyonu, yüzey özelliklerini olumsuz etkileyen, kürlenmemiş dimetakrilat monomerlerinden oluşan bir artık tabakanın oluşumuna yol açar. Bu oksijenle inhibe olmuş tabaka genellikle istenmeyen bir durum olarak kabul edilir. Bu sistemlerde, yazıcı reçinenin sadece istenen bölgelerini katman katman polimerize eder. Ancak yüzeyde ve gözeneklerde kalan kürlenmemiş reçine kalıntıları:

- Biyouyumluluk açısından tehlike oluşturur (toksisite)
- Yüzeyde yapışkanlık ve parlaklık bırakır
- Post-cure (sonradan yapılan UV ile kürleme) işleminin etkinliğini azaltır
- Mekanik ve estetik özellikleri olumsuz etkiler
- Bağ dayanımı gibi testlerde yüzey bütünlüğünü bozar

Ancak, 3B baskı sürecinde tabaka tabaka üretim sırasında katmanlar arası yapışmayı artırmada faydalı bir rol oynar. Yıkama (post-washing) işleminin temel amacı, sonradan polimerizasyon (post-polymerization) adımından önce bu kürlenmemiş tabakayı uzaklaştırmak ve böylece nihai baskılı restorasyonun mekanik özelliklerini ve yüzey bütünlüğünü iyileştirmektir. Bu nedenle, baskı sonrası yıkama süresinin optimize edilmesi, 3B baskılı restorasyonların yapısal bütünlüğünü ve optik kalitesini korumak açısından kritik öneme sahiptir (Papanu et al., 1990).

Post-washing işlemi genellikle alkollü çözücüler (örneğin %96 izopropil alkol) ile daldırma şeklinde yapılmakta, bazı durumlarda ultrasonik temizlik, santrifüjleme ya da özel temizleyici solüsyonlarla desteklenmektedir. Rotary (döner) yıkama sistemleri ve ultrasonik banyolar gibi çeşitli yıkama teknikleri, temizleme verimliliğini artırmak amacıyla kullanılmaktadır (Mostafavi et al., 2021; Xu et al., 2021). Ancak bu işlemin önemi büyük olmasına rağmen, üreticiler arasında yıkama protokolleri farklılık göstermekte ve bu da standart kılavuzlar oluşturmayı zorlaştırmaktadır. Bu nedenlerle post-washing, hem klinik güvenlik hem de mekanik / yapısal bütünlük açısından kritik bir adımdır. Bu adım, yalnızca yüzeyin temizliğini sağlamakla kalmaz, aynı zamanda yapılacak post-cure (sonradan UV ile sertleştirme) işleminin etkinliğini artırır, yüzey pürüzlülüğünü düzenler ve materyalin mekanik performansını doğrudan etkiler. Yetersiz yıkama, yüzeyde UV kürleme ile giderilemeyen yapışkan bir reçine tabakasının kalmasına neden olabilir. Buna karşılık, çözücüye uzun süreli maruz kalma, reçinenin çözücüyü emmesine, bunun sonucunda şişmeye, polimer ağ yapısının bozulmasına ve mekanik özelliklerin zayıflamasına yol açabilir.

Birkaç *in vitro* çalışma, izopropanol ile ultrasonik temizlik ve ultraviyole (UV) ile sonradan kürleme işlemini standart protokoller olarak kullanmıştır. (Gibreel et al., 2024; Htat et al., 2024; Pereira et al., 2025; Tanaka et al., 2025) Örneğin, Gibreel (Gibreel et al., 2024), Htat (Htat et al., 2024) ve Pereira ve ark. (Pereira et al., 2025) izopropanol yıkaması sonrası UV kürleme işlemini birleştiren bir protokol uygulamıştır. Buna karşılık, Tanaka ve ark. (Tanaka et al., 2025) sonradan polimerize edilmiş ve edilmemiş 3B baskılı total protez kaide materyallerini doğrudan karşılaştırmıştır. Yaptıkları çalışmada, %99 gliserin ortamında, 60°C’de 15 dk. boyunca uygulamadan sonra polimerizasyon işleminin, sonradan polimerize edilmemiş kontrol gruplarına kıyasla makaslama bağlanma dayanımını anlamlı derecede azalttığı bulunmuştur. Öne sürülen mekanizma, sonradan polimerizasyon işleminin polimerleşme derecesini artırarak ve oksijenle engellenmiş tabakayı ortadan kaldırarak, tamir reçinesinin yüzeye nüfuz etme ve etkili bağ kurma yeteneğini azalttığı yönündedir. Lankes ve ark (Lankes et al., 2023) temizleme yöntemleri olarak 4dk. izopropanol alkolde ultrasonik yıkama, 2dk. butildiglikol-temizleme solüsyonunda ultrasonik yıkama ve 10 dk. santrifüjde yıkama yöntemlerini kıyaslamıştır. Yöntemler arasında santrifüjleme ile kombinasyon halinde en yüksek makaslama ve çekme bağlanma dayanımı değerleri elde etmiştir. Santrifüjleme kullanıldığında, görünür şekilde ince bir artık monomer tabakasının numunenin yüzeyini kapladığı gözlemlenmiştir. Otofash G171’de azot atmosferi altında baskı sonrası polimerizasyon sonrasında, yüzeyde kalan yüksek artık monomer konsantrasyonunun mekanik ön işlemle tekrar açığa çıkarak 3B reçine matrisi ile siman arasındaki bağ üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğu varsayılmaktadır. Hwangbo ve ark. (Hwangbo et al., 2021), 3B baskılı protez dişler ve kuron ve köprü reçinesinin farklı zaman aralıklarında (3, 5, 10, 15, 30, 60 ve 90 dk.) iki yıkama solüsyonu (izopropil alkol ve tripropilen glikol monometileter) ile yıkanmasının, hücre canlılığı, sitotoksositeye, eğilme mukavemeti ve eğilme üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Yıkama süresinin artırılması hücre canlılığını artırmış ve sitotoksositeyi azaltmıştır. Yıkama süresinin artırılması, eğilme mukavemetini ve yüzeyi önemli ölçüde etkilememiş ancak 90 dakikalık yıkama grubunun eğilme modülü diğer tüm gruplarinkinden daha düşük bulunmuştur.

Güncel literatür, post-washing sürecinin uygulanma şeklinin hem materyalin biyouyumluluğu hem de bağ dayanımı gibi kritik parametreler üzerinde belirleyici olduğunu ortaya koymaktadır. Uygun şekilde yapılmayan bir yıkama işlemi, yüzeyde monomer kalıntılarının kalmasına, bu da hem toksisite riskinin artmasına hem de tamir gibi ileri işlemlerde yetersiz bağlanmalara neden olabilmektedir. Benzer şekilde, post-washing aşaması

da yüzeydeki kimyasal bağ potansiyelini azaltarak tamir rezinlerinin adezyonunu etkileyebilir. Buna karşın, aşırı solvent maruziyeti ya da kontrolsüz temizlik yöntemleri, malzemenin yapısal bütünlüğünü zayıflatabilmektedir. Dolayısıyla, 3B baskı sonrası uygulanan post-washing protokolünün hem klinik güvenlik hem de materyalin uzun dönem başarısı açısından optimize edilmesi gerekmektedir.

Mevcut 3B baskılı protezlerin bazı teknik sınırlamaları bulunmaktadır. Protezlerin kullanılması ile birlikte ortaya çıkabilecek bazı sorunlar nedeniyle astar prosedürleri gerekebilir.(Sahin et al., 2024) Protez kaidesinin kırılması, yapay dişin yerinden çıkması veya alveolar kemik rezorpsiyonu nedeniyle kaide uyumunun azalması gerçekleşebilir (Lim & Shin, 2020; Sahin et al., 2024) Bu durumlarda tipik olarak kendiliğinden sertleşen (self-cured) protez reçinesi veya protez kaidesi astar malzemelerinin kullanılması gerekebilir. Bu malzemelerin bağlanma dayanımı, protezlerin kullanım süresini önemli ölçüde etkilemektedir.(Lee et al., 2024)

Özellikle protez dişleri ile protez kaidesi arasındaki bağlanma dayanımı, protezin bütünlüğü ve uzun dönem başarısı açısından kritik bir faktördür.(Tanaka et al., 2025) Geleneksel yöntemlerde veya frezelenen rezinlerde, polimerizasyon sırasında monomerlerin difüzyonu sonucu arayüzde güçlü bir interpenetran polimer ağı oluşur.(Tanaka et al., 2025) Dijital iş akışlarında ise protez kaidesi ve dişler ayrı ayrı üretilir ve sonrasında genellikle aynı UV ile polimerize olan bir reçine yardımıyla birleştirilir ve bu bağlanma kimyasal füzyon yerine yüzeysel adezyona dayanır. Bu bağlanmayı etkileyen faktörlerden biri de post-polimerizasyon işlemidir. Bu avantajlara rağmen, 3B baskılı protez kaide rezinleri ile yapay dişler veya tamir rezinleri arasındaki bağlanma konusunda hâlâ çeşitli zorluklar bulunmaktadır.

Önceki çalışmalar, 3B baskılı protez kaideleri ile diğer rezin materyaller arasındaki bağ dayanımının, geleneksel yöntemlerle elde edilene kıyasla genellikle daha zayıf olduğunu göstermiştir. 3B baskılı reçineler, ester bazlı polimerler, fotopolimerizasyon ve katman katman eklemeli üretim yoluyla üretilir, bu da düşük çift bağ dönüşüm oranına yol açar. Bu durum, C=C bağlarının sayısının azalması nedeniyle tamir bağlanma dayanımını olumsuz etkileyebilir.(Gad et al., 2022) Bu nedenle, diş hekimlerinin eklemeli tekniklerle üretilen protez kaideleri için uygun astar tekniklerini bilmesi kritik öneme sahiptir.(Karaokutan & Ayvaz, 2025) Örneğin, Choi ve ark. (Choi et al., 2020) 3B baskılı protez kaideleri ve dişlerin kırılma tokluğunun geleneksel materyallere göre belirgin şekilde düşük olduğunu belirtmiştir. Kane ve ark. (Kane & Shah, 2023) ise frezelenmiş protez kaideleri ile hazır dişler arasındaki bağ

dayanımının, 3B baskılı örneklerde elde edilenden anlamlı derecede yüksek olduğunu göstermiştir.

Ayrıca, yüzey işlemleri de bağ dayanımını artırmak için önerilen yöntemler arasında yer almakta; ancak post-polimerize 3B baskılı materyaller üzerinde bu işlemlerin etkisini inceleyen çalışmalar sınırlı sayıdadır.(Tanaka et al., 2025; Viotto et al., 2022)

Protez Tamiri ve Yüzey İşlemleri

Protez kırılması, protez kullanımını takiben en yaygın mekanik komplikasyonlardan biri olduğundan, protez kaide malzemelerinin optimum mekanik özelliklere sahip olmasının yanı sıra onarılabilir ve astarlanabilir olması gerekir. Kendiliğinden polimerize olan (otopolimerize) akrilik reçine bu tür tamir ve astar prosedürlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Protez kaideleri, çiğneme sırasındaki tekrarlayan yüklere maruz kalmanın yanı sıra, kullanıcıların, özellikle el becerisi düşük yaşlı bireylerin, protezi tutarken düşürmeleri gibi durumlara karşı hassastır. Bu faktörler, diyetin termal ve kimyasal değişikliklerinden kaynaklanan mekanik stres ve hidroliz gibi faktörler nedeniyle ağız ortamında biyolojik bozulmaya uğrama potansiyeliyle birleşince protez kaidesi kırıkları meydana gelebilir. Bu durumda, hasta refahını sağlamak için tamir tekniklerinin kullanılması zorunludur. İdeal olarak, tamir teknikleri kolay ve ucuz olmalı, aynı zamanda onarılmış protezin iyi bir mekanik direncini garanti etmelidir.(Viotto et al., 2022)

Tamir işlemleri öncesinde bağlanma dayanımını artırmak için mekanik ve/veya kimyasal yüzey işlemleri uygulanmaktadır. Kumlama ve hava ile partikül püskürtme gibi mekanik yüzey işlemleri, genellikle monomer uygulaması gibi kimyasal işlemlerle birlikte kullanıldığında, bağlanma dayanımını sürekli olarak artırmış ve yapay yaşlandırma (örneğin, 10.000 döngüye kadar termal çevrim) sonrasında dayanıklılığın korunmasını sağlamıştır. Literatürde kullanılan mekanik yüzey işlemleri aşındırma (Li et al., 2021; Lim & Shin, 2020; Sahin et al., 2024), kumlama (Gibreel et al., 2024; Htat et al., 2024; Lee et al., 2024; Li et al., 2021; Lim & Shin, 2020; Pereira et al., 2024; Pereira et al., 2025; Sahin et al., 2024; Tanaka et al., 2025), lazer ile pürüzlendirme (Sahin et al., 2024), plazma (Sahin et al., 2024), tribokimyasal silika kaplama (Tanaka et al., 2025) gibi yöntemlerdir. Kimyasal olarak da monomer uygulaması (Gad et al., 2022; Gibreel et al., 2024; Li et al., 2021; Lim & Shin, 2020; Pereira et al., 2024; Pereira et al., 2025), tetrahidrofuran (Htat et al., 2024), Vitacoll (Htat et al., 2024), etil asetat (Tanaka et al., 2025), aseton uygulamaları denenmiştir. Bu kimyasal maddeler,

polimerin şişmesine yardımcı olur ve MMA monomerinin penetrasyonuna ve kendiliğinden polimerize olan reçinenin yapışmasına izin verir. Elde edilen makaslama bağ dayanım değerleri 2-26 MPa arasında değiştiği görülmüştür. Kullanılan protez kaide materyali, tamir materyalleri, post-process işlemler, yüzey işlemleri ve yaşlandırma prosedürlerinin elde edilen bağ dayanımı üzerine etkili olduğu bildirilmiştir. Bu bulgular, son işlem ve yüzey hazırlık protokollerinin materyale özgü olarak optimize edilmesinin önemini ortaya koymaktadır.

Kimyasal yüzey işlemlerinden en çok MMA işlemi tercih edilmiş ve bulgular bu yüzey işleminin 3B baskı reçinelerinin tamiri için uygun olmayacağını göstermiştir. Literatürde MMA yüzey işlemleri ile mekanik yüzey işlemleri de araştırmalara dahil edilmiştir. Gad ve ark. (Gad et al., 2022) kumlamanın materyallerde makaslama bağlanma dayanımını anlamlı şekilde artırdığını bildirmiş, ancak monomer uygulamasının bazı 3B baskılı reçinelerde (ASIGA ve NextDent) daha az etkili olduğunu belirtmiştir. Kimyasal yüzey işlemlerinin etkinliğinin kullanılan 3B baskılı materyalin türüne bağlı olabileceğini bildirmiştir. Bunun nedeni 3B baskılı reçinelerin bifonksiyonel monomerler içeren ışıkla sertleşen malzemeler olması ve MMA'nın bu tür malzemelerle kopolimerize olmayabileceğidir. Tanaka ve ark. (Tanaka et al., 2025) alumina ile kumlama ve tribokimyasal silika kaplama yüzey işlemlerinin bağ dayanımını artırdığı ve bu etkinin termal döngü sonrasında da korunduğu bildirilmiştir. Buna karşılık, etil asetat gibi kimyasal yüzey işlemleri, geleneksel PMMA esaslı protez rezinlerinde etkili olmasına rağmen, kimyasal bileşim ve çözünürlük parametrelerindeki farklılıklar nedeniyle 3B baskılı materyaller üzerinde sınırlı bir etkiye sahip olmuştur. PMMA protez kaidesi ile tamir malzemeleri arasındaki bağlanma, astar reçinesinin monomerinin şişmiş PMMA reçinesine nüfuz etmesiyle başlar. Ardından gelen polimerizasyon, baz ve astar malzemesi arasında, gücü ağ kalınlığına bağlı olan sağlam bir iç içe geçmiş polimer ağı (interpenetrating polymer network) oluşturur. Ancak, 3B baskı protez kaideleri, çok işlevli monomerlerden çapraz bağlı polimerlerle oluşturulduğundan, çözünürlükleri geleneksel kaidelere göre daha düşüktür ve bu da tamir malzemelerinin yüzeye daha az nüfuz etmesine yol açabilir. Bağlanma dayanımı test sonuçlarına göre, kırık yüzey incelemesiyle tutarlıdır: post-polimerizasyondan önce hem protez diş hem de kaide gruplarında kohezif kırılmalar (malzemenin kendi içinde kırılması) gözlenmiştir. Bu, UV-polimerize reçinelerin 3B baskılı malzemelere etkili bir şekilde nüfuz ettiğini gösterir. Ancak, post-polimerizasyondan sonra, yüzeyde oluşan polimerizasyon tabakası UV-polimerize reçinelerin penetrasyonunu engelleyebilir ve bu da adeziv kırılmaya (bağlanma arayüzeyinde kırılmaya) yol açar. Post-polimerizasyon, 3B baskılı reçinelerin dönüşüm derecesini artırarak bağlanma dayanımlarını etkileyebilir. Benzer şekilde, Karaokutan

ve ark.(Karaokutan & Ayvaz, 2025) üretim tekniği, yüzey işlemleri ve bunların etkileşiminin bağlanma dayanımı üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Monomer uygulaması ise yüzey işlemleri arasında en düşük bağ dayanımı göstermiştir. 3B baskı reçinesi esas olarak üretilen dimetakrilat içermektedir, MMA ile kolayca kopolimerize olmayan bir bileşime sahip olması, monomer uygulamasının etkisiz kalmasına neden olabileceğini düşündürmüştür. Yüzey işlemi grupları arasında 50 µm kumlama uygulanan grup, en yüksek makaslama bağ dayanım değeri göstermiştir. SEM görüntüleri, 50 µm kumlamanın daha homojen pürüzlü yüzeyler oluşturduğunu ve bunun da daha yüksek bağlanma dayanımlarıyla sonuçlandığını göstermiştir. Buna karşın, 110 µm kumlama uygulanan gruplarda tozlarının malzeme yüzeyine yapışık kaldığı görülmüş, bu durumun adezyonu olumsuz etkilemiş olabileceği düşünülmüştür. Gibreel ve ark. (Gibreel et al., 2024) 3B baskılı polimerlerinin genellikle MMA içermeyen dimetakrilat monomerler ve oligomerler olduğundan, MMA ile bağlanma ön işleminin ışıkla sertleşen protez kaidesi materyalleriyle uyumsuz olabileceğini ve bifonksiyonel monomerlerle kopolimerize olmayabileceği bildirmiştir. Sonuç olarak, zayıf makaslama bağ dayanımı, MMA'nın çözücü özellikleri ile polimer arasındaki uyumsuzluğa işaret edebilir. 3B baskılı reçinelerde mekanik yüzey işlemlerinin makaslama bağ dayanım değerlerini etkili bir şekilde artırdığı gözlemlenmiştir. Gad ve ark. (Gad & Abualsaud, 2024) sistematik bir derlemede ise, 3B baskılı reçinelerin tamirinin yüzey işlemleriyle bile zor olduğunu, kompozit reçinelerin tercih edilmesini önermişlerdir. MMA monomeri, geleneksel akrilik reçineler için önerilmesine rağmen, 3B baskılı reçinenin yüzeyini çözmez ve dolayısıyla yüzey topografyasını değiştirmez. Bu durum, 3B baskılı reçinelerin konvansiyonel reçine emsallerine göre daha az C=C bağı içermesi nedeniyle kimyasal etkileşimin başarısızlığına bağlanır. Bu nedenle, MMA'nın 3B baskılı reçine yüzeyini koşullandırmak için uygun bir seçenek olmadığı sonucuna varılmıştır. Ancak, bazı çalışmalar MMA işlemi için SEM analizinin, 3B baskılı reçine yüzeyinde şişme ve mikrotutuculuk olukları şeklinde değişiklikler olduğunu göstermiştir. Daha agresif organik çözücüler (aseton, kloroform gibi) ve Bis-GMA bazlı reçine kompozitlerin tamir malzemesi olarak kullanılması, 3B baskılı reçineler için önerilen alternatiflerdir. Kumlama 3B baskılı reçinelerin tamirinde en çok önerilen yüzey işlemi olmuştur. Frez ile pürüzlendirme de dayanımını artıran bir seçenek olarak belirtilmiştir. Mekanik yüzey işlemleri (frez ile aşındırma veya kumlama), etkili bağlanma alanını genişleterek ve mikromekanik tutuculuk sağlayarak bağlanmayı güçlendirir. Lim ve ark.'nın (Lim & Shin, 2020) çalışmasında bis-akril kompozit reçine (Luxatemp), metilmetakrilata (Jet) kıyasla 3B baskılı reçineye daha iyi makaslama bağ dayanımı göstermiştir. Metilmetakrilatın, bileşiminde MMA monomeri içermesi nedeniyle 3B

baskılı reçineye bağlanma sürecini olumsuz etkilediği düşünülmektedir. Hem metilmetakrilat hem de bis-akril kompozit gruplarında farklı yüzey işlemlerinin (mekanik ya da kimyasal) bağ dayanımı üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir fark yaratmadığı bulunmuştur. Kumlama grupları, SEM görüntülerinde mikro-tutuculuk özellikleri gösterse de bağ dayanımı kontrol gruplarına göre anlamlı bir fark göstermemiştir. Bu, klinik pratikte tek başına kumlamanın tamir reçinesinin mekanik bağlanmasını artırmak için yeterli olmayabileceği anlamına gelir. MMA monomeri uygulanmasıyla, 3B baskılı reçinenin yüzeyinin çözüldüğü ve şiştiği, SEM görüntülerinde uzun oluk benzeri mikro-tutuculuk özellikleri gözlemlenmiştir. Ancak, bu durum bağ dayanımında önemli bir artışa yol açmamıştır. 3B baskılı PMMA reçinesi bifonksiyonel monomerlere sahip ışıkla sertleşen bir malzeme olduğundan, MMA'nın bifonksiyonel monomerlerle uygun şekilde kopolimerize olamayacağı ve dolayısıyla uygun bir koşullandırma sıvısı olmayabileceği rapor edilmiştir. Başarısızlık modu analizinde hem Jet hem de Luxatemp gruplarında kohezif kırılmanın (3B baskılı reçine katmanında meydana gelen kırılma) en sık görülen tip olduğu bulunmuştur. Luxatemp, Jet'e kıyasla daha fazla kohezif ve daha az adeziv kırılma göstermiştir. Bu sonuçlar hem Jet hem de Luxatemp ile hasta başı klinik pratikte tatmin edici sonuçlar vermesinin beklendiğini göstermektedir.

Literatürde klasik MMA monomerinden farklı kimyasal yüzey işlemlerinin denendiği çalışmalar da bulunmaktadır. Lee ve ark. (Lee et al., 2024) astar materyalleri ile 3B baskı protez kaide materyalleri arasında en yüksek bağ dayanımını Ufi Gel Hard astar materyali ile elde etmiştir. Bu durum, Ufi Gel Hard astar materyalinin non-polimerize edici solvent diklorometan içermesiyle ilişkilendirilmiş ve diklorometan, protez kaidesinin çözülmesini kolaylaştırarak, astar malzemesinin penetrasyonunu, mikro mekanik tutuculuğunu ve yapışma dayanımını artırdığı bildirilmiştir. Öte yandan, Kooliner en düşük bağlanma dayanımını göstermiştir. Kooliner'in yüksek moleküler ağırlıklı izobutil metakrilat (IBMA) içeriği, monomer penetrasyonunu kısıtlayarak güçlü bir polimer ağının oluşumunu engellediği bildirilmiştir. Yüksek bağlanma dayanımına sahip protezlerde, kohezif kırılma (malzemenin kendi içinde kırılması), bağın sağlamlığını gösterirken, adeziv kırılma (bağlanma arayüzeyinde kırılma) yetersiz veya kusurlu bir bağlanma sürecine işaret eder. 3B baskı kaidesi Ufi Gel Hard (U) ile birleştirildiğinde hem yaşlandırma öncesinde hem de sonrasında ağırlıklı olarak kohezif kırılmalar sergilemiştir. Bu, bu malzemelerle tamir işleminin 3B baskı protezler için yeterli kohezif gücü sağladığını doğrulamaktadır. Viotto ve arkadaşları ise, (Viotto et al., 2022) sert astar reçinesi Soft Confort (SC) gruplarında (%100) ve kumlama uygulanan SC gruplarında yüksek oranda adeziv kırık gözlemlemiştir. SC reçinesinin etil metakrilat polimer tozu ve izo-

bütülmetakrilat monomer sıvısından oluşması, kaide reçinesinin akrilat ve metakrilat oligomer ve monomerleri ile uyumsuzluğa yol açmış olabileceği bildirilmiştir. MMA monomeri SEM görüntüleri ise, MMA uygulamasının, reçine matrisinin daha fazla açığa çıkmasıyla birlikte fark edilir bir yüzey modifikasyonuna yol açtığını göstermiştir. Bu, daha fazla karbon zincirinin tamir malzemesiyle yeni bağlar oluşturmak için serbest kalabileceği anlamına gelir. Lazer (Er:YAG) uygulamasının, tamir yüzeyinde düzensizlikler yaratarak Jet reçinesinin akışını ve bu düzensizliklere girmesini kolaylaştırdığı için Jet reçinesi ile onarılan numunelerin eğilme dayanımını artırmış olabileceği düşünülmektedir. Lazer uygulamasının, eğilme dayanımı verileri üzerinde MMA koşullandırmasına benzer bir etkiye sahip olduğu da gösterilmiştir. Kumlama tek başına uygulandığında SEM görüntülerine göre yüzey değişikliklerini oluşturmak için yetersiz kalmıştır. Htat ve ark. (Htat et al., 2024) yüzey işlemi yapılmadığında 3B baskılı protez kaidesi malzemesinin tamir materyalleri ile en yüksek bağlanma dayanımına sahip olduğunu bildirmiştir. 3B baskılı protez kaidesinin düşük yüzey sertliğine sahip olması, kendiliğinden polimerize olan akrilik reçine monomerinin malzemeyi şişirmek için daha iyi nüfuz etmesini sağlayarak mikromekanik kilitlenmeyi artırabileceği rapor edilmiştir. Bu, 3B baskılı protez kaidesinin, malzeme arayüzeyinde adeziv kırılmadan ziyade, ağırlıklı olarak kohezif kırılma göstermesiyle desteklenmiştir. Kimyasal yüzey işlemi olarak tetrahidrofuran uygulaması, 3B baskılı protez kaidesinin makaslama bağlanma dayanımını, kumlamanın ulaştığı seviyeye yükseltmiştir. Tetrahidrofuran, hidrofobik ve hidrofilik yapılara sahip heterosiklik organik bir madde olup, polimer matrisini şişirip yumuşatarak ve çözerek ek bileşenlerin daha iyi iç içe geçmesine ve kilitlenmesine olanak tanıdığı bildirilmiştir. Vitacoll (MMA monomeri ve butanon karışımı) uygulaması, 3B baskılı protezde bağlanma dayanımını yüzey işlemi uygulanmayan yüzeyle karşılaştırılabilir düzeyde bırakmıştır. Vitacoll'deki butanon konsantrasyonunun, 3B baskılı protez matrisini etkili bir şekilde çözmek için yeterli olmayabileceği ve MMA monomerinin 3B baskılı kaidenin bisfenol A dimetakrilat yapısı ile kimyasal bağ oluşturamayabileceği düşünülmektedir. Genel olarak, kendiliğinden polimerize olan akrilik reçine ile yapıştırmadan önce protez kaidesi yüzeyinin işleminden geçmesi önerilmektedir. Tetrahidrofuran, 3B baskılı protez kaidesi için kumlama ile karşılaştırılabilir düzeyde bağlanma dayanımını artırmıştır. Bununla birlikte, kumlamanın artan yüzey pürüzlülüğü nedeniyle potansiyel olarak plak birikimini artırabileceği ve oral mukozal enfeksiyona yol açabileceği unutulmamalıdır. Bu nedenle, protez tamiri veya astar prosedürleri sırasında kumlama alanının dikkatli bir şekilde kontrol edilmesi esastır.

Sadece mekanik yüzey işlemlerinin etkisini araştıran çalışmalar nispeten azdır. Lankes ve ark. (Lankes et al., 2023) ise alümina 0.4 MPa basınç ile ön işlemin, test edilen gruplar arasında en yüksek bağlanma dayanımı değerlerini gösteren ön işlem olduğunu ve basıncın (0.4 MPa) kumlama tozunun tipinden daha fazla etkiye sahip olduğunu bulmuştur. (0.4 MPa) kumlama ile en yüksek yüzey pürüzlülüğü (Ra) değerlerini elde etmiştir. Makaslama bağdayanımı sonrası ağırlıklı olarak 3B baskılı reçine içinde kohezif kırıklar gözlemlenmiştir (%40-100). 3B baskılı materyaldeki çok yüksek orandaki kohezif kırıklar, yüksek bağlanma dayanımını vurgulamaktadır. Savaş ve ark. (Sahin et al., 2024) çalışma sonuçlarına göre, Er:YAG lazer yüzey işlemi, 3B baskı tekniği için en güçlü bağ dayanımı sağlayan yüzey işlemi yöntemi olmuştur. Lazer, 3B baskı test numunelerinde tamir eğilme dayanımı değerlerini diğer yüzey işlemlerine ve işlenmemiş gruplara göre artırmıştır. Lazer uygulaması, yüzey pürüzlülüğünü artırarak tamir için faydalı olmuştur. Kumlama ve lazer yüzey işlemleri, işlem görmeyen alt gruplara kıyasla yüzey pürüzlülüğü değerlerini istatistiksel olarak anlamlı şekilde artırmıştır. Kumlama, 3B test numunelerinde yüzey pürüzlülüğünü artırmış, ancak tamir eğilme dayanımında yeterince etkili olamamış ve bağlanma dayanımını artıramamıştır. Plazma yüzey işlemi, tamir bağlanma dayanımı değerlerinde bir artışa neden olmamıştır. Yüzey pürüzlülüğünü artırmaması ve akrilik yüzeyinde herhangi bir yapısal değişikliğe neden olmaması bu durumla tutarlıdır. Er:YAG lazer yüzey işlemi, self-cure akrilik ile 3B baskılı protez kaidelerinin tamiri için etkili bir yöntem olarak önerilebilir.

Protez kaidesi malzemelerinin yorulma sorunları ve 3B baskı ile elde edilen protez kaidelerinin tamiri ile ilgili sınırlı literatür göz önüne alındığında, bu tekniklerle üretilen malzemelerin mekanik özellikleri ve tamir olasılıkları hakkında daha fazla araştırmaya ihtiyaç vardır. Termal döngü, suyun yapışma arayüzündeki plastikleştirici etkisi nedeniyle bağlanma dayanımını etkilemekte ve metakrilat gruplarının çözünürlüğünü ve hidroliz yoluyla bozulmasına neden olmaktadır. Bu nedenle, tamir tekniklerinin uzun ömürlülüğünü değerlendiren, tamir öncesi ve sonrası termal yaşlandırmaya tabi tutulmuş 3B baskılı reçinelerin değerlendirilmesi klinik olarak önemlidir. Termal döngü, kullanılan malzemelerin farklı termal genleşme katsayıları ve su absorpsiyonu nedeniyle döngüsel strese neden olarak bağ dayanımını etkilemektedir. Yaşlandırma yöntemi olarak en sık tercih edilen metot termal siklus (5000-1000) işlemi olmuştur (Gad et al., 2022; Htat et al., 2024; Li et al., 2021; Pereira et al., 2024; Pereira et al., 2025; Tanaka et al., 2025), bundan başka hidrotermal yaşlandırma, (Lee et al., 2024) hızlı yaşlandırma (Gibreel et al., 2024) yöntemleri de tercih edilmiştir.

Sonuç olarak, post-washing protokolü ve sonrasında uygulanan yüzey işlemleri, 3B baskılı protez kaide materyallerinin biyouyumluluğu, mekanik özellikleri ve tamir başarısı üzerinde belirleyici rol oynamaktadır. Mevcut literatür, özellikle kumlama ve lazer uygulamaları gibi mekanik yüzey işlemlerinin bağ dayanımını artırmada etkili olduğunu göstermektedir. Ancak farklı materyaller ve üretim protokolleri nedeniyle standart bir yaklaşım henüz oluşturulamamıştır. Bu nedenle, klinik uygulamaları yönlendirecek daha fazla uzun dönem ve standartlaştırılmış çalışmaya ihtiyaç bulunmaktadır.

Kaynaklar

- Alharbi, N., Wismeijer, D., & Osman, R. B. (2017). Additive Manufacturing Techniques in Prosthodontics: Where Do We Currently Stand? A Critical Review. *Int J Prosthodont*, 30(5), 474–484. <https://doi.org/10.11607/ijp.5079>
- Choi, J. J. E., Uy, C. E., Plaksina, P., Ramani, R. S., Ganjigatti, R., & Waddell, J. N. (2020). Bond Strength of Denture Teeth to Heat-Cured, CAD/CAM and 3D Printed Denture Acrylics. *J Prosthodont*, 29(5), 415-421. <https://doi.org/10.1111/jopr.13125>
- Fiore, A. D., Meneghello, R., Brun, P., Rosso, S., Gattazzo, A., Stellini, E., & Yilmaz, B. (2022). Comparison of the flexural and surface properties of milled, 3D-printed, and heat polymerized PMMA resins for denture bases: An in vitro study. *J Prosthodont Res*, 66(3), 502-508. https://doi.org/10.2186/jpr.JPR_D_21_00116
- Gad, M. M., & Abualsaud, R. (2024). Effect of repair and surface treatments on the strength of digitally fabricated resin-based dental prostheses: A systematic review of in vitro studies. *J Dent*, 141, 104806. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2023.104806>
- Gad, M. M., Albazroun, Z., Aldajani, F., Elakel, A. M., El Zayat, M., Akhtar, S., Khan, S. Q., Ali, S., & Rahoma, A. M. (2022). Repair Bond Strength of Conventionally and Digitally Fabricated Denture Base Resins to Auto-Polymerized Acrylic Resin: Surface Treatment Effects In Vitro. *Materials (Basel)*, 15(24). <https://doi.org/10.3390/ma15249062>
- Gibreel, M., Perea-Lowery, L., Garoushi, S., Wada, J., Lassila, L., & Vallittu, P. (2024). Effect of different surface treatments on shear bond strength of autopolymerizing repair resin to denture base materials processed with different technologies. *J Prosthodont Res*, 68(4), 549-557. https://doi.org/10.2186/jpr.JPR_D_23_00149
- Htat, H. L., Prawatvatchara, W., Techapiroontong, S., Lee, J. H., & Limpuangthip, N. (2024). Effect of mechanical and chemical surface treatments on the repairing of milled and 3D-printed denture bases. *Sci Rep*, 14(1), 23413. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-75513-y>
- Hwangbo, N.-K., Nam, N.-E., Choi, J.-H., & Kim, J.-E. (2021). Effects of the washing time and washing solution on the biocompatibility and mechanical properties of 3D printed dental resin materials. *Polymers*, 13(24), 4410.
- Kalberer, N., Mehl, A., Schimmel, M., Müller, F., & Srinivasan, M. (2019). CAD-CAM milled versus rapidly prototyped (3D-printed) complete dentures: An in vitro evaluation of trueness. *J Prosthet Dent*, 121(4), 637-643. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2018.09.001>
- Kane, B., & Shah, K. C. (2023). In vitro analysis of shear stress: CAD milled vs printed denture base resins with bonded denture tooth. *Journal of Prosthodontics*, 32(S1), 29-37.
- Karaokutan, I., & Ayvaz, I. (2025). Effect of various surface treatments on relining bond strength of CAD-CAM denture base materials. *J Prosthodont*, 34(4), 422-428. <https://doi.org/10.1111/jopr.13831>

- Lankes, V., Reymus, M., Liebermann, A., & Stawarczyk, B. (2023). Bond strength between temporary 3D printable resin and conventional resin composite: influence of cleaning methods and air-abrasion parameters. *Clin Oral Investig*, 27(1), 31-43. <https://doi.org/10.1007/s00784-022-04800-7>
- Lee, C. G., Jin, G., Lim, J. H., Liu, Y., Afrashtehfar, K. I., & Kim, J. E. (2024). Influence of hydrothermal aging on the shear bond strength of 3D printed denture-base resin to different relining materials. *J Mech Behav Biomed Mater*, 149, 106221. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2023.106221>
- Li, P., Kraemer-Fernandez, P., Klink, A., Xu, Y., & Spintzyk, S. (2021). Repairability of a 3D printed denture base polymer: Effects of surface treatment and artificial aging on the shear bond strength. *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*, 114, 104227.
- Lim, N. K., & Shin, S. Y. (2020). Bonding of conventional provisional resin to 3D printed resin: the role of surface treatments and type of repair resins. *J Adv Prosthodont*, 12(5), 322-328. <https://doi.org/10.4047/jap.2020.12.5.322>
- Mostafavi, D., Methani, M. M., Piedra-Cascón, W., Zandinejad, A., & Revilla-León, M. (2021). Influence of the rinsing postprocessing procedures on the manufacturing accuracy of vat-polymerized dental model material. *Journal of Prosthodontics*, 30(7), 610-616.
- Papanu, J., Hess, D., Soane, D., & Bell, A. (1990). Swelling of poly (methyl methacrylate) thin films in low molecular weight alcohols. *Journal of applied polymer science*, 39(4), 803-823.
- Pereira, A., Costa, R. T. F., Leão, R. S., Casado, B., Batista, A. U. D., & Moraes, S. L. D. (2024). Effectiveness of different surface treatments on bond strength between 3D-printed teeth and denture base. *J Prosthodont*. <https://doi.org/10.1111/jopr.13941>
- Pereira, A. L. C., de Souza, B., de Miranda, L. M., Curinga, M. R. S., de Sousa, L. C., de Queiroz EÉ, F., Barão, V. A. R., & Carreiro, A. (2025). Evaluation of the bond strength, surface roughness and wettability between 3D-printed denture base resin to denture lining material to different surface treatments. *J Clin Exp Dent*, 17(3), e249-e258. <https://doi.org/10.4317/jced.62350>
- Rekow, E. D. (2020). Digital dentistry: The new state of the art—Is it disruptive or destructive? *Dental Materials*, 36(1), 9-24.
- Sahin, Z., Ozer, N. E., Akan, T., Kılıcarslan, M. A., & Karaagacılıoglu, L. (2024). The impact of different surface treatments on repair bond strength of conventionally, subtractive-, and additive-manufactured denture bases. *J Esthet Restor Dent*, 36(9), 1337-1347. <https://doi.org/10.1111/jerd.13248>
- Steinmassl, P. A., Wiedemair, V., Huck, C., Klaunzer, F., Steinmassl, O., Grunert, I., & Dumfahrt, H. (2017). Do CAD/CAM dentures really release less monomer than conventional dentures? *Clin Oral Investig*, 21(5), 1697-1705. <https://doi.org/10.1007/s00784-016-1961-6>

- Tanaka, A., Kawaguchi, T., Ito, A., Isshi, K., Hamanaka, I., & Tsuzuki, T. (2025). Shear bond strength of ultraviolet-polymerized resin to 3D-printed denture materials: Effects of post-polymerization, surface treatments, and thermocycling. *J Prosthodont Res*, 69(1), 21-29. https://doi.org/10.2186/jpr.JPR_D_23_00321
- Valenti, C., Isabella Federici, M., Masciotti, F., Marinucci, L., Xhimitiku, I., Cianetti, S., & Pagano, S. (2024). Mechanical properties of 3D printed prosthetic materials compared with milled and conventional processing: A systematic review and meta-analysis of in vitro studies. *J Prosthet Dent*, 132(2), 381-391. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2022.06.008>
- Viotto, H., Silva, M. D. D., Nunes, T., Coelho, S. R. G., & Pero, A. C. (2022). Effect of repair methods and materials on the flexural strength of 3D-printed denture base resin. *J Adv Prosthodont*, 14(5), 305-314. <https://doi.org/10.4047/jap.2022.14.5.305>
- Xu, Y., Xepapadeas, A. B., Koos, B., Geis-Gerstorfer, J., Li, P., & Spintzyk, S. (2021). Effect of post-rinsing time on the mechanical strength and cytotoxicity of a 3D printed orthodontic splint material. *Dental materials*, 37(5), e314-e327.

BÖLÜM 2

ORAL MİKROBİYOTA VE KRONİK OROFASİYAL AĞRI: OLASI TRİGEMİNAL MEKANİZMALAR VE KLİNİK KANITLAR

Neslihan TINASTEPE¹

¹ Doç. Dr.; Üsküdar Üniversitesi, Diş Hekimliği Fakültesi, Protetik Diş Tedavisi A.B.D. Orcid No:<https://orcid.org/0000-0002-4688-8653>

1.Giriş

Kronik orofasiyal ağrı; farklı etiyolojik ve patofizyolojik mekanizmalara sahip çeşitli klinik durumları kapsayan kompleks bir sağlık problemidir. Ağrının gelişimi ve sürdürülmesinde periferik ve santral nosiseptif mekanizmaların yanı sıra nöroimmün süreçlerin de rol oynayabileceği bildirilmektedir. Son yıllarda mikrobiyotanın immün, metabolik ve nöroendokrin mekanizmalar aracılığıyla sinir sistemiyle etkileşiminin gösterilmesi, oral ve bağırsak mikrobiyotasının kronik ağrıdaki olası rolüne yönelik ilgiyi artırmıştır.

Oral kavitenin zengin ve dinamik bir mikrobiyal ekosisteme sahip olması ve orofasiyal dokuların duyuşal innervasyonunun büyük ölçüde trigeminal sistem tarafından sağlanması, mikrobiyota ile orofasiyal nosiseptif mekanizmalar arasındaki olası ilişkinin araştırılmasını önemli hale getirmektedir. Bu bölümde kronik orofasiyal ağrının temel mekanizmaları kısaca ele alınarak, oral ve bağırsak mikrobiyotasının trigeminal nosiseptif ve nöroimmün süreçlerle olası ilişkisi deneysel ve klinik bulgular doğrultusunda değerlendirilecektir.

2. Orofasiyal Ağrı

Melzack ve Wall, 1965 yılında ortaya koydukları kapı kontrol teorisi ile ağrının yalnızca nosiseptif uyaranlar ve bu uyaranlarla ilişkili merkezi sinir sistemi yollarının aktivasyonu sonucunda oluşmadığını; nosiseptif iletinin santral sinir sisteminde nosiseptif olmayan uyaranlar ve inen modülatör yollar tarafından değiştirilebildiğini ortaya koymuştur (Melzack ve Wall, 1965). Bu teori, günümüzde kabul gören biyopsikososyal ağrı modelinin temelini oluşturmuştur (Sullivan ve ark., 2023; Sessle, 2023).

Orofasiyal ağrılar sürelerine göre “akut” (3 aydan kısa süren), “epizodik” (3 aydan uzun sürebilmekle birlikte ayda 15 günden az görülen) veya “kronik” (3 aydan uzun süredir mevcut olan ve ayda en az 15 gün görülen) olarak tanımlanabilir (ICOP, 2020). Akut ağrıya neden olan altta yatan bozukluğun tedavi edilmemesi durumunda, semptom olarak ortaya çıkan ağrı zamanla kronikleşebilir (ICOP, 2020). Kronik ağrı durumlarında merkezi sinir sisteminde gelişen yapısal ve fonksiyonel değişikliklerin ağrının sürdürülmesine katkıda bulunabileceği düşünülmektedir (Sessle, 2023). Kronik orofasiyal ağrı, birbirinden farklı ve özgül, ancak ağrının kronik seyretmesinin ortak olduğu çeşitli klinik rahatsızlıkları kapsayan genel bir kavramdır (Ananthan ve Benoliel, 2020). Bu ağrı tablolarının büyük bölümünde, vücudun diğer bölgelerindeki kronik ağrı durumlarında da görülebilen allodini, hiperaljezi ve yansıyan ağrı (*referred pain*) gibi ortak özellikler bildirilmiştir (Sessle, 2023).

Orofasiyal ağrının toplumdaki prevalansının yaklaşık %25 olduğu, kronik orofasiyal ağrının ise yaklaşık %10 düzeyinde görüldüğü bildirilmektedir (Macfarlane ve ark., 2002; McMillan ve ark., 2006; Ananthan ve Benoliel, 2020). Bazı orofasiyal ağrı durumlarına fibromiyalji, baş ağrısı, servikal ve bel ağrısı gibi farklı bölgeleri etkileyen ağrı tabloları eşlik edebilmektedir. Ayrıca anksiyete, depresyon, somatizasyon ve katastrofizasyon gibi psikolojik faktörler ile uyku bozuklukları, insomni ve uyku ile ilişkili solunum problemleri de bu hastalarda sıklıkla bildirilmektedir (Sessle, 2023). Orofasiyal ağrı ayrıca çiğneme ve konuşma gibi motor fonksiyonlarda bozulmalarla da ilişkili olabilmektedir.

2.1.Orofasiyal Ağrıların Sınıflandırılması ve Başlıca Klinik Tablolar

ICOP'a göre orofasiyal ağrı; dentoalveolar ve ilişkili yapılardan kaynaklanan ağrılar, miyofasiyal ağrı, temporomandibular eklem ağrısı, kraniyal sinir lezyonu veya hastalıklarına bağlı ağrı, primer baş ağrılarını taklit eden orofasiyal ağrı ve idiyopatik orofasiyal ağrı olmak üzere altı ana grupta sınıflandırılmaktadır (ICOP, 2020).

Dentoalveolar ve ilişkili yapılardan kaynaklanan ağrılar: Dentoalveolar ağrılar, pulpa, periodontal dokular, gingiva ve alveoler kemik gibi diş ve çevresindeki yapıların hastalıklarından kaynaklanabilir ve ağrının günlük aktiviteleri etkileyebildiği bildirilmiştir. Dentoalveolar kökenli ağrının gerçek anlamda kronik hale gelmesinin oldukça nadir olduğu düşünüldüğünden, belirgin bir etiyolojik nedenin gösterilemediği olgularda klinik ve radyografik değerlendirme öncelikli olarak yapılmalı; ardından komşu anatomik yapılardan yansıyan ağrılar ve primer atipik baş ağrıları ayırıcı tanıda dikkatle değerlendirilmelidir (Ananthan ve Benoliel, 2020).

Miyofasiyal ağrı ve temporomandibular eklem ağrısı: Temporomandibular bozukluklar (TMD), temporomandibular eklem ve çiğneme kaslarını ilgilendiren farklı klinik durumları kapsamakta ve kronik orofasiyal ağrının sık karşılaşılan nedenleri arasında yer almaktadır. TMD ile ilişkili ağrı, kas kökenli miyalji veya eklem kökenli artralji şeklinde ortaya çıkabilir. Toplumun yaklaşık %4–12'sinin TMD'den etkilendiği, yaklaşık %10'unda ise semptomların şiddetli olduğu bildirilmiştir. Ayrıca TMD'ye eşlik eden ağrının kronik seyrebildiği ve yaşam kalitesi üzerinde belirgin etkiler oluşturabildiği belirtilmektedir (Ananthan ve Benoliel, 2020).

Kraniyal sinir lezyonu veya hastalıklarına bağlı ağrı: Orofasiyal ağrının bir diğer grubunu kraniyal sinirlerin lezyon veya hastalıklarına bağlı nöropatik ağrılar oluşturur. Orofasiyal bölgede bu grupta özellikle trigeminal nevralji ve ağrılı post-travmatik trigeminal nöropati öne çıkmaktadır.

Trigeminal nevralji, trigeminal sinirin bir veya daha fazla dalını etkileyen, genellikle iki dakikadan kısa süren şiddetli ve tekrarlayıcı ağrı ataklarıyla karakterizedir (ICHD-3, 2018). Hastaların yarısından fazlasında tetik bölgeler bulunabilir ve normalde ağrı oluşturmayan uyaranlar atakları başlatabilir (Ananthan ve Benoliel, 2020).

Ağrılı post-travmatik trigeminal nöropati ise trigeminal sinirin periferik dallarında meydana gelen travmanın ardından gelişen kronik nöropatik orofasiyal ağrı tablosudur (Benoliel ve ark., 2012; ICHD-3, 2018; Ananthan ve Benoliel, 2020).

Primer baş ağrılarını taklit eden orofasiyal ağrılar: Orofasiyal bölgede nedeni açıklanamayan bazı ağrılar, primer baş ağrılarının yüz bölgesindeki prezentasyonları şeklinde de ortaya çıkabilir. Özellikle migren ve trigeminal otonomik sefalaljilerin orofasiyal bölgede hissedilen formları bildirilmiştir. Bu ağrıların yüz, dentoalveolar bölge veya maksiller sinüs çevresinde hissedilebilmesi yanlış tanıya ve gereksiz tedavilere yol açabileceğinden, ayırıcı tanıda göz önünde bulundurulmaları önemlidir (Ananthan ve Benoliel, 2020).

İdiyopatik orofasiyal ağrılar: İdiyopatik orofasiyal ağrılar içerisinde yanan ağız sendromu (Burning Mouth Syndrome; BMS) ve persistan idiyopatik yüz ağrısı (Persistent Idiopathic Facial Pain; PIFP) önemli klinik tablolar arasında yer almaktadır.

BMS, klinik olarak açıklayıcı bir oral lezyon bulunmaksızın özellikle dilde olmak üzere oral mukozada persistan yanma veya dizestezi ile karakterize kronik bir orofasiyal ağrı durumudur. Ağız kuruluğu hissi ve tat algısındaki değişiklikler tabloya eşlik edebilir. Semptomları açıklayabilecek lokal ya da sistemik bir neden saptanamadığında primer BMS olarak sınıflandırılır. BMS genel popülasyonda yaklaşık %0,1–3,7 oranında bildirilmiş olup postmenopozal kadınlarda daha sık görülmektedir. Patofizyolojisinin tek bir nedene dayanmadığı; nöral, endokrin ve genetik etkenlerin katkıda bulunabileceği düşünülmektedir (Lee ve ark., 2022).

PIFP, belirlenebilir bir patolojik nedenle açıklanamayan, çoğunlukla günlük ya da hemen her gün görülen ve zamanla yayılım gösterebilen persistan yüz ağrısıdır (ICHHD-3, 2018; ICOP, 2020). Ağrı genellikle derin ve iyi lokalize edilemeyen niteliktedir; çoğunlukla tek taraflı olmakla birlikte bilateral de olabilir ve sızlayıcı, yanıcı, zonklayıcı veya batıcı olarak tarif edilebilir. Semptomlar bazı hastalarda yıllarca devam edebilir (Ananthan ve Benoliel, 2020).

3.Orofasiyal Nosisepsiyon ve Trigeminal Duyusal Sistem

Orofasiyal bölgeden kaynaklanan duyusal bilgilerin iletiminde temel rol oynayan trigeminal duyusal sistem; trigeminal sinir, trigeminal gangliyon ve trigeminal duyusal çekirdeklerden oluşur (Kim ve ark., 2024). Trigeminal duyusal çekirdekler arasında mezensefalik çekirdek, ana duyusal çekirdek ve spinal trigeminal çekirdek yer almakta olup, bu yapılar özellikle dişler ve çevre dokular, çiğneme kasları, kornea ve yüzün trigeminal sinir tarafından innerve edilen bölgelerinden gelen duyusal uyarıları işler. Trigeminal sistemde duyusal bilginin yalnızca iletilmesi değil, farklı nöral bağlantılar ve ekstratrigeminal etkiler aracılığıyla entegrasyonu ve modülasyonu da gerçekleşir (Kim ve ark., 2024).

Orofasiyal bölgedeki nosiseptif uyarıların algılanmasından, periferik dokularda serbest sinir uçlarıyla sonlanan özelleşmiş primer duyu nöronları sorumludur (Luo ve ark., 2021). Uyarının oluşturduğu enerjinin nosiseptör membranındaki iyon kanalları ve reseptörler aracılığıyla elektriksel aktiviteye dönüştürülmesiyle oluşan aksiyon potansiyelleri, primer afferent lifler boyunca merkezi sinir sistemine iletilir. Orofasiyal bölgenin büyük bölümünden kaynaklanan nosiseptif bilgiyi taşıyan primer afferent nöronların hücre gövdeleri trigeminal gangliyonda bulunurken, periferik uzantıları hedef dokuları innerve eder ve santral uzantıları beyin sapındaki trigeminal duyusal çekirdek kompleksinde sonlanır (Gold ve Gebhart, 2010; Luo ve ark., 2021).

Orofasiyal nosiseptif uyarıların santral işlenmesinde spinal trigeminal çekirdek önemli bir role sahiptir. Özellikle spinal trigeminal çekirdeğin kaudal bölümü (Sp5C/Vc), periferik nosiseptif afferentlerden taşınan sinyallerin iletimi ve modülasyonunda temel yapılardan biridir. Bununla birlikte, nosiseptif işlemenin yalnızca Sp5C ile sınırlı olmadığı ve diğer trigeminal duyusal çekirdeklerin de bu sürece katkıda bulunduğu bilinmektedir. Trigeminal beyin sapı kompleksinde işlenen nosiseptif bilgiler, talamik ve diğer supraspinal yapılara iletilerek ağrının duyusal, affektif ve davranışsal bileşenlerinin oluşumuna katkıda bulunur (Sessle, 2023; Kim ve ark., 2024; Gambeta ve ark., 2020).

4.Periferik ve Santral Sensitizasyon

Periferik sensitizasyon, inflamasyon veya doku hasarı sonrasında periferik nosiseptörlerin aktivasyon eşiğinin düşmesi ve uyarılabilirliğinin artmasıyla karakterizedir. İnflamatuvar süreçte açığa çıkan mediyatörler, nosiseptörlerde bulunan iyon kanalları ve

reseptörlerin fonksiyon ve ekspresyonunu değiştirerek ağrı hipersensitivitesine katkıda bulunabilir (Schumacher, 2024). Orofasiyal dokularda da P2X purinoseptör 3 (P2X3), transient receptor potential ankyrin 1 (TRPA1) ve transient receptor potential vanilloid 4 (TRPV4) gibi nosiseptif sinyallemeyle ilişkili reseptör ve iyon kanallarının inflamatuvar koşullardan etkilenebildiği gösterilmiştir (Noma ve ark., 2013; El Karim ve ark., 2015). İnflamatuvar mediyatörlerin etkileri yalnızca periferik dokularla sınırlı olmayabilir; örneğin nerve growth factor (NGF)' nin periferik orofasiyal dokulardan trigeminal gangliyon nöronlarına retrograd olarak taşınabildiği ve trigeminal nöronlardaki nosiseptif mekanizmaları etkileyebildiği bildirilmiştir (Wheeler ve ark., 1998; Shinoda ve ark., 2011).

Santral sensitizasyon, merkezi sinir sistemindeki nosiseptif nöronların normal veya eşik altındaki afferent uyarılara karşı yanıtlarının artması olarak tanımlanmaktadır (Merskey ve Bogduk, 1994; Velasco ve ark., 2024). Orofasiyal inflamasyon modellerinde trigeminal beyin sapı nosiseptif nöronlarında spontan aktivite artışı, reseptif alan genişlemesi ve mekanik uyarılara artmış yanıt gibi nöroplastik değişiklikler gösterilmiş; N-methyl-D-aspartate (NMDA) reseptörlerinin bu değişikliklerde rol oynadığı bildirilmiştir (Chiang ve ark., 1998; Park ve ark., 2001). Tekrarlayan C-lifi aktivasyonu ile trigeminal nosiseptif nöronlarda wind-up yanıtı oluşabildiği gösterilmiş (Dallel ve ark., 1999), bu yanıtta NMDA reseptör mekanizmalarının rol oynadığı bildirilmiştir (Parada ve ark., 1997). Bununla birlikte santral sensitizasyon kronik ağrıyla ilişkili olsa da kronik ağrıya özgü değildir ve mevcut kanıtlar ikisi arasında doğrudan bir nedensellik ortaya koymamaktadır (Velasco ve ark., 2024). İnflamatuvar ağrıda gelişen santral değişiklikler genellikle geri dönüşümlü olabilirken, periferik sinir hasarı daha kalıcı ve maladaptif nöroplastik değişikliklerle ilişkili olabilir (Kehlet ve ark., 2006).

5.Nöropatik ve Nosiplastik Ağrı

Nosiseptif ağrı, nöral olmayan dokularda meydana gelen veya meydana gelme riski bulunan hasarın nosiseptörleri uyarmasıyla gelişen ve organizmayı potansiyel zararlara karşı koruyan fizyolojik bir yanıt olarak değerlendirilmektedir (Mears ve Mears, 2023). Buna karşılık kronik ağrı daha karmaşık bir mekanizmaya sahip olabilir; nosiseptif, nöropatik ve nosioplastik süreçler birbirinden tamamen bağımsız olmayıp aynı klinik tabloda değişen oranlarda birlikte rol oynayabilir (Mears ve Mears, 2023; Fitzcharles ve ark., 2021).

Nöropatik ağrı, somatosensoriyel sinir sistemini etkileyen bir lezyon veya hastalık sonucunda ortaya çıkar. Sinir hasarı sonrasında gelişen ektopik nöronal aktivite, periferik ve santral sensitizasyon ile nöron-glia etkileşimleri nöropatik ağrının gelişimine ve sürdürülmesine katkıda bulunabilir (Finnerup ve ark., 2021; Chiang ve ark., 2011). Orofasiyal nöropatik ağrı durumlarından klasik trigeminal nevraljide, trigeminal sinirin vasküler kompresyonuna eşlik eden fokal demiyelinizasyonun aksonal hipereksitabilite, ektopik impuls oluşumu ve ephaptik iletme katkıda bulunabileceği bildirilmiştir (Al-Quliti, 2015; Gambeta ve ark., 2020).

Nosiplastik ağrı ise ağrıyı açıklayabilecek belirgin bir doku hasarı veya somatosensoriyel sistem lezyonu bulunmaksızın değişmiş nosiseptif işleme ile ilişkili ağrıyı ifade etmektedir (Fitzcharles ve ark., 2021; Yoo ve Kim, 2024). Alta yatan mekanizmalar tam olarak açıklığa kavuşmamış olmakla birlikte, nosiseptif işlemenin artması ve/veya inhibitör ağrı modülasyonunun azalmasının yanı sıra periferik ve santral mekanizmaların sürece katkıda bulunabileceği düşünülmektedir (Fitzcharles ve ark., 2021; Yoo ve Kim, 2024). Orofasiyal bölgede nosiplastik mekanizmaların BMS ve bazı TMD klinik tablolarına katkıda

bulunabileceği öne sürülmektedir (Pinto-Pardo ve Rodriguez-Zaninovic, 2025; Yoo ve Kim, 2024).

6. Mikrobiyota ve Ağrı İlişkisi

Kronik orofasiyal ağrının patofizyolojisi heterojen olup periferik ve santral sensitizasyon, nöroimmün mekanizmalar ve ağrı modülasyonundaki değişiklikler farklı düzeylerde sürece katkıda bulunabilir. Bu mekanizmalarla ilişkili olabilecek faktörler arasında mikrobiyota da son yıllarda araştırılmaya başlanmıştır. Oral ve bağırsak mikrobiyotasındaki değişikliklerin; immün ve inflamatuvar yanıtlar, mikrobiyal ve nöroaktif metabolitler ile epitel bariyer bütünlüğündeki değişikliklerin yanı sıra otonom ve nöroendokrin sinyalleme yolları aracılığıyla kronik ağrı mekanizmalarıyla ilişkili olabileceği bildirilmektedir (Tao ve ark., 2023; Ahmed ve ark., 2025).

Mikrobiyota, belirli bir ortamda bulunan bakteri, arke, mantar ve diğer mikroorganizmaların oluşturduğu topluluğu ifade ederken; mikrobiyom bu mikroorganizmaların yanı sıra yapısal ve işlevsel bileşenlerini ve içinde bulundukları çevresel bağlamı da kapsayan daha geniş bir kavramdır (Berg ve ark., 2020). Oral kavite, oral homeostazın sürdürülmesine katkıda bulunan kompleks ve çeşitli bir mikrobiyal topluluğa ev sahipliği yapmaktadır (Kilian ve ark., 2016; Rajasekaran ve ark., 2024). Bu mikrobiyal dengenin bozulması disbiyoz olarak tanımlanmakta ve çeşitli oral ve sistemik hastalıklarla ilişkilendirilmektedir (Thomas ve ark., 2021; Rajasekaran ve ark., 2024).

Oral ve bağırsak mikrobiyotasındaki değişikliklerin kronik ağrı durumlarıyla da ilişkili olabileceğine ilişkin bulgular bulunmaktadır (Ahmed ve ark., 2025). Periodontal hastalıklarla fibromiyalji, romatoid artrit ve lomber dejeneratif bozukluklar arasında ilişkiler bildirilmiştir (de Pablo ve ark., 2008; Ma ve ark., 2022; Chen ve ark., 2023). Orofasiyal ağrı açısından ise primer burning mouth syndrome (BMS) hastalarında tükürük mikrobiyotasında ve belirli oral mikrobiyal taksonların relatif bolluklarında sağlıklı bireylere göre farklılıklar saptanmıştır (Lee ve ark., 2022; Wu ve ark., 2024). Temporomandibular bozukluklar (TMD) kapsamında ise bazı çalışmalarda temporomandibular eklem (TMJ) sinovyal sıvısında bakteriyel deoksiribonükleik asit (DNA) varlığı bildirilmiştir (Sun ve ark., 2008; Bazsefidpay ve ark., 2026). Bununla birlikte, mevcut bulgular oral mikrobiyota ile kronik orofasiyal ağrı arasında nedensel ve mekanistik bir bağlantı kurmak için yeterli değildir. Oral dokuların duyuşal innervasyonunun büyük ölçüde trigeminal sistem tarafından sağlanması, oral mikrobiyota ve mikrobiyal ürünlerin trigeminal nosiseptif sistemle hangi yollar üzerinden etkileşebileceği sorusunu gündeme getirmektedir.

Mikrobiyota ile sinir sistemi arasındaki iletişim yolları en kapsamlı olarak bağırsak–beyin ekseninde tanımlanmış; nöral, immün, nöroendokrin ve metabolik mekanizmaların bu iletişimde rol oynayabileceği bildirilmiştir (Ahmed ve ark., 2025). Oral mikrobiyota ile trigeminal sistem arasındaki iletişim yolları ise aynı ölçüde açıklığa kavuşmamıştır. Oral mikroorganizmalar ve ürünleri, oral dokulardaki periferik sinir uçlarıyla lokal olarak etkileşebileceği gibi, lokal immün ve inflamatuvar yanıtlar aracılığıyla trigeminal afferentleri dolaylı olarak etkileyebilir. Bakteriyel ekstrasellüler veziküllerin periferik sinir uçlarından alınarak retrograd aksonal taşınmayla trigeminal gangliya ulaşabildiği deneysel olarak gösterilmiştir (Ha ve ark., 2023). Ayrıca periodontal bariyerin bozulması, oral bakterilerin ve bakteriyel ürünlerin sistemik dolaşıma geçişine olanak sağlayabilir (Hirschfeld ve Kawai, 2015). Bununla birlikte, bu yolların oral mikrobiyota–trigeminal sistem iletişimine göreceli

katkıları ve oral mikroorganizmaların veya ürünlerinin santral trigeminal yapılarla hangi yollar üzerinden etkileşebildiği henüz yeterince açıklığa kavuşmamıştır.

7.Oral Mikrobiyota ve Trigeminal Nosiseptif Mekanizmalar

7.1. Bakteriyel Ürünler ve Periferik Trigeminal Nosisepsiyon

Oral bakteriyel ürünlerin periferik trigeminal afferentlerle doğrudan etkileşebileceğine ilişkin kanıtlar bulunmaktadır. İnsan trigeminal gangliyonda bakteriyel lipopolisakkaritin (LPS) tanınmasında rol alan TLR4 (Toll-like receptor 4) ve koreseptörü CD14 (cluster of differentiation 14)'ün TRPV1 (transient receptor potential vanilloid 1) -pozitif nosiseptörlerde (kapsaisine duyarlı) eksprese edildiği; ayrıca çürükle ilişkili inflamasyon bulunan dental pulpada TLR4 ve CD14 immünoreaktivitesinin (protein ekspresyonunun göstergesi) duyu sinir liflerinde bulunduğu gösterilmiştir (Wadachi ve Hargreaves, 2006). Trigeminal nöronlarda TLR4 ile birlikte, TLR4 aracılı LPS tanınmasında rol alan myeloid differentiation factor 2 (MD2) ve CD14'ün de eksprese edilmesi, bu nöronların LPS'ye doğrudan yanıt verebilecek moleküler yapıya sahip olduğunu desteklemektedir (Kunda ve ark., 2014).

Nitekim LPS'nin trigeminal duyu nöronlarını aktive ettiği ve TLR4 aracılığıyla TRPV1 yanıtlarını sensitize ettiği gösterilmiştir (Diogenes ve ark., 2011). Bu mekanizmanın fonksiyonel önemi *in vivo* olarak da desteklenmiş; LPS'nin oral mukozaya veya doğrudan trigeminal gangliyonla uygulanmasının fasiyal termal ve mekanik hiperaljezi oluşturduğu, trigeminal gangliyonda TLR4 blokajının ise bu yanıtları azalttığı bildirilmiştir (Araya ve ark., 2020). Bu bulgular birlikte değerlendirildiğinde, bakteriyel LPS'nin trigeminal nosiseptif nöronlar tarafından TLR4 ile ilişkili mekanizmalar aracılığıyla algılanabildiğini ve bu etkileşimin periferik trigeminal nosiseptif yanıtların modülasyonuna katkıda bulunabileceğini düşündürmektedir.

Bakteriyel ürünlerin yanı sıra mikrobiyal metabolitlerin de periferik trigeminal nosisepsiyonu modüle edebildiği gösterilmiştir. *P. gingivalis* ile oluşturulan periodontitis modelinde, bakteriyel bir kısa zincirli yağ asidi metaboliti olan bütirik asidin gingival düzeyinin arttığı ve gingival dokudaki G protein-coupled receptor 41 (GPR41) aracılı sinyalleme yoluyla periodontal mekanik nosisepsiyonun baskılanmasına katkıda bulunduğu bildirilmiştir (Murakami ve ark., 2022).

7.2. Trigeminal Gangliyon (TG)' da Nöronal ve Nöroimmün Mekanizmalar

Oral inflamasyon ve bakteriyel ürünlere maruziyet, TG'de nöronal ve nöroimmün değişikliklerle de ilişkilendirilmiştir. Deneysel periodontal inflamasyonun yalnızca periferik duyu sinir terminallerini değil, trigeminal gangliyon düzeyindeki nöropeptiderjik yanıtı da etkileyebildiği gösterilmiştir. Periodontal inflamasyon sonrasında gingival duyu sinir terminallerinde calcitonin gene-related peptide (CGRP) immünoreaktivitesinde değişiklikler bildirilirken (Dumitrescu ve ark., 2004), TG'de CGRP ve substance P (SP) ekspresyonunda artış saptanmıştır (Abd El-Aleem ve ark., 2004; Gašperšič ve ark., 2008). Gašperšič ve ark. (2008), bu artışın özellikle inflame gingivayı innerve eden ipsilateral TG nöronlarında görüldüğünü; CGRP artışının daha yaygın, SP artışının ise küçük nöronlarla sınırlı olduğunu göstermiştir. Ayrıca, *P. gingivalis* LPS'sinin TG kültürlerinde CGRP (calcitonin gene-related peptide) salınımını ve inflamatuvar yanıtla ilişkili genlerin transkripsiyonunu düzenleyen NF- κ B (nuclear factor kappa B)'nin hücre çekirdeğine geçişini (nükleer translokasyon) artırdığı ve non-nöronal hücrelerde de yanıt oluşturduğu bildirilmiştir. Bununla birlikte, bu non-nöronal

hücrelerin satellite glial hücreler (SGC) olduğu spesifik hücre belirteçleriyle doğrulanmamıştır (Kaewpitak ve ark., 2020).

TG'deki glial yanıt açısından daha doğrudan kanıtlar pulpal inflamasyon modellerinden elde edilmiştir. Pulpal inflamasyon sonrasında ipsilateral TG'de GFAP (glial fibrillary acidic protein) pozitifliği gösteren SGC'lerle çevrelenen nöronların sayısının arttığı (Filippini ve ark., 2018); SGC'lerde Cx43 (connexin 43) ve IL-1 β (interleukin-1 beta), komşu nöronlarda ise IL-1RI (interleukin-1 receptor type I) ve TRPV1 ekspresyonunun yükseldiği ve Cx43 veya IL-1RI inhibisyonunun artmış nosiseptif yanıtı azalttığı gösterilmiştir (Komiya ve ark., 2018). Bu bulgular, lokal oral inflamasyonun TG'deki nöron–glia etkileşimlerini değiştirebildiğini göstermektedir.

Oral inflamasyonun trigeminal gangliyondaki nöroimmün etkilerine makrofajların da katıldığı gösterilmiştir. Pulpal inflamasyon sonrasında TG'de biriken makrofajlarda IL-1 β üretiminin arttığı; aynı zamanda dili innerve eden TG nöronlarında TLR4 ve IL-1RI ekspresyonunun yükseldiği bildirilmiştir. Makrofajların azaltılması veya TLR4'ün antagonize edilmesi dil hipersensitivitesini azaltırken, TG'ye IL-1 β uygulanması TRPV1 ekspresyonunu ve mekanik ve termal hipersensitiviteyi artırmıştır (Kanno ve ark., 2020).

TG makrofajlarının inflamasyon süresince dinamik değişiklikler gösterebildiği de bildirilmiştir. Deneysel pulpitis sırasında makrofaj polarizasyonunda zamana bağlı değişiklikler gözlenmiş; proinflamatuvar özelliklerle ilişkili M1 ve antiinflamatuvar/doku onarımıyla ilişkili M2 makrofajlar arasındaki denge değişmiş, M2/M1 oranı erken dönemde azalırken daha sonraki dönemde artmıştır (Gao ve ark., 2022). Ayrıca pulpitis sonrasında inflamasyonlu dişi değil, fasiyal deriyi innerve eden TG nöronlarının çevresinde makrofaj aktivasyonunun ve bu nöronlarda Nav1.7 (voltage-gated sodium channel 1.7) ekspresyonunun arttığı gösterilmiştir. TG makrofajlarının azaltılması hem ektopik fasiyal mekanik allodiniyi hem de Nav1.7 artışını baskılamıştır (Sunaga ve ark., 2024).

Bu bulgular, periferik oral inflamasyonun etkilerinin TG'de yalnızca ilgili primer afferent nöronlarla sınırlı kalmayabileceğini; makrofaj–nöron etkileşimlerinin inflamasyon bölgesinin dışında ortaya çıkan duyuşal değişikliklere de katkıda bulunabileceğini göstermektedir.

Pulpal inflamasyonun TG'de çeşitli nosiseptif ve inflamatuvar sinyal yollarını etkilediği de gösterilmiştir. LPS ile oluşturulan dental pulpa inflamasyonu sonrasında TG nöronlarında purinerjik P2X reseptörlerinden P2X2, P2X3 ve P2X5'in ekspresyonlarında artış bildirilmiş (Chen ve ark., 2014); deneysel pulpitis sonrasında artan P2X3 ekspresyonunun antagonize edilmesi ise allodini ve hiperalejiyle birlikte p-p38 (phosphorylated p38 mitogen-activated protein kinase), TNF- α (tumor necrosis factor alpha) ve IL-1 β artışını azaltmıştır (Chen ve ark., 2024). Ayrıca akut pulpitis modelinde TG'de TACAN/TMEM120A (transmembrane protein 120A) ekspresyonunun arttığı ve bu ekspresyonun baskılanmasının mekanik ağrı eşiğini yükselttiği gösterilmiştir (Shang ve ark., 2022). P2X purinoceptor 7 (P2X7) ile ilişkili mekanizmaların ise TG ve medüller dorsal horn'daki NLRP3 (NLR family pyrin domain containing 3)/CASP1 (caspase-1) sinyalizasyonu ve inflamatuvar ağrı ile ilişkili olduğu bildirilmiştir (Sun ve ark., 2023).

7.3. Santral Trigeminal Nosiseptif ve Nöroimmün Mekanizmalar

Oral inflamasyonla ilişkili nöroplastik ve nöroimmün değişiklikler trigeminal gangliyon ile sınırlı değildir. Deneysel pulpitis modellerinde TG'deki değişikliklere ek olarak spinal trigeminal çekirdeğin kaudal bölümü (Sp5C; medüller dorsal horn) düzeyinde nöronal aktivasyonun arttığı gösterilmiştir (Cha ve ark., 2020).

Apikal periodontitis modelinde de mekanik allodininin haftalar boyunca devam ettiği, medüller dorsal hornun lamina I ve II nöronlarında c-Fos ekspresyonunun arttığı ve NMDA reseptör antagonizmasının mekanik allodiniyi azalttığı bildirilmiştir (Mohaved ve ark., 2020).

Bununla birlikte, periodontal ve odontojenik inflamasyon modellerinde gözlenen bu santral değişiklikler, oral mikrobiyotanın trigeminal beyin sapındaki glial mekanizmaları doğrudan aktive ettiğini göstermemektedir. Orofasiyal inflamasyonda santral glial mekanizmaların rolünü destekleyen kanıtlar ise farklı deneysel modellerden elde edilmiştir.

Orofasiyal inflamasyonla ilişkili santral sensitizasyonda glial hücrelerin rol oynayabileceğine ilişkin deneysel kanıtlar bulunmaktadır. Rat dental pulpasına inflamatuvar iritan mustard oil uygulanmasıyla spinal trigeminal çekirdeğin kaudal bölümü (Sp5C; medüller dorsal horn) nosiseptif nöronlarında oluşturulan santral sensitizasyonun, p38-MAPK (p38 mitogen-activated protein kinase) inhibisyonu veya astroglial metabolik aktivitenin baskılanmasıyla azaldığı gösterilmiştir (Xie ve ark., 2007). Aynı deneysel modelde astroglial glutamat–glutamin döngüsünün inhibisyonunun santral sensitizasyonu azalttığı, glutamin uygulanmasının ise bu yanıtı yeniden ortaya çıkardığı bildirilmiştir (Chiang ve ark., 2007). Bu bulgular, astroglial mekanizmaların orofasiyal inflamasyona bağlı santral sensitizasyonun gelişimine katkıda bulunabileceğini göstermektedir.

Mikroglial mekanizmaların katkısı da aynı modelde gösterilmiştir. Sp5C'de P2X7 reseptörlerinin antagonize edilmesi mustard oil ile oluşturulan santral sensitizasyonu azaltırken, P2X7 reseptör aktivasyonunun santral sensitizasyon benzeri nöronal yanıtlar oluşturduğu ve mikroglial aktivitenin farmakolojik olarak baskılanmasının santral sensitizasyonu ortadan kaldırdığı bildirilmiştir (Itoh ve ark., 2011).

7.4.Oral Mikrobiyota ve Santral Nöroinflamasyon

Periodontal hastalığın santral nöroimmün yanıtlarla ilişkili olabileceğine yönelik deneysel bulgular bulunmaktadır. Ligatürle oluşturulan deneysel periodontitis sonrasında fare beyninden izole edilen mikroglial hücrelerde aktivasyon artışı gösterilmiş; ayrıca periodontitisle ilişkili ligatürlerden elde edilen mikrobiyotanın *in vitro* olarak mikroglial hücrelerde TNF- α , IL-1 β ve IL-6 (interleukin-6) ekspresyonunu artırdığı bildirilmiştir. Bu yanıtı TLR2 (Toll-like receptor 2) ve TLR9 (Toll-like receptor 9) ekspresyonundaki artış eşlik ederken, TLR4 ekspresyonunda değişiklik saptanmamıştır (Almarhoumi ve ark., 2023).

Bununla birlikte, bu çalışmada mikroglial aktivasyon trigeminal beyin sapı çekirdeklerine özgü olarak değerlendirilmemiştir. Dolayısıyla periodontitisle ilişkili mikrobiyotanın trigeminal santral nosiseptif yollarda mikroglial aktivasyona yol açtığı sonucuna doğrudan varılamaz (Almarhoumi ve ark., 2023).

Oral bakterilerin santral sinir sistemiyle ilişkisinin bir diğer olası boyutu, bakterilerin veya bakteriyel ürünlerin santral dokulara ulaşmasıdır. *P. gingivalis* ile oluşturulan deneysel periodontitis modelinde bakterinin beyin dokusunda saptandığı, kan-beyin bariyeri

geçirgenliğinin arttığı ve sıkı bağlantı proteinleri ZO-1 (zonula occludens-1) ile occludin düzeylerinin azaldığı gösterilmiştir (Jiang ve ark., 2025). Bununla birlikte, *P. gingivalis*'in oral bölgeden beyne hangi anatomik yol üzerinden ulaştığı bu çalışmada belirlenmemiştir.

7.5. Oral–Gut Ekseni, Nöroendokrin Etkileşimler ve Orofasiyal Nosisepsiyon

Oral mikrobiyotadaki değişikliklerin etkileri oral kaviteyle sınırlı kalmayabilir ve gastrointestinal mikrobiyota ile etkileşim gösterebilir. Deneysel periodontitis sırasında oral kavitede artan *Klebsiella* ve *Enterobacter* türlerinin, intestinal kolonizasyon direncinin bozulduğu koşullarda gastrointestinal sisteme geçerek ektopik kolonizasyon gösterebildiği ve intestinal inflamasyonun artmasına katkıda bulunduğu gösterilmiştir (Kitamoto ve ark., 2020). Benzer şekilde, şiddetli periodontitisli bireylerden elde edilen tükürük mikrobiyotasının farelere aktarılması, bağırsak mikrobiyota kompozisyonunda değişiklik, kolonik ZO-1 ekspresyonunda azalma ve proinflamatuvar faktörlerin ekspresyonunda artışla ilişkilendirilmiştir (Bao ve ark., 2022). Bu bulgular, oral mikrobiyal değişikliklerin belirli koşullarda intestinal mikrobiyota ve bağırsak bariyer bütünlüğünü etkileyebileceğini göstermektedir.

Oral–gut eksenindeki bu değişikliklerin ağrı açısından olası önemi; bağırsak bariyer disfonksiyonu, sistemik inflamatuvar sinyalleme ve nöroinflamasyon gibi süreçlerin periferik ve santral sensitizasyonla ilişkili mekanizmaları etkileyebilme potansiyeline dayanmaktadır (Ahmed ve ark., 2025). Bununla birlikte, mevcut çalışmalar oral mikrobiyotadaki değişikliklerin bağırsak mikrobiyotası aracılığıyla trigeminal nosiseptif sistemi etkileyerek kronik orofasiyal ağrı oluşturduğunu doğrudan göstermemektedir.

Oral mikrobiyota ile konak arasındaki etkileşimde nöroendokrin mekanizmaların da rol oynayabileceği öne sürülmektedir. Hipotalamus–hipofiz–adrenal (HPA) eksenini stres yanıtının temel düzenleyicilerinden biri olup, stres sırasında salgılanan kortizol ve adrenalın gibi hormonların oral bakterilerin büyüme ve virülans özelliklerini etkileyebileceği bildirilmiştir. Buna karşılık, oral mikrobiyota çeşitliliğinin strese bağlı kortizol yanıtıyla ilişkili olabileceğine ilişkin bulgular, oral mikrobiyota ile HPA eksenini arasında çift yönlü bir etkileşim olasılığını düşündürmektedir. Bununla birlikte, oral mikrobiyotanın HPA eksenini hangi mekanizmalarla etkilediği henüz tam olarak açıklığa kavuşmamıştır (Zhang ve ark., 2025).

Trigeminal sinir hasarına eşlik eden bağırsak metabolik ve bariyer değişikliklerine yönelik deneysel bulgular da bulunmaktadır. Satti ve ark. (2025), iki farklı trigeminal nevralji modelinde gelişen orofasiyal ağrıya fekal kısa zincirli yağ asidi (short-chain fatty acids; SCFA) düzeylerinde model ve cinsiyete göre değişen azalmaların ve kolonik occludin ekspresyonundaki azalmanın eşlik ettiğini bildirmiştir. Aynı modellerde trigeminal ganglion ve spinal trigeminal çekirdeğin kaudal bölümü (Sp5C) düzeyinde CGRP ekspresyonunda artış saptanmıştır (Satti ve ark., 2025).

8.Oral Mikrobiyota ve Kronik Orofasiyal Ağrıda Klinik Kanıtlar

8.1.Yanan Ağız Sendromu (Burning Mouth Syndrome)

Burning mouth syndrome (BMS) ile oral mikrobiyota arasındaki ilişkiyi inceleyen klinik çalışmalar, BMS hastalarında sağlıklı bireylere kıyasla oral mikrobiyota profilinde farklılıklar bulunabileceğini göstermektedir. Tükürük ve dil dorsumu örneklerinin değerlendirildiği çalışmalarda mikrobiyal topluluk yapısı ve belirli bakteriyel taksonların

göreceli bolluklarında farklılıklar bildirilmiş; bazı taksonların ağrı şiddetiyle ilişkili olabileceği ileri sürülmüştür (Lee ve ark., 2022; Wu ve ark., 2024; Ju ve ark., 2025). Bununla birlikte, mikrobiyal çeşitlilik ve farklılaşan taksonlar açısından çalışmaların sonuçları tamamen tutarlı değildir.

Mikrobiyota ile birlikte metabolik ve konak faktörlerini değerlendiren daha yeni çalışmalar da BMS’de bazı farklılıklar bildirmiştir. Anksiyete veya depresyon semptomlarının eşlik ettiği BMS hastalarında oral mikrobiyota ve tükürük metabolit profillerinde değişiklikler saptanmış ve farklılaşan bakteriyel cinslerle bazı metabolitler arasında korelasyonlar gösterilmiştir (Luo ve ark., 2024). Diğer çalışmalarda mikrobiyal değişikliklerle birlikte tükürük kortizolü, α -amilaz ve IL-6 gibi konak belirteçlerinde (Zhang Xve ark., 2025) ve tükürük proteomik profilinde farklılıklar bildirilmiştir (Cui ve ark., 2026). Bununla birlikte, mevcut çalışmalar büyük ölçüde gözlemsel nitelikte olup, oral mikrobiyota değişikliklerinin BMS’nin nedeni mi yoksa hastalıkla ilişkili ikincil bir bulgu mu olduğu henüz belirlenememiştir.

8.2.Temporomandibular Bozukluklar

TMD ile mikrobiyota arasındaki klinik kanıtlar BMS’ye göre daha sınırlıdır ve mevcut çalışmalar oral mikrobiyota kompozisyonundan çok temporomandibular eklem (TMJ) sinovyal sıvısındaki bakteriyel varlığı değerlendirmiştir. Sun ve ark. (2008), TMD hastalarının %67,86’sında sinovyal sıvıda bakteriyel DNA saptarken kontrol örneklerinde bakteriyel DNA belirlememiş; ancak bakteriyel varlık ile TMJ ağrısı veya görüntüleme bulguları arasında anlamlı ilişki göstermemiştir. Daha yakın tarihli bir çalışmada da TMD hastalarının %64’ünde sinovyal sıvıda bakteriyel DNA saptanmış, ancak kontrol grubunun bulunmaması ve olası kontaminasyon kaynakları nedeniyle bulguların dikkatle yorumlanması gerektiği belirtilmiştir (Bazsefidpay ve ark., 2026).

TMD ile bağırsak mikrobiyotası arasındaki olası ilişkiye yönelik deneysel ve genetik bulgular da bulunmaktadır. Deneysel TMJ inflamasyonunda bağırsaktaki Bacteroidetes ve Lachnospiraceae düzeyleri ile kısa zincirli yağ asitlerinde azalmaya, kan-beyin bariyeri geçirgenliğinde artış, Sp5C’de mikrogial aktivasyon ve TNF- α ekspresyonunda artışın eşlik ettiği bildirilmiştir (Ma ve ark., 2020). Mendelian randomizasyon çalışmalarında ise bazı bağırsak mikrobiyota taksonları ile TMD arasında olası nedensel ilişkiler bildirilmekle birlikte, çalışmaların sonuçları tamamen örtüşmemektedir (Zhao ve ark., 2024; Ni ve ark., 2025).

8.3.Diğer Kronik Orofasiyal Ağrılar

BMS ve TMD dışındaki kronik orofasiyal ağrı durumlarında oral mikrobiyota ile ağrı arasındaki doğrudan klinik kanıtlar oldukça sınırlıdır. Trigeminal nevralji, post-travmatik trigeminal nöropatik ağrı, persistent idiopathic facial pain ve persistent idiopathic dentoalveolar pain gibi durumlarda oral mikrobiyota kompozisyonu ile ağrı özelliklerini birlikte değerlendiren klinik veriler yetersizdir. Trigeminal nevralji ile bağırsak mikrobiyotası arasındaki ilişkiyi değerlendiren Mendelian randomizasyon çalışmaları bulunmakla birlikte, bunlar oral mikrobiyotayı incelememektedir.

9.Sonuç

Deneysel çalışmalardan elde edilen veriler, oral mikroorganizmalar ve mikrobiyal ürünlerin trigeminal nosiseptif sistemin farklı basamaklarını etkileyebileceğine işaret etmektedir. Bakteriyel ürünlerin periferik trigeminal afferentler tarafından doğrudan algılanabildiği, oral dokulardaki inflamasyonun trigeminal gangliyonda nöronal ve nöroimmün yanıtlarla ilişkili olduğu gösterilmiştir. Ayrıca orofasiyal inflamasyon modellerinde santral trigeminal yapılarda nöronal ve glial değişikliklerin ortaya çıkabildiği bildirilmektedir. Oral mikrobiyal değişikliklerin intestinal mikrobiyota ve bağırsak bariyeriyle ilişkisini gösteren bulgular ile trigeminal ağrı modellerinde gözlenen bağırsak kaynaklı metabolik ve bariyer değişiklikleri, oral-gut ekseninin orofasiyal ağrı bağlamında araştırılması gereken olası mekanizmalardan biri olduğunu düşündürmektedir.

Bununla birlikte, mevcut kanıtlar oral disbiyoz ile kronik orofasiyal ağrı arasında kesintisiz ve doğrudan bir mekanistik ilişki kurmak için yeterli değildir. Klinik araştırmalar BMS’de oral mikrobiyota profilinde farklılıklar bulunduğunu göstermekle birlikte, mikrobiyal çeşitlilik ve farklılaşan taksonlar bakımından sonuçlar çalışmalar arasında tutarlılık göstermemektedir. TMD konusunda klinik veriler daha çok TMJ sinovyal sıvısında bakteriyel DNA varlığına dayanırken, diğer kronik orofasiyal ağrı tablolarında oral mikrobiyotayı doğrudan değerlendiren kanıtlar oldukça sınırlıdır. Ayrıca mevcut deneysel çalışmaların önemli bir bölümü oral inflamasyon veya trigeminal ağrı modellerine dayanmakta olup, bu bulguların oral mikrobiyota ile kronik orofasiyal ağrı arasında doğrudan bir nedensellik gösterdiği şeklinde yorumlanmaması gerekir.

Gelecekte oral mikrobiyota özellikleri ile ağrı fenotiplerinin birlikte ve uzunlamasına değerlendirildiği klinik çalışmalara ihtiyaç vardır. Mikrobiyal kompozisyonun yanı sıra mikrobiyal ürün ve metabolitlerin trigeminal nosiseptif ve nöroimmün süreçlerle ilişkisinin doğrudan araştırılması, oral mikrobiyota değişikliklerinin kronik orofasiyal ağrının nedeni mi, sonucu mu yoksa ağrının sürdürülmesine katkıda bulunan faktörlerden biri mi olduğunun anlaşılmasına yardımcı olabilir.

Kaynakça

- Melzack, R., & Wall, P. D. (1965). Pain mechanisms: a new theory. *Science (New York, N.Y.)*, 150(3699), 971–979. doi.org/10.1126/science.150.3699.971
- Sullivan, M. D., Sturgeon, J. A., Lumley, M. A., & Ballantyne, J. C. (2023). Reconsidering Fordyce's classic article, "Pain and suffering: what is the unit?" to help make our model of chronic pain truly biopsychosocial. *Pain*, 164(2), 271–279. doi.org/10.1097/j.pain.0000000000002748
- Sessle B. J. (2023). Fifty years of development of neuroscientific insights into oro-facial pain and its control. *Journal of oral rehabilitation*, 50(9), 860–876. doi.org/10.1111/joor.13523
- International Classification of Orofacial Pain, 1st edition (ICOP). (2020). *Cephalalgia : an international journal of headache*, 40(2), 129–221. doi.org/10.1177/0333102419893823
- Ananthan, S., & Benoliel, R. (2020). Chronic orofacial pain. *Journal of neural transmission (Vienna, Austria : 1996)*, 127(4), 575–588. doi.org/10.1007/s00702-020-02157-3
- Macfarlane, T. V., Blinkhorn, A. S., Davies, R. M., Kincey, J., & Worthington, H. V. (2002). Oro-facial pain in the community: prevalence and associated impact. *Community dentistry and oral epidemiology*, 30(1), 52–60. doi.org/10.1034/j.1600-0528.2002.300108.x
- McMillan, A. S., Wong, M. C., Zheng, J., & Lam, C. L. (2006). Prevalence of orofacial pain and treatment seeking in Hong Kong Chinese. *Journal of orofacial pain*, 20(3), 218–225.
- Headache Classification Committee of the International Headache Society (IHS) The International Classification of Headache Disorders, 3rd edition. (2018). *Cephalalgia : an international journal of headache*, 38(1), 1–211. doi.org/10.1177/0333102417738202
- Benoliel, R., Kahn, J., & Eliav, E. (2012). Peripheral painful traumatic trigeminal neuropathies. *Oral diseases*, 18(4), 317–332. doi.org/10.1111/j.1601-0825.2011.01883.x
- Lee, B. M., Park, J. W., Jo, J. H., Oh, B., & Chung, G. (2022). Comparative analysis of the oral microbiome of burning mouth syndrome patients. *Journal of oral microbiology*, 14(1), 2052632. doi.org/10.1080/20002297.2022.2052632
- Kim, H. K., Chung, K. M., Xing, J., Kim, H. Y., & Youn, D. H. (2024). The Trigeminal Sensory System and Orofacial Pain. *International journal of molecular sciences*, 25(20), 11306. doi.org/10.3390/ijms252011306
- Luo, Y., Suttle, A., Zhang, Q., Wang, P., & Chen, Y. (2021). Transient Receptor Potential (TRP) Ion Channels in Orofacial Pain. *Molecular neurobiology*, 58(6), 2836–2850. doi.org/10.1007/s12035-021-02284-2
- Gold, M. S., & Gebhart, G. F. (2010). Nociceptor sensitization in pain pathogenesis. *Nature medicine*, 16(11), 1248–1257. doi.org/10.1038/nm.2235

- Gambeta, E., Chichorro, J. G., & Zamponi, G. W. (2020). Trigeminal neuralgia: An overview from pathophysiology to pharmacological treatments. *Molecular pain*, 16, 1744806920901890. doi.org/10.1177/1744806920901890
- Schumacher M. A. (2024). Peripheral Neuroinflammation and Pain: How Acute Pain Becomes Chronic. *Current neuropharmacology*, 22(1), 6–14. doi.org/10.2174/1570159X21666230808111908
- Noma, N., Shinoda, M., Honda, K., Kiyomoto, M., Dezawa, K., Nakaya, Y., Komiyama, O., Imamura, Y., & Iwata, K. (2013). Interaction of IL-1 β and P2X(3) receptor in pathologic masseter muscle pain. *Journal of dental research*, 92(5), 456–460. doi.org/10.1177/0022034513483770
- El Karim, I., McCrudden, M. T., Linden, G. J., Abdullah, H., Curtis, T. M., McGahon, M., About, I., Irwin, C., & Lundy, F. T. (2015). TNF- α -induced p38MAPK activation regulates TRPA1 and TRPV4 activity in odontoblast-like cells. *The American journal of pathology*, 185(11), 2994–3002. doi.org/10.1016/j.ajpath.2015.07.020
- Wheeler, E. F., Naftel, J. P., Pan, M., von Bartheld, C. S., & Byers, M. R. (1998). Neurotrophin receptor expression is induced in a subpopulation of trigeminal neurons that label by retrograde transport of NGF or fluoro-gold following tooth injury. *Brain research. Molecular brain research*, 61(1-2), 23–38. doi.org/10.1016/s0169-328x(98)00179-x
- Shinoda, M., Asano, M., Omagari, D., Honda, K., Hitomi, S., Katagiri, A., & Iwata, K. (2011). Nerve growth factor contribution via transient receptor potential vanilloid 1 to ectopic orofacial pain. *The Journal of neuroscience : the official journal of the Society for Neuroscience*, 31(19), 7145–7155. doi.org/10.1523/JNEUROSCI.0481-11.2011
- Merskey, H., & Bogduk, N. (Eds.). (1994). Classification of chronic pain: Descriptions of chronic pain syndromes and definitions of pain terms (2nd ed.). Seattle, WA: IASP Press.
- Velasco, E., Flores-Cortés, M., Guerra-Armas, J., Flix-Díez, L., Gurdíel-Álvarez, F., Donado-Bermejo, A., van den Broeke, E. N., Pérez-Cervera, L., & Delicado-Miralles, M. (2024). Is chronic pain caused by central sensitization? A review and critical point of view. *Neuroscience and biobehavioral reviews*, 167, 105886. doi.org/10.1016/j.neubiorev.2024.105886
- Chiang, C. Y., Park, S. J., Kwan, C. L., Hu, J. W., & Sessle, B. J. (1998). NMDA receptor mechanisms contribute to neuroplasticity induced in caudalis nociceptive neurons by tooth pulp stimulation. *Journal of neurophysiology*, 80(5), 2621–2631. doi.org/10.1152/jn.1998.80.5.2621
- Park, S. J., Chiang, C. Y., Hu, J. W., & Sessle, B. J. (2001). Neuroplasticity induced by tooth pulp stimulation in trigeminal subnucleus oralis involves NMDA receptor mechanisms. *Journal of neurophysiology*, 85(5), 1836–1846. doi.org/10.1152/jn.2001.85.5.1836
- Dallel, R., Duale, C., Luccarini, P., & Molat, J. L. (1999). Stimulus-function, wind-up and modulation by diffuse noxious inhibitory controls of responses of convergent neurons

- of the spinal trigeminal nucleus oralis. *The European journal of neuroscience*, 11(1), 31–40. doi.org/10.1046/j.1460-9568.1999.00404.x
- Parada, C. A., Luccarini, P., & Woda, A. (1997). Effect of an NMDA receptor antagonist on the wind-up of neurons in the trigeminal oralis subnucleus. *Brain research*, 761(2), 313–320. doi.org/10.1016/s0006-8993(97)00355-7
- Kehlet, H., Jensen, T. S., & Woolf, C. J. (2006). Persistent postsurgical pain: risk factors and prevention. *Lancet* (London, England), 367(9522), 1618–1625. doi.org/10.1016/S0140-6736(06)68700-X
- Mears, L., & Mears, J. (2023). The pathophysiology, assessment, and management of acute pain. *British journal of nursing (Mark Allen Publishing)*, 32(2), 58–65. doi.org/10.12968/bjon.2023.32.2.58
- Fitzcharles, M. A., Cohen, S. P., Clauw, D. J., Littlejohn, G., Usui, C., & Häuser, W. (2021). Nociplastic pain: towards an understanding of prevalent pain conditions. *Lancet (London, England)*, 397(10289), 2098–2110. doi.org/10.1016/S0140-6736(21)00392-5
- Finnerup, N. B., Kuner, R., & Jensen, T. S. (2021). Neuropathic Pain: From Mechanisms to Treatment. *Physiological reviews*, 101(1), 259–301. doi.org/10.1152/physrev.00045.2019
- Chiang, C. Y., Dostrovsky, J. O., Iwata, K., & Sessle, B. J. (2011). Role of glia in orofacial pain. *The Neuroscientist : a review journal bringing neurobiology, neurology and psychiatry*, 17(3), 303–320. doi.org/10.1177/1073858410386801
- Al-Quliti K. W. (2015). Update on neuropathic pain treatment for trigeminal neuralgia. The pharmacological and surgical options. *Neurosciences (Riyadh, Saudi Arabia)*, 20(2), 107–114. doi.org/10.17712/nsj.2015.2.20140501
- Yoo, Y. M., & Kim, K. H. (2024). Current understanding of nociplastic pain. *The Korean journal of pain*, 37(2), 107–118. doi.org/10.3344/kjp.23326
- Pinto-Pardo, N., & Rodriguez-Zaninovic, M. P. (2025). Redefining burning mouth syndrome: A nociplastic pain disorder?. *Journal of dental sciences*, 20(2), 1382–1383. doi.org/10.1016/j.jds.2024.11.017
- Tao, R., Liu, S., Crawford, J., & Tao, F. (2023). Gut-Brain Crosstalk and the Central Mechanisms of Orofacial Pain. *Brain sciences*, 13(10), 1456. doi.org/10.3390/brainsci13101456
- Ahmed, I., Nijs, J., Vanroose, M., Vandeputte, D., Kindt, S., Elma, Ö., Hendrix, J., Huysmans, E., & Lahousse, A. (2025). Oral and Gut Health, (Neuro) Inflammation, and Central Sensitization in Chronic Pain: A Narrative Review of Mechanisms, Treatment Opportunities, and Research Agenda. *International journal of molecular sciences*, 27(1), 114. doi.org/10.3390/ijms27010114
- Berg, G., Rybakova, D., Fischer, D., Cernava, T., Vergès, M. C., Charles, T., Chen, X., Cocolin, L., Eversole, K., Corral, G. H., Kazou, M., Kinkel, L., Lange, L., Lima, N., Loy, A., Macklin, J. A., Maguin, E., Mauchline, T., McClure, R., Mitter, B., ... Schlöter, M.

- (2020). Microbiome definition re-visited: old concepts and new challenges. *Microbiome*, 8(1), 103. doi.org/10.1186/s40168-020-00875-0
- Kilian, M., Chapple, I. L., Hannig, M., Marsh, P. D., Meuric, V., Pedersen, A. M., Tonetti, M. S., Wade, W. G., & Zaura, E. (2016). The oral microbiome - an update for oral healthcare professionals. *British dental journal*, 221(10), 657–666. doi.org/10.1038/sj.bdj.2016.865
- Rajasekaran, J. J., Krishnamurthy, H. K., Bosco, J., Jayaraman, V., Krishna, K., Wang, T., & Bei, K. (2024). Oral Microbiome: A Review of Its Impact on Oral and Systemic Health. *Microorganisms*, 12(9), 1797. doi.org/10.3390/microorganisms12091797
- Thomas, C., Minty, M., Vinel, A., Canceill, T., Loubières, P., Burcelin, R., Kaddech, M., Blasco-Baque, V., & Laurencin-Dalicieux, S. (2021). Oral Microbiota: A Major Player in the Diagnosis of Systemic Diseases. *Diagnostics (Basel, Switzerland)*, 11(8), 1376. doi.org/10.3390/diagnostics11081376
- de Pablo, P., Dietrich, T., & McAlindon, T. E. (2008). Association of periodontal disease and tooth loss with rheumatoid arthritis in the US population. *The Journal of rheumatology*, 35(1), 70–76.
- Ma, K. S., Lai, J. N., Veeravalli, J. J., Chiu, L. T., Van Dyke, T. E., & Wei, J. C. (2022). Fibromyalgia and periodontitis: Bidirectional associations in population-based 15-year retrospective cohorts. *Journal of periodontology*, 93(6), 877–887. doi.org/10.1002/JPER.21-0256
- Chen, X., Xue, D., Zhao, Y., Cui, P., Wang, P., Wang, Y., & Lu, S. B. (2023). Association between periodontitis and disc structural failure in older adults with lumbar degenerative disorders: A prospective cohort study. *BMC surgery*, 23(1), 57. doi.org/10.1186/s12893-023-01950-7
- Sun, W., Dong, L., Kaneyama, K., Takegami, T., & Segami, N. (2008). Bacterial diversity in synovial fluids of patients with TMD determined by cloning and sequencing analysis of the 16S ribosomal RNA gene. *Oral surgery, oral medicine, oral pathology, oral radiology, and endodontics*, 105(5), 566–571. doi.org/10.1016/j.tripleo.2007.08.015
- Bazsefidpay, N., Ulmner, M., Damdimopoulos, A., & Lund, B. (2026). Presence of bacterial DNA in synovial fluid from the temporomandibular joint in patients with temporomandibular joint disorders. *Frontiers in oral health*, 7, 1764272. doi.org/10.3389/froh.2026.1764272
- Ha, J. Y., Seok, J., Kim, S. J., Jung, H. J., Ryu, K. Y., Nakamura, M., Jang, I. S., Hong, S. H., Lee, Y., & Lee, H. J. (2023). Periodontitis promotes bacterial extracellular vesicle-induced neuroinflammation in the brain and trigeminal ganglion. *PLoS pathogens*, 19(10), e1011743. doi.org/10.1371/journal.ppat.1011743
- Hirschfeld, J., & Kawai, T. (2015). Oral inflammation and bacteremia: implications for chronic and acute systemic diseases involving major organs. *Cardiovascular & hematological disorders drug targets*, 15(1), 70–84. doi.org/10.2174/1871529x15666150108115241

- Wadachi, R., & Hargreaves, K. M. (2006). Trigeminal nociceptors express TLR-4 and CD14: a mechanism for pain due to infection. *Journal of dental research*, 85(1), 49–53. doi.org/10.1177/154405910608500108
- Kunda, P. E., Cavicchia, J. C., & Acosta, C. G. (2014). Lipopolysaccharides and trophic factors regulate the LPS receptor complex in nodose and trigeminal neurons. *Neuroscience*, 280, 60–72. doi.org/10.1016/j.neuroscience.2014.08.053
- Diogenes, A., Ferraz, C. C., Akopian, A. N., Henry, M. A., & Hargreaves, K. M. (2011). LPS sensitizes TRPV1 via activation of TLR4 in trigeminal sensory neurons. *Journal of dental research*, 90(6), 759–764. doi.org/10.1177/0022034511400225
- Araya, E. I., Barroso, A. R., Turnes, J. M., Radulski, D. R., Jaganaught, J. A., Zampronio, A. R., & Chichorro, J. G. (2020). Toll-like receptor 4 (TLR4) signaling in the trigeminal ganglion mediates facial mechanical and thermal hyperalgesia in rats. *Physiology & behavior*, 226, 113127. doi.org/10.1016/j.physbeh.2020.113127
- Murakami, N., Yoshikawa, K., Tsukada, K., Kamio, N., Hayashi, Y., Hitomi, S., Kimura, Y., Shibuta, I., Osada, A., Sato, S., Iwata, K., & Shinoda, M. (2022). Butyric acid modulates periodontal nociception in Porphyromonas gingivalis-induced periodontitis. *Journal of oral science*, 64(1), 91–94. doi.org/10.2334/josnuds.21-0483
- Dumitrescu, A. L., Abd-El-Aleem, S., Morales-Aza, B., & Donaldson, L. F. (2004). A model of periodontitis in the rat: effect of lipopolysaccharide on bone resorption, osteoclast activity, and local peptidergic innervation. *Journal of clinical periodontology*, 31(8), 596–603. https://doi.org/10.1111/j.1600-051X.2004.00528.x
- Abd El-Aleem, S. A., Morales-Aza, B. M., & Donaldson, L. F. (2004). Sensory neuropeptide mRNA up-regulation is bilateral in periodontitis in the rat: a possible neurogenic component to symmetrical periodontal disease. *The European journal of neuroscience*, 19(3), 650–658. doi.org/10.1111/j.1460-9568.2004.03179.x
- Gaspersic, R., Kovacic, U., Cör, A., & Skaleric, U. (2008). Unilateral ligature-induced periodontitis influences the expression of neuropeptides in the ipsilateral and contralateral trigeminal ganglion in rats. *Archives of oral biology*, 53(7), 659–665. doi.org/10.1016/j.archoralbio.2008.01.017
- Kaewpitak, A., Bauer, C. S., Seward, E. P., Boissonade, F. M., & Douglas, C. W. I. (2020). Porphyromonas gingivalis lipopolysaccharide rapidly activates trigeminal sensory neurons and may contribute to pulpal pain. *International endodontic journal*, 53(6), 846–858. doi.org/10.1111/iej.13282
- Filippini, H. F., Scalzilli, P. A., Costa, K. M., Freitas, R. D. S., & Campos, M. M. (2018). Activation of trigeminal ganglion satellite glial cells in CFA-induced tooth pulp pain in rats. *PloS one*, 13(11), e0207411. doi.org/10.1371/journal.pone.0207411
- Komiya, H., Shimizu, K., Noma, N., Tsuboi, Y., Honda, K., Kanno, K., Ohara, K., Shinoda, M., Ogiso, B., & Iwata, K. (2018). Role of Neuron-Glial Interaction Mediated by IL-1 β in Ectopic Tooth Pain. *Journal of dental research*, 97(4), 467–475. doi.org/10.1177/0022034517741253

- Kanno, K., Shimizu, K., Shinoda, M., Hayashi, M., Takeichi, O., & Iwata, K. (2020). Role of macrophage-mediated Toll-like receptor 4-interleukin-1R signaling in ectopic tongue pain associated with tooth pulp inflammation. *Journal of neuroinflammation*, 17(1), 312. doi.org/10.1186/s12974-020-01995-y
- Gao, L., Fan, F., Wang, L., Tang, B., Wen, Z., Tang, J., Dai, T., & Jin, H. (2022). Polarization of macrophages in the trigeminal ganglion of rats with pulpitis. *Journal of oral rehabilitation*, 49(2), 228–236. doi.org/10.1111/joor.13245
- Sunaga, M., Tsuboi, Y., Kaizu, A., & Shinoda, M. (2024). Role of macrophages in trigeminal ganglia in ectopic orofacial pain associated with pulpitis. *Journal of oral biosciences*, 66(1), 145–150. doi.org/10.1016/j.job.2024.02.001
- Chen, Y., Zhang, L., Yang, J., Zhang, L., & Chen, Z. (2014). LPS-induced dental pulp inflammation increases expression of ionotropic purinergic receptors in rat trigeminal ganglion. *Neuroreport*, 25(13), 991–997. doi.org/10.1097/WNR.0000000000000193
- Chen, Y., Hu, J., Qi, F., Kang, Y., Zhang, T., & Wang, L. (2024). Acute pulpitis promotes purinergic signaling to induce pain in rats via P38MAPK/NF-κB signaling pathway. *Molecular pain*, 20, 17448069241234451. doi.org/10.1177/17448069241234451
- Shang, Y., Li, Y., Yang, Z., & Zhou, Z. (2022). Upregulation of TACAN in the trigeminal ganglion affects pain transduction in acute pulpitis. *Archives of oral biology*, 143, 105530. doi.org/10.1016/j.archoralbio.2022.105530
- Sun, S., Jiang, W., Yan, X., Zhang, J., Gao, L., Wu, C., Zhu, B., & Wu, L. (2023). Ligand-gated ion channel P2X7 regulates NLRP3/Caspase-1-mediated inflammatory pain caused by pulpitis in the trigeminal ganglion and medullary dorsal horn. *Brain research bulletin*, 192, 1–10. doi.org/10.1016/j.brainresbull.2022.10.020
- Cha, M., Sallem, I., Jang, H. W., & Jung, I. Y. (2020). Role of transient receptor potential vanilloid type 1 in the trigeminal ganglion and brain stem following dental pulp inflammation. *International endodontic journal*, 53(1), 62–71. doi.org/10.1111/iej.13204
- Mohaved, S. B., Shilpa, G., Li, Q., Austah, O., Bendele, M., Brock, R., & Ruparel, N. B. (2020). Apical periodontitis-induced mechanical allodynia: A mouse model to study infection-induced chronic pain conditions. *Molecular pain*, 16, 1744806919900725. doi.org/10.1177/1744806919900725
- Xie, Y. F., Zhang, S., Chiang, C. Y., Hu, J. W., Dostrovsky, J. O., & Sessle, B. J. (2007). Involvement of glia in central sensitization in trigeminal subnucleus caudalis (medullary dorsal horn). *Brain, behavior, and immunity*, 21(5), 634–641. doi.org/10.1016/j.bbi.2006.07.008
- Chiang, C. Y., Wang, J., Xie, Y. F., Zhang, S., Hu, J. W., Dostrovsky, J. O., & Sessle, B. J. (2007). Astroglial glutamate-glutamine shuttle is involved in central sensitization of nociceptive neurons in rat medullary dorsal horn. *The Journal of neuroscience : the official journal of the Society for Neuroscience*, 27(34), 9068–9076. doi.org/10.1523/JNEUROSCI.2260-07.2007

- Itoh, K., Chiang, C. Y., Li, Z., Lee, J. C., Dostrovsky, J. O., & Sessle, B. J. (2011). Central sensitization of nociceptive neurons in rat medullary dorsal horn involves purinergic P2X7 receptors. *Neuroscience*, 192, 721–731. doi.org/10.1016/j.neuroscience.2011.06.083
- Almarhoumi, R., Alvarez, C., Harris, T., Tognoni, C. M., Paster, B. J., Carreras, I., Dedeoglu, A., & Kantarci, A. (2023). Microglial cell response to experimental periodontal disease. *Journal of neuroinflammation*, 20(1), 142. doi.org/10.1186/s12974-023-02821-x
- Jiang, Y., Xu, L., Zhao, X., Shen, H., Qiu, C., He, Z., Song, Z., & Zhou, W. (2025). *Porphyromonas gingivalis*-induced periodontitis promotes neuroinflammation and neuronal loss associated with dysfunction of the brain barrier. *Frontiers in cellular and infection microbiology*, 15, 1559182. doi.org/10.3389/fcimb.2025.1559182
- Kitamoto, S., Nagao-Kitamoto, H., Hein, R., Schmidt, T. M., & Kamada, N. (2020). The Bacterial Connection between the Oral Cavity and the Gut Diseases. *Journal of dental research*, 99(9), 1021–1029. doi.org/10.1177/0022034520924633
- Bao, J., Li, L., Zhang, Y., Wang, M., Chen, F., Ge, S., Chen, B., & Yan, F. (2022). Periodontitis may induce gut microbiota dysbiosis via salivary microbiota. *International journal of oral science*, 14(1), 32. doi.org/10.1038/s41368-022-00183-3
- Zhang, X., Zhong, M., Li, Y., Wang, H., Xi, G., Wang, F., Cheng, C., & Shi, Y. (2025). Oral microbiota and central nervous system diseases: A review. *Neuroprotection (Chichester, England)*, 3(1), 79–94. doi.org/10.1002/nep3.75
- Satti, S., Ramteke, S., Chaganti, S., Padhy, H. P., Samanthula, G., & Dandekar, M. P. (2025). Clinically relevant infraorbital nerve deflation and chronic constriction injury models of trigeminal neuralgia display unifying mechanisms. *Neurochemistry international*, 190, 106052. doi.org/10.1016/j.neuint.2025.106052
- Wu, S., Li, L., Wang, X., & Yan, Z. (2024). Saliva and tongue microbiota in burning mouth syndrome: An exploratory study of potential roles. *Oral diseases*, 30(8), 5370–5378. doi.org/10.1111/odi.14934
- Ju, H. M., Ahn, Y. W., Ok, S. M., Jeong, S. H., Na, H. S., & Chung, J. (2025). Distinctive salivary oral microbiome in patients with burning mouth syndrome depending on pain intensity compared to healthy subjects. *Journal of dental sciences*, 20(1), 462–469. doi.org/10.1016/j.jds.2024.05.022
- Luo, S., Lou, F., Yan, L., Dong, Y., Zhang, Y., Liu, Y., Ji, P., & Jin, X. (2024). Comprehensive analysis of the oral microbiota and metabolome change in patients of burning mouth syndrome with psychiatric symptoms. *Journal of oral microbiology*, 16(1), 2362313. doi.org/10.1080/20002297.2024.2362313
- Cui, Y., Li, L., Wu, S., Zhang, X., Wang, L., Yang, H., & Yan, Z. (2026). Salivary Proteome-Microbiome Profiling in Burning Mouth Syndrome Might Highlight Mucin-Related Host-Microbe Features. *Journal of oral rehabilitation*, 10.1111/joor.70242. Advance online publication. doi.org/10.1111/joor.70242

BÖLÜM 3

TAM ARK İMPLANT DESTEKLİ SABİT PROTEZLERDE MATERİYAL SEÇİMİ: GÜNCEL YAKLAŞIMLAR VE KLİNİK DEĞERLENDİRMELER

Berfu ERHAN GÜRESER¹, Süheyla ESEN², Simay BOZKURT³

¹ Arş. Gör. Uzm. Dt., Sağlık Bilimleri Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi Protetik Diş Tedavisi Anabilim Dalı, Ankara, Türkiye, (ORCID: 0009-0008-1330-8000)

² Arş. Gör. Uzm. Dt., Sağlık Bilimleri Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi Protetik Diş Tedavisi Anabilim Dalı, Ankara, Türkiye, (ORCID: 0009-0009-8969-6086)

³ Arş. Gör. Uzm. Dt., Sağlık Bilimleri Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi Protetik Diş Tedavisi Anabilim Dalı, Ankara, Türkiye, (ORCID: 0009-0005-8391-9876)

1. Giriş

Tam dişsizlik, hastaların çiğneme fonksiyonu, fonasyon, estetik ve yaşam kalitesi üzerinde belirgin olumsuz etkilere yol açmaktadır (Al-Rafee, 2020). İmplant destekli sabit tam ark protezler, dişsiz hastaların rehabilitasyonunda öngörülebilir ve uzun dönemde başarılı bir tedavi seçeneği olarak kabul edilmektedir. Bu protezler; stabilite, çiğneme etkinliği, konuşma fonksiyonu ve estetik beklentileri karşılaması açısından hasta memnuniyetinde önemli avantajlar sunmaktadır (Abou-Ayash et al., 2023). Ancak bu protezlerde implant sağkalımı yüksek olsa da biyolojik, mekanik ve estetik komplikasyonlar sık görülmektedir ve tedavinin uzun dönem başarısını doğrudan etkilemektedir (Froimovici et al., 2024).

Tam ark implant destekli protezlerin geleneksel üretiminde, döküm metal altyapı üzerine akrilik rezin ve yapay dişlerin uygulandığı hibrit restorasyonlar yaygın olarak kullanılmıştır. Bu restorasyonlar ekonomik olmaları ve tamir kolaylığı sebebiyle tercih edilmektedir. Ancak uzun dönem takiplerde en sık bildirilen komplikasyonlar akrilik rezin ve dişlerde meydana gelen kırık ve aşınmalardır (Bozini et al., 2011). Metal-seramik restorasyonlar ise estetik özellikleri ve aşınma direnci açısından alternatif oluştursa da, veneer porseleninde meydana gelen kırıklar (chipping) bu sistemlerin başlıca sorunu olmaya devam etmektedir.

Diş hekimliğinde dijital teknolojilerin ve bilgisayar destekli tasarım ve üretim (CAD/CAM) sistemlerinin gelişmesiyle, implant destekli tam ark rehabilitasyonlarda kullanılan materyal seçenekleri önemli ölçüde genişlemiştir. Zirkonya, bu alanda mekanik ve estetik özellikleriyle öne çıkan materyallerden biri olmuştur. Altyapı materyali olarak kullanılan zirkonyanın tam ark restorasyonlarda kısa dönem başarısızlık oranı düşüktür. Ancak bu protezlerin önemli bir kısmında veneer porseleninin kırılmasına bağlı minör komplikasyonlar bildirilmiştir (Bidra et al., 2017). Bu sorunu ortadan kaldırmak amacıyla geliştirilen monolitik zirkonya restorasyonlar, tam ark implant destekli sabit protezlerde umut verici klinik sonuçlar göstermektedir. Güncel bir sistematik derleme ve meta analizde, 12-62 aylık takip süresince monolitik zirkonya protezlerin fonksiyonda kalma oranı %99 olarak bildirilmiştir (Matos et al., 2026). Bununla birlikte uzun dönem verileri hâlâ sınırlıdır. Benzer şekilde, polieter eter keton (PEEK) ve polieter keton keton (PEKK) gibi yüksek performanslı polimerler, metal altyapılara alternatif olarak umut verici sonuçlar ortaya koymaktadır. Bu materyallerin klinik ve uzun süreli sınırlamaları dahilinde daha fazla çalışmaya ihtiyaç vardır (Gama et al., 2024).

Mevcut sistematik derlemeler, farklı altyapı materyalleri ve üretim teknikleriyle yüksek protez sağkalım oranlarına ulaşılabildiğini göstermektedir (Delucchi et al., 2021). Protez materyal seçiminin implant ve protez sağkalımı üzerinde klinik olarak anlamlı bir etkisi gösterilememiş olsa da, bildirilen yüksek kırılma oranları sağkalımın tek başına klinik başarıyı değerlendirmede yeterli olmadığını ortaya koymaktadır (Bagegni et al., 2019). Bu nedenle materyal seçiminde yalnızca sağkalım oranları değil, olası teknik komplikasyonlar ile hastanın anatomik, biyomekanik, estetik ve ekonomik koşulları da dikkate alınmalıdır.

Bu bölümün amacı, tam ark implant destekli sabit protezlerde materyal seçimini etkileyen faktörleri ve kullanılan protetik sistemleri güncel literatürle birlikte değerlendirmektir. Bölümde ayrıca bu sistemlerin klinik performansları karşılaştırılmakta ve klinik karar verme sürecine yönelik öneriler sunulmaktadır.

2. Materyal seçimini etkileyen faktörler

Tam ark implant destekli sabit protezlerde ideal materyal, hastaya özgü pek çok değişkenin birlikte değerlendirilmesiyle belirlenir. Mevcut bulgular protez materyalinin tek başına protez sağkalımını belirleyici olmadığını göstermektedir (Bagegni et al., 2019). Bu nedenle materyal seçimi, aşağıda ele alınan faktörler çerçevesinde bireyselleştirilmelidir.

2.1. Hasta ile ilişkili faktörler

Hastanın yaşı ve sistemik durumu, planlanan protezin beklenen kullanım süresini ve hastanın idame randevularına katılım kapasitesini belirler. Genç ve sistemik olarak sağlıklı hastalarda uzun dönem dayanıklılığı yüksek materyaller öncelikli olabilir. İleri yaştaki ya da sistemik hastalığı bulunan bireylerde ise kolay onarılabirlik ve tedavinin sadeliği ön plana çıkar.

Oral hijyen düzeyi ve hastanın manuel becerisi de materyal seçimini etkiler. Metal-akrilik protezlerle karşılaştırıldığında, ağırlıklı olarak monolitik zirkonyadan üretilen protezlerde plak indeksinin daha düşük olduğu bildirilmiştir (Cappare et al., 2021). Benzer şekilde PEEK altyapılı implant destekli protezlerde metal altyapılara kıyasla daha düşük plak ve gingival indeks değerleri gözlenmiştir (Gama et al., 2024). Bu bulgular, hijyen gücülüğü yaşayan hastalarda yüzey özellikleri daha elverişli materyallerin tercih edilebileceğini düşündürmektedir.

Metal hassasiyeti nadir görülmekle birlikte göz ardı edilmemesi gereken bir faktördür. Titanyum uzun süre inert bir materyal olarak kabul edilmiş olsa da, implant hastalarında titanyuma bağlı aşırı duyarlılık reaksiyonlarını bildiren olgular mevcuttur (Poli et al., 2021). Güncel bir sistematik derleme de kanıt düzeyinin sınırlı olduğunu, ancak bu durumun nadir olmakla birlikte klinik açıdan önemli olduğunu vurgulamaktadır (Restelli et al., 2026). Öyküsünde metal alerjisi bulunan hastalarda metal içermeyen altyapı seçenekleri değerlendirilmelidir.

2.2. Anatomik ve protetik faktörler

Arklar arası mesafe, materyal seçimini doğrudan kısıtlayan temel anatomik parametrelerden biridir. Metal-akrilik hibrit protezler, altyapı ile akrilik ve protez dişleri için yeterli kalınlık gerektirdiğinden genellikle daha fazla restoratif boşluğa ihtiyaç duyar. Restoratif alanın sınırlı olduğu olgularda, monolitik zirkonya restorasyonlar mekanik özellikleri ve tasarıma özgü minimum kalınlık gereksinimleri dikkate alınarak değerlendirilebilir. Ancak protez boyutları, kırılma direncini etkileyen kritik bir faktör olarak kabul edilmektedir. Bununla birlikte, 115 monolitik zirkonya protezin değerlendirildiği bir çalışmada protez kalınlığı ile kırık arasında anlamlı bir ilişki saptanmamıştır (Papaspıridakos et al., 2025).

Kemik ve yumuşak doku kaybının miktarı, protezin gingival dokuları taklit eden pembe estetik bölümüne duyulan ihtiyacı belirler. İleri derecede alveolar rezorpsiyon görülen vakalarda FP3 tasarımı tercih edilebilir ve kaybedilen dokuların pembe akrilik, kompozit rezinler veya seramik materyallerle telafi edilmesi gerekmektedir.

İmplantların sayısı ve ark içerisindeki dağılımı ile distal kantilever uzunluğu, protetik altyapıda oluşan stres dağılımını etkileyen önemli faktörlerdir. Uzun distal kantilever uzantıları, özellikle kırılma materyallerde bağlantı bölgelerinde gerilim yoğunlaşmasına ve kırık riskinin artmasına sebep olabilir. Bu nedenle implant dağılımının sınırlı olduğu ve uzun kantilever uzantılarının gerektiği vakalarda, materyalin eğilme dayanımı ve kırılma tokluğu gibi mekanik özellikleri göz önünde bulundurulmalıdır.

2.3. Oklüzal ve biyomekanik faktörler

Karşıt dentisyonun tipi (doğal diş, geleneksel tam protez veya implant destekli protez), protezin maruz kalacağı kuvvetleri ve materyaller arası aşınmayı belirler. Karşıt arkın da implant

destekli sabit protez olduğu durumlarda proprioepsiyon azalır ve oklüzal kuvvetler artar. Bu da protetik materyallerde kırılma riskini yükseltebilir.

Bruksizmin implant çevresi biyolojik komplikasyonlar açısından belirgin bir risk faktörü olduğuna ilişkin yeterli kanıt bulunmamakla birlikte, mekanik komplikasyon riskini artırabileceğine yönelik bulgular mevcuttur (Manfredini et al., 2014). Tam ark implant destekli sabit protezlerde yapılan bir çalışmada bruksizmin vida gevşemesi, vida giriş deliği materyali kaybı ve minör kırılmalarla anlamlı biçimde ilişkili olduğu bildirilmiştir (Chochlidakis et al., 2020). Parafonksiyonel alışkanlıkları bulunan hastalarda metal altyapılı hibrit restorasyonlar ve monolitik zirkonya restorasyonlar, mekanik özellikleri ve olası teknik komplikasyonlar açısından değerlendirilmelidir. Materyal seçiminden bağımsız olarak, oklüzal yüklerin kontrolü ve oklüzal splint kullanımı önem taşımaktadır.

Altyapının pasif uyumu, implant-protez bağlantısında istenmeyen gerilimlerin önlenmesi açısından kritik öneme sahiptir. Bazı metal alaşımlarından tek parça döküm altyapıların ek düzeltme işlemleri yapılmadan yeterli uyum sağlayamadığı bildirilmektedir. CAD/CAM teknolojileri, geleneksel döküm yöntemlerine kıyasla altyapı uyumunda daha öngörülebilir sonuçlar sağlayabilir (Abduo et al., 2011). Materyalin elastisite modülü de kuvvetlerin implantlara ve çevre kemiğe dağılımını etkiler. Rijit materyaller kuvvetleri daha doğrudan iletirken, PEEK gibi daha düşük elastisite modülüne sahip polimerlerin şok absorbe edici etkisi olduğu öne sürülmektedir.

2.4. Estetik ve fonksiyonel gereksinimler

Dişsiz maksillada estetik planlamanın temel unsurları gülme hattı ve geçiş hattıdır. Geçiş hattı, protezin iç yüzeyi ile alveolar mukoza arasındaki birleşim çizgisidir. Gülme esnasında bu hattın görünür olması estetik başarısızlığa yol açabileceğinden, tedavi planlaması sırasında gülme hattının konumu dikkatle değerlendirilmelidir (Bidra & Agar, 2010). Yüksek gülme hattına sahip hastalarda geçiş bölgesinin gizlenmesi için protez tasarımı ve materyal seçimi daha da önem kazanır.

Pembe estetiğin sağlanmasında farklı materyaller farklı olanaklar sunar. Akrilik rezin kolay şekillendirilip onarılabılırken, gingiva renkli seramik ve boyanmış zirkonya daha yüksek renk stabilitesi sunar. Fonasyon açısından ise özellikle maksiller protezlerde palatinal kontur ve

protez-doku arasındaki boşluklar önemlidir. Materyal seçimi bu konturların ne kadar ince ve hassas üretilebileceğini doğrudan etkiler.

2.5. Ekonomik faktörler ve hasta beklentileri

Materyal seçiminde başlangıç maliyeti kadar uzun dönem idame maliyeti de değerlendirilmelidir. Metal-akrilik hibrit protezler daha ekonomik ve kolay onarılabılır olsa da, uzun dönemde protezlerde kırık ve aşınma sık görülen komplikasyonlar arasındadır (Bozini et al., 2011). Ortalama 8 yıllık takibin yapıldığı bir çalışmada, zirkonya protezlerin başlangıç maliyeti metal-akrilik protezlerden belirgin olarak yüksek bulunmuştur. Buna karşın zirkonya protezlerde komplikasyonlar daha az görülmüş ve beş yıllık protez sağkalımı daha yüksek saptanmıştır (Barootchi et al., 2020) .

Restoratif materyallerin onarılabilirliği de önemli bir değerlendirme ölçütüdür. Akrilik ve kompozit rezin esaslı restorasyonlarda meydana gelen kırık ve aşınmalar çoğunlukla ağız içinde veya kısa laboratuvar işlemleriyle giderilebilir. Porselen kırıklarının onarımı ise daha kapsamlı laboratuvar işlemleri gerektirebilir (Bidra et al., 2017). Monolitik zirkonya restorasyonlarda ise sınırlı yüzey hasarları onarılabılırken, geniş çaplı kırıklarda protezin yenilenmesi gerekir. Bu nedenle materyal seçiminde hastanın estetik beklentileri, ekonomik koşulları ve düzenli kontrollere uyumu göz önünde bulundurulmalıdır.

3. Tam ark implant destekli sabit protezlerde kullanılan materyaller ve protetik sistemler

Tam ark implant destekli sabit protezlerde uzun yıllar boyunca metal-akrilik, metal-kompozit ve metal-seramik kombinasyonları kullanılmıştır. Son yirmi yılda CAD/CAM teknolojisinin yaygınlaşmasıyla zirkonya ve yüksek performanslı polimerler de klinik kullanıma girmiştir (Berzaghi & Bortolini, 2023).

3.1. Metal-akrilik rezin sistemler

Metal-akrilik hibrit protezler, titanyum veya Co-Cr altyapı üzerine pembe akrilik rezin ve yapay protez dişlerinin yerleştirilmesiyle üretilir. Düşük maliyet, kolay onarım ve akrilik rezinin pembe estetiği taklit etme kolaylığı bu sistemin başlıca avantajlarıdır. Akrilik rezinin görece düşük elastisite modülü, oklüzal yükler altında deformasyona izin vererek çiğneme kuvvetlerinin bir kısmının absorbe edilmesine katkı sağlayabilir.

Bu protezlerin en önemli sınırlılığı, akrilik rezin materyalin zamanla aşınması ve kırılmasıdır (Bozini et al., 2011). 1–12 yıllık takibin yapıldığı bir çalışmada, protez materyalinde aşınmanın yıllık görülme oranı metal-akrilik rezin protezlerde %19,4, porselen protezlerde ise %7,3 olarak bildirilmiş ve aradaki fark istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur (Papaspzyridakos et al., 2020). Yapay dişlerin kaide rezininden ayrılması da sık görülen bir komplikasyondur. Bu komplikasyonun özellikle karşıt arkta da implant destekli sabit protez bulunan hastalarda arttığı bildirilmiştir (Karre et al., 2023). Akrilik rezinin porozitesi, renk değişimi ve plak birikimine yatkınlığı da uzun dönem idame ihtiyacını artırır.

3.2. Metal-kompozit rezin sistemler

Metal-kompozit sistemler, metal altyapı üzerine indirekt kompozit rezin kaplanmasıyla üretilir. Akrilik rezine göre daha yüksek aşınma direnci ve renk stabilitesi sunarken, seramiğe kıyasla daha kolay onarılabilir. Ayrıca kompozitin ağız içinde tamir edilebilmesi, bu sistemi akrilik ile seramik arasında bir ara seçenek haline getirir.

Bununla birlikte, tam ark protezlerde metal-kompozit sistemlere özgü uzun dönem klinik veriler oldukça sınırlıdır. Kompozit ile metal arasındaki bağlantının uzun dönem stabilitesi ve kompozitin zamanla yüzey bozulması bu sistemin olası dezavantajlarıdır. Günümüzde CAD/CAM teknolojilerindeki gelişmelerle birlikte, metal-kompozit restorasyonlara alternatif olarak zirkonya ve polimer esaslı sistemlerin kullanımı yaygınlaşmaktadır.

3.3. Metal-seramik restorasyonlar

Metal-seramik tam ark protezler, döküm veya CAD/CAM yöntemleriyle üretilen metal altyapı üzerine feldspatik porselen uygulanarak hazırlanır. Tek parça (monoblok) ya da segmentli olarak tasarlanabilirler. Bu protezler akrilik rezine göre daha estetik özellikler , aşınma direnci ve renk stabilitesi sunar.

Tam ark metal-seramik protezlerde 5 yıllık takipte protez sağkalımı %98,8 olarak bildirilmiştir. Aynı çalışmada en sık görülen protetik komplikasyonlar vida giriş deliği dolgusunun kaybı ve porselen kırığı olmuştur (Gonzalez-Gonzalez et al., 2020). Uzun dönem takip çalışmalarını değerlendiren bir meta-analiz de seramik kırılmasının bu sistemlerin başlıca teknik sorunu olduğunu doğrulamaktadır (Wong et al., 2019).

3.4. Zirkonya esaslı restorasyonlar

Zirkonya esaslı tam ark protezler, monolitik olarak veya zirkonya altyapı üzerine feldspatik porselen uygulanarak üretilir. Monolitik zirkonya restorasyonlar CAD/CAM teknolojisiyle tek parça halinde üretilirken, zirkonya altyapılı restorasyonlarda üzerine feldspatik porselen tabakalanarak estetik ve anatomik form elde edilir.

Zirkonya altyapılı porselen tam ark protezler kısa dönemde yüksek sağkalım oranları göstermesine rağmen, veneer porseleninde oluşan chippinge bağlı minör komplikasyonlara sebep olmuştur. Bu komplikasyonların azaltılması amacıyla monolitik zirkonya tasarımlar ön plana çıkmıştır. Güncel sistematik derlemelerde yaklaşık dört yıllık takipte tam ark implant destekli monolitik zirkonya restorasyonlarda yüksek sağkalım ve az komplikasyon bildirilmektedir (Vozzo et al., 2023). 115 monolitik zirkonya protezin değerlendirildiği bir çalışmada ise 6 yıla kadar takipte protez sağkalımı %98,6 bulunmuştur (Papaspriyidakos et al., 2025). Metal-akrilik protezlerle yapılan uzun dönem karşılaştırmada ise zirkonya protezlerin daha yüksek başlangıç maliyetine karşın daha az geç dönem komplikasyon ve daha yüksek sağkalım gösterdiği bildirilmiştir (Barootchi et al., 2020).

Monolitik zirkonya restorasyonların sınırlılıkları arasında yüksek rijitlikleri, karşıt dentisyonda aşınma potansiyelleri ve özellikle geniş kapsamlı kırıklarda ağız içi onarım seçeneklerinin sınırlı olması yer almaktadır.

3.5. Yüksek performanslı polimer esaslı sistemler

PEEK ve PEKK gibi yüksek performanslı polimerler, metal altyapılara alternatif olarak geliştirilmiştir. Bu materyaller hafif olmaları, metal içermeyen yapıları ve kemiğe yakın elastisite modülleriyle öne çıkmaktadır. Kobalt-krom gibi yüksek rijitliğe sahip metal altyapılara kıyasla, oklüzal kuvvetlerin kemik-implant arayüzüne iletimini dengeleyerek bölgesel stres birikimini önleme potansiyeline sahiptir. Ayrıca metal içermemeleri sebebiyle metal korozyonu ve buna bağlı iyon salınım riskini ortadan kaldırmaktadır.

Sistematik bir derlemede PEEK altyapılı implant destekli sabit protezlerde metal altyapılara kıyasla daha düşük plak indeksi, gingival indeks ve marjinal kemik kaybı ile daha yüksek sağkalım bildirilmiştir. Ancak aynı derlemede kantilever içeren üç PEKK protezin üçünde de kırık rapor edilmiştir (Gama et al., 2024). Bu bulgu, polimer altyapıların uzun kantilever gerektiren olgularda dikkatle kullanılması gerektiğini göstermektedir.

Fiberle güçlendirilmiş kompozitler (cam veya karbon fiber) de bu grupta değerlendirilebilecek bir diğer seçenektir. CAD/CAM ile frezelenen fiberle güçlendirilmiş kompozit altyapıların kullanıldığı, ultra kısa implantlarla desteklenmiş mandibular tam ark protezlerde 10 yıllık takipte %100 protez sağkalımı bildirilmiştir (Petroni et al., 2025). Bununla birlikte, yüksek performanslı polimerlere ilişkin kanıtlar çoğunlukla kısa dönemli ve küçük örneklemlerle çalışmalara dayanmaktadır. Bu materyallerin rutin kullanım için önerilebilmesi, uzun dönem randomize kontrollü çalışmaların sonuçlarına bağlıdır.

4. Klinik performans: sağkalım ve komplikasyonlar

Tam ark implant protezlerinin klinik performansı değerlendirilirken “sağkalım” ve “başarı” kavramlarının ayrılması gerekir. Sağkalım, protezin takip süresi sonunda ağızda bulunmasını ifade eder. Başarı ise protezin bu süre boyunca herhangi bir komplikasyon ya da müdahale gerektirmeden işlev görmesini tanımlar. Literatürde bildirilen yüksek sağkalım oranları, çoğu zaman sık görülen ancak onarılabılır komplikasyonları gizleyebilmektedir.

İmplant destekli sabit protezlere ilişkin geniş bir sistematik derlemede protez sağkalımı 5 yılda %95,4, 10 yılda %80,1 olarak hesaplanmıştır. Aynı derlemede hastaların yaklaşık üçte birinde biyolojik veya teknik komplikasyon gelişmiştir (Pjetursson et al., 2012). Tam ark protezlere özgü bir çalışmada da ortalama 5,2 yıllık takipte protez sağkalımı %91,6 bulunmuştur. Buna karşın minör komplikasyon görülmeyen protez oranı 5 yılda %60,5'e, 10 yılda ise %8,9'a düşmüştür. Majör teknik komplikasyon görülmeyen protez oranı da 10 yılda %30,1'e gerilemiştir (Papaspnyridakos et al., 2020). Bu bulgular, tam ark implant protezlerinde uzun dönemde teknik komplikasyonun beklenen bir durum olduğunu göstermektedir.

Protez materyalinin sağkalım üzerindeki etkisini değerlendiren bir meta-analizde, kullanılan materyaller arasında protez sağkalımı açısından klinik olarak anlamlı bir farklılık saptanmamıştır (Bagegni et al., 2019). Dolayısıyla materyaller arasındaki asıl fark sağkalımda değil, komplikasyonların türü, sıklığı ve onarım kolaylığında ortaya çıkmaktadır. Bu durum, materyal seçiminde sağkalım oranlarının yanı sıra teknik komplikasyonlar ve idame yükünün dikkate alınması gerektiğini göstermektedir.

5. Materyal seçiminde klinik değerlendirmeler

Önceki bölümlerde ele alınan veriler, tam ark implant destekli sabit protezlerde tüm klinik durumlar için üstün tek bir materyal bulunmadığının altını çizmektedir. Materyaller arasındaki farklar sağkalımda değil; komplikasyon profili, onarılabirlik ve maliyette ortaya çıkmaktadır (Bagegni et al., 2019; Barootchi et al., 2020). Bu nedenle materyal seçiminde, hastaya özgü risk faktörleri bütüncül olarak değerlendirilmelidir.

Hastanın metal hassasiyeti öyküsü mutlaka sorgulanmalıdır. Nadir görülmekle birlikte, doğrulanmış metal hassasiyeti bulunan hastalarda zirkonya ya da PEEK veya fiberle güçlendirilmiş kompozit gibi metal içermeyen altyapılar tercih edilmelidir (Poli et al., 2021). Arklar arası mesafe de tedavi planlaması sırasında dikkate alınması gereken önemli faktörlerden biridir. İnteroklüzal mesafenin sınırlı olduğu vakalarda, materyallerin mekanik özellikleri ve gerekli minimum kalınlıklar materyal seçiminde belirleyici rol oynamaktadır. Monolitik zirkonya, yüksek mekanik dayanımı sebebiyle bu vakalarda değerlendirilebilecek seçeneklerden biridir.

Bruksizm varlığı ve karşıt arkta implant destekli sabit protez bulunması, restorasyonlarda veneer porselen chippingine ve oklüzal aşınma gibi teknik komplikasyonların görülme riskini artırmaktadır (Chochlidakis et al., 2020; Manfredini et al., 2014). Bu olgularda, veneer seramiği içermeyen monolitik zirkonya restorasyonlar oklüzal splint kullanımıyla birlikte tercih edilmelidir. Materyal seçiminde implantların ark üzerindeki dağılımı ve distal kantilever varlığı da dikkate alınmalıdır. Distal kantilever bulunması, mekanik komplikasyon riskini artırmaktadır (Tang et al., 2023). Bu nedenle uzun kantilever uzantıları gereken durumlarda, titanyum veya yeterli bağlantı kesit alanına sahip zirkonya altyapılar değerlendirilebilirken, polimer esaslı altyapıların kullanımı mekanik sınırlılıklar göz önünde bulundurularak planlanmalıdır (Gama et al., 2024).

Hastanın estetik beklentisi ve gülme hattı da çok önemli parametrelerdendir. Yüksek gülme hattına sahip hastalarda öncelikli sorun materyal seçimi değil, protez ile mukoza arasındaki geçiş hattının görünür olmasıdır. Bu hastalarda geçiş hattının dudak altında kamufle edilmesi için gerekli kemik redüksiyonu planlanabilir ve kaybedilen dokuyu tamamlayan metal-akrilik rezin hibrit protez tasarlanabilir. Yüksek estetik beklentiye sahip hastalarda ise, veneer seramiğinde chipping riskini azaltmak amacıyla seramik tabakalamanın vestibül yüzey veya gingival alanda sınırlandırıldığı minimal feldspatik porselen içeren zirkonya altyapılı protezler

ya da renklendirme işlemi uygulanmış monolitik zirkonya restorasyonlar tercih edilebilir (Bidra et al., 2017). Ekonomik kısıtlılığı olan ya da kolay onarımın öncelikli olduğu hastalarda ise metal-akrilik rezin hibrit protezler günümüzde de geçerli bir seçenektir. Bu hastalara düzenli idame gerekliliği ve olası aşınma onarımları tedavi öncesinde açıklanmalıdır (Barootchi et al., 2020; Papaspyridakos et al., 2020).

6. Sonuç ve gelecek perspektifleri

Tam ark implant destekli sabit protezlerde tüm klinik durumlar için üstün tek bir materyal bulunmamaktadır. Uygun planlamayla farklı materyallerle benzer ve yüksek sağkalım oranlarına ulaşılabilmektedir. Materyaller arasındaki asıl fark komplikasyon profili, onarılabilirlik ve maliyette ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle başarılı bir rehabilitasyon, “en iyi materyal” arayışından çok, hastanın anatomik, oklüzal, estetik ve ekonomik koşullarına en uygun materyalin seçilmesine ve bu seçimin hastayla açıkça paylaşılmasına bağlıdır.

Yüksek translüsensiye sahip çok katmanlı zirkonyalar, monolitik restorasyonlarda estetik ile dayanıklılık arasındaki dengeyi iyileştirmektedir. Yüksek performanslı polimerler ve fiberle güçlendirilmiş kompozitler, metal içermeyen ve biyomekanik açıdan daha uyumlu alternatifler olarak umut vadetmektedir. Eklemeli üretim teknolojilerindeki gelişmeler ve tam dijital iş akışları da protez üretiminde doğruluğu artırırken süre ve maliyeti azaltma potansiyeli taşımaktadır. Ancak bu yeni materyal ve yöntemlere ilişkin kanıtlar henüz büyük ölçüde kısa dönemli ve küçük örneklemli çalışmalara dayanmaktadır. Bu nedenle klinik uygulamada yeniliklerin rutin kullanıma alınmadan önce standart başarı ölçütleri kullanılarak değerlendirilmesi gerekmektedir. Hasta odaklı sonuçları ve maliyet-etkinliği de içeren, uzun dönem randomize kontrollü çalışmalar, gelecekte daha güvenilir ve kanıta dayalı materyal seçim protokollerinin geliştirilmesine olanak sağlayacaktır.

KAYNAKÇA

- Al-Rafee, M. A. (2020). The epidemiology of edentulism and the associated factors: A literature Review. *Journal of family medicine and primary care*, 9(4), 1841.
- Abou-Ayash, S., Fonseca, M., Pieralli, S., & Reissmann, D. R. (2023). Treatment effect of implant-supported fixed complete dentures and implant overdentures on patient-reported outcomes: a systematic review and meta-analysis. *Clinical oral implants research*, 34, 177-195.
- Froimovici, F. O., Butnărașu, C. C., Montanari, M., & Săndulescu, M. (2024). Fixed full-arch implant-supported restorations: techniques review and proposal for improvement. *Dentistry Journal*, 12(12), 408.
- Bozini, T., Petridis, H., Garefis, K., & Garefis, P. (2011). A meta-analysis of prosthodontic complication rates of implant-supported fixed dental prostheses in edentulous patients after an observation period of at least 5 years. *The International journal of oral and maxillofacial implants*, 26(2), 304-318.
- Bidra, A. S., Rungruanganunt, P., & Gauthier, M. (2017). Clinical outcomes of full arch fixed implant-supported zirconia prostheses: A systematic review. *Eur J Oral Implantol*, 10(suppl 1), 35-45.
- de Matos, A. C. M., Vieira, F. L., Marrara, J. R., Tirapelli, C., Correia, F. D., & Santiago-Junior, J. F. (2026). Are monolithic zirconia complete arch implant-supported prostheses reliable? A systematic review and meta-analysis. *The Journal of Prosthetic Dentistry*.
- Gama, L. T., Bezerra, A. P., Schimmel, M., Garcia, R. C. M. R., de Luca Canto, G., & Gonçalves, T. M. S. V. (2024). Clinical performance of polymer frameworks in dental prostheses: A systematic review. *The journal of prosthetic dentistry*, 131(4), 579-590.
- Delucchi, F., De Giovanni, E., Pesce, P., Bagnasco, F., Pera, F., Baldi, D., & Menini, M. (2021). Framework materials for full-arch implant-supported rehabilitations: a systematic review of clinical studies. *Materials*, 14(12), 3
- Bagegni, A., Abou-Ayash, S., Ruecker, G., Algarny, A., & Att, W. (2019). The influence of prosthetic material on implant and prosthetic survival of implant-supported fixed complete dentures: a systematic review and meta-analysis. *Journal of prosthodontic research*, 63(3), 251-265.
- Cappare, P., Ferrini, F., Mariani, G., Nagni, M., & Cattoni, F. (2021). Implant rehabilitation of edentulous jaws with predominantly monolithic zirconia compared to metal-acrylic prostheses: A 2-year retrospective clinical study. *Journal of biological regulators and homeostatic agents*, 35(4 Suppl. 1), 99-112.

- Poli, P. P., de Miranda, F. V., Polo, T. O. B., Santiago Júnior, J. F., Lima Neto, T. J., Rios, B. R., ... & Faverani, L. P. (2021). Titanium allergy caused by dental implants: a systematic literature review and case report. *Materials*, 14(18), 5239.
- Restelli, L., Uriarte, X., Moreno, X., Mena, C., Fernández, E., Fan, S., & Díaz, L. (2026). Titanium hypersensitivity in dental implants: A systematic review of updated clinical evidence and diagnostic strategies. *Journal of Prosthodontic Research*, JPR_D_25_00255
- Papaspyridakos, P., Sinada, N., Ntovas, P., Barmak, A. B., & Chochlidakis, K. (2025). Zirconia full-arch implant prostheses: survival, complications, and prosthetic space dimensions with 115 edentulous jaws. *Journal of Prosthodontics*, 34(3), 271-280.
- Manfredini, D., Poggio, C. E., & Lobbezoo, F. (2014). Is bruxism a risk factor for dental implants? A systematic review of the literature. *Clinical implant dentistry and related research*, 16(3), 460-469.
- Chochlidakis, K., Einarsdottir, E., Tsigarida, A., Papaspyridakos, P., Romeo, D., Barmak, A. B., & Ercoli, C. (2020). Survival rates and prosthetic complications of implant fixed complete dental prostheses: an up to 5-year retrospective study. *The Journal of prosthetic dentistry*, 124(5), 539-546.
- Abduo, J., & Lyons, K. (2011). Fit of screw-retained fixed implant frameworks fabricated by different methods: a systematic review. *The International journal of prosthodontics*.
- Bidra, A. S., & Agar, J. R. (2010). A classification system of patients for esthetic fixed implant-supported prostheses in the edentulous maxilla. *Compendium of Continuing Education in Dentistry (15488578)*, 31(5), 366.
- Barootchi, S., Askar, H., Ravidà, A., Gargallo-Albiol, J., & Travan, S. (2020). Long-term Clinical Outcomes and Cost-Effectiveness of Full-Arch Implant-Supported Zirconia-Based and Metal-Acrylic Fixed Dental Prostheses: A Retrospective Analysis. *International Journal of Oral & Maxillofacial Implants*, 35(2), 395.
- Berzaghi, A., & Bortolini, S. (2023). Modern concepts in Implant-Supported Fixed Complete Dental Prostheses (IFCDPs): from traditional solutions to current monolithic zirconia restorations. Concise review. *Annali di stomatologia*, 14(1), 17-22.
- Papaspyridakos, P., Bordin, T. B., Kim, Y. J., El-Rafie, K., Pagni, S. E., Natto, Z. S., ... & Weber, H. P. (2020). Technical complications and prosthesis survival rates with implant-supported fixed complete dental prostheses: a retrospective study with 1-to 12-year follow-up. *Journal of Prosthodontics*, 29(1), 3-11.

- Karre, S., Kattadiyil, M. T., Lozada, J. L., & AlHelal, A. (2023). Complications associated with metal resin fixed complete dentures based on implant distribution. *Journal of Prosthodontics*, 32(2), 125-131.
- Gonzalez-Gonzalez, I., deLlanos-Lanchares, H., Brizuela-Velasco, A., Alvarez-Riesgo, J. A., Llorente-Pendas, S., Herrero-Climent, M., & Alvarez-Arenal, A. (2020). Complications of fixed full-arch implant-supported metal-ceramic prostheses. *International journal of environmental research and public health*, 17(12), 4250.
- Wong, C. K. K., Narvekar, U., & Petridis, H. (2019). Prosthodontic complications of metal-ceramic and all-ceramic, complete-arch fixed implant prostheses with minimum 5 years mean follow-up period. A systematic review and meta-analysis. *Journal of Prosthodontics*, 28(2), e722-e735.
- Vozzo, L. M., Azevedo, L., Fernandes, J. C. H., Fonseca, P., Araújo, F., Teixeira, W., ... & Correia, A. (2023). The success and complications of complete-arch implant-supported fixed monolithic zirconia restorations: a systematic review. *Prosthesis*, 5(2), 425-436.
- Petroni, G., Zaccheo, F., Rupe, C., & Cicconetti, A. (2025). Edentulous Mandibles Restored with Fiber-Reinforced Composite Prostheses Supported by 5.0 mm Ultra-Short Implants: Ten-Year Follow-Up. *Prosthesis*, 7(4), 94.
- Pjetursson, B. E., Thoma, D., Jung, R., Zwahlen, M., & Zembic, A. (2012). A systematic review of the survival and complication rates of implant-supported fixed dental prostheses (FDP s) after a mean observation period of at least 5 years. *Clinical oral implants research*, 23, 22-38.
- Tang, Y., Yu, H., Wang, J., & Qiu, L. (2023). Implant Survival and Complication Prevalence in Complete-Arch Implant-Supported Fixed Dental Prostheses: A Retrospective Study with a Mean Follow-up of 5 Years. *International Journal of Oral & Maxillofacial Implants*, 38(1), 84.

BÖLÜM 4

DİŞSİZ MAKSİLLANIN TAM ARK İMLANT REHABİLİTASYONUNDA GÜNCEL UZLAŞI RAPORLARI

Süheyla ESEN¹, Berfu ERHAN GÜRESER², Simay BOZKURT³

¹ Arş. Gör. Uzm. Dt., Sağlık Bilimleri Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi Protetik Diş Tedavisi Anabilim Dalı, Ankara, Türkiye, (ORCID: 0009-0009-8969-6086)

² Arş. Gör. Uzm. Dt., Sağlık Bilimleri Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi Protetik Diş Tedavisi Anabilim Dalı, Ankara, Türkiye, (ORCID: 0009-0008-1330-8000)

³ Arş. Gör. Uzm. Dt., Sağlık Bilimleri Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi Protetik Diş Tedavisi Anabilim Dalı, Ankara, Türkiye, (ORCID: 0009-0005-8391-9876)

1. GİRİŞ

Dişsiz maksillanın implant destekli rehabilitasyonu, kret rezorpsiyonunun derecesi, maksiller sinüs pnömatisasyonu, kemik yoğunluğundaki bölgesel farklılıklar ve estetik beklentiler gibi çok sayıda anatomik ve biyomekanik değişkenin bir arada değerlendirilmesini gerektiren, implantolojinin karmaşık alanlarından birini oluşturmaktadır (Gallucci et al., 2018; Strauss et al., 2026). Literatürde greftli veya greftsiz yaklaşımlar, açılı implant yerleştirilmesi, zigomatik implantlar veya konvansiyonel rekonstrüksiyon gibi implant sayı ve dağılımları ile sabit veya hareketli hibrit protezler gibi protez tasarımları açısından çok sayıda tedavi seçeneği tanımlanmış olsa da klinisyenler için ortak ve öngörülebilir bir tedavi planının oluşturulması oldukça önemlidir (Gallucci et al., 2018; Morton et al., 2014). Bu klinik çeşitlilik ve değişken başarı oranları, uluslararası düzeyde standardizasyon ihtiyacını doğurmuştur (Strauss et al., 2026; Tonetti & Palmer, 2012). ITI (International Team for Implantology) ve EAO (European Association for Osseointegration) gibi öncü kuruluşların düzenlediği konsensus konferansları güncel kanıta dayalı verileri sentezleyerek endikasyon kriterlerini, cerrahi protokolleri, risk analizlerini ve protetik başarı parametrelerini standartlaştırmayı amaçlamaktadır (Morton et al., 2014). Bu uzlaşi süreçleri, dişsiz maksilla tedavisinde cerrahi ve protetik komplikasyonları en aza indirmeyi ve uzun dönemli klinik başarıyı artırmayı amaçlayan evrensel bazı rehberler sunmaktadır.

2. TARİHSEL ARKA PLAN

2.1. Klasik Protokollerden All-on-4 Kavramına Geçiş

Dişsiz maksillanın implant destekli rehabilitasyonuna yaklaşım, tarihsel olarak Brånemark ve çalışma arkadaşlarının tanımladığı klasik protokolle başlamıştır; bu protokolle, kret boyunca birbirine paralel yerleştirilen ve tipik olarak altı ile sekiz implantla desteklenen tam ark sabit protezler uygulanmıştır (Adell et al., 1990; Zarb & Schmitt, 1990). Klasik yaklaşımla implant ve protez sağkalımının %90'ın üzerinde seyrettiği bildirilen bu yaklaşım uzun süre kullanılmıştır (Adell, 1981; Adell et al., 1990; Brånemark et al., 1995). Bununla birlikte, özellikle posterior maksillada yetersiz kemik hacmi sıklıkla sinüs tabanı yükseltme gibi kemik ogmentasyon prosedürlerini zorunlu kılmış bu durum tedavi süresini, maliyeti ve hasta morbiditesini artıran bir unsur olarak öne çıkmıştır (Aghaloo & Moy, 2007; Chiapasco et al., 2009). Greftleme ihtiyacını azaltmak amacıyla geliştirilen kasıtlı açılı implant yerleştirme teknikleri, kantilever uzunluğunu kısaltarak ve implantların ön-arka dağılımını iyileştirerek vital anatomik yapılardan kaçınmayı ve daha az sayıda implantla tam ark

desteğini mümkün kılmıştır (Aghaloo & Moy, 2007; Aparicio et al., 2001). Bu biyomekanik ilerlemeler, Maló ve arkadaşları tarafından tanımlanan ve posterior implantların açılı yerleştirilmesiyle hemen fonksiyonel yüklemeyi mümkün kılan “All-on-4” kavramının gelişimine zemin hazırlamıştır (Maló et al., 2003).

2.2. Geçmiş ITI Konsensus Raporları (2018, 2023)

Bu erken dönem yaklaşım, kemik hacminin yetersiz olduğu posterior maksillada kemik ogmentasyonları ve maksiller sinüs tabanı yükseltme operasyonlarını zorunlu kılmış, bu durum ise hasta morbiditesini ve tedavi süresini artırmıştır (Brånemark et al., 1995; Maló et al., 2003). İlerleyen cerrahi ve biyomekanik prensipler doğrultusunda, Maló ve ark. tarafından geliştirilen “All-on-4” konsepti posterior alandaki implantların açılı yerleştirilmesiyle vital anatomik oluşumlardan kaçınmayı, kantilever uzunluğunu azaltarak ark içi poligonal desteği optimize etmeyi ve immediate yüklemeyi mümkün kılmıştır (Maló et al., 2003). Süreç içerisinde implant sayısı, dağılımı ve protetik tasarımların çeşitlenmesi klinik kararların kanıta dayalı bir zemine oturtulması gerekliliğini ortaya çıkarmıştır (Gallucci et al., 2018; Jung et al., 2018). Bu bağlamda yayımlanan 2018 (6.) ve 2023 (7.) ITI (International Team for Implantology) konsensus raporları tam dişsiz çenelerde yükleme protokolleri, greftsiz açılı implant yaklaşımları, dijital iş akışları ve biyolojik veya mekanik komplikasyonların yönetimi konusunda endikasyon kriterlerini netleştirerek çağdaş tedavi standartlarını belirlemiştir (Jung et al., 2018; Morton et al., 2023).

3. İMPLANT SAYISI TARTIŞMASI

3.1. Biyomekanik Kanıtlar: Sonlu Elemanlar Analizleri

Tam dişsiz maksillanın sabit protetik rehabilitasyonunda ideal implant sayısının seçimi (dört veya altı implant), implantolojide en çok tartışılan konulardan biri olmaya devam etmektedir (Gallucci et al., 2018). Üç boyutlu sonlu elemanlar analizleri, dört implantla desteklenen All-on-4 tipi tasarımlarda posterior implantların açılandırılmasının ve buna bağlı kantilever kısılmasının, peri-implant kortikal ve trabeküler kemikteki tepe von Mises gerilimini belirgin ölçüde azaltabildiğini açılandırılmamış altı implantlı bir düzenin de dört implantlı düzene kıyasla ilave bir gerilim azalımı sağladığını göstermektedir. Ancak aynı modellemeler, kantilever uzunluğunun -ve dolayısıyla açılandırmanın- mevcut veri setinde ham implant sayısından daha belirleyici bir biyomekanik parametre olarak öne çıktığına da işaret etmektedir (Saber et al., 2015).

3.2. Sistematik Derlemeler ve Meta-Analizler

Bu biyomekanik gerekçeye karşın klinik kanıt düzeyi daha nüanslı bir tablo ortaya koymaktadır. ITI 2018 Konsensus Grubu adına yürütülen ve 93 çalışmadan (9 randomize kontrollü, 42 prospektif, 42 retrospektif; ortalama 8 yıl, 1-15 yıl aralığında takip) elde edilen verileri değerlendiren sistematik derleme ve meta-analiz, tam ark sabit protezi desteklemek için beşten az implant kullanılmasının, beş veya daha fazla implant kullanımına kıyasla implant sağkalım oranlarında istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık yaratmadığı sonucuna varmıştır (Daudt Polido et al., 2018). Aynı derleme maksilla için ayrı değerlendirildiğinde de (50 hasta grubu, 47 yayın) beşten az ve beş veya daha fazla implantla desteklenen tam ark protezleri arasında sağkalım açısından anlamlı bir fark bulunmadığını; ancak beşten az implant kullanan grupların çoğunlukla distal olarak eğimli posterior implantlarla dört implant ve hemen yükleme protokolünü, beş veya daha fazla implant kullanan grupların ise paralel konfigürasyonda altı implant ve yine hemen yüklemeyi tercih ettiğini bildirmiştir (Daudt Polido et al., 2018). Bu bulgulara dayanarak ITI konsensus grubu, tek parçalı tam ark sabit protezi desteklemek için en az dört adet uygun şekilde dağıtılmış implant kullanılmasını klinik öneri olarak sunmuş, ancak implant sayısı seçilirken olası gelecekteki implant kaybının protez desteği üzerindeki etkisinin de göz önünde bulundurulmasını vurgulamıştır (Daudt Polido et al., 2018).

Kasıtlı olarak eğimli yerleştirilen implantların paralel yerleştirilmiş implantlarla karşılaştırıldığı 2 randomize kontrollü çalışma, 1 klinik çalışma ve 17 prospektif kohorttan oluşan 20 çalışmayı kapsayan bir başka ITI sistematik derlemesi de, implant ve protez sağkalımı ile marjinal kemik kaybı, yumuşak veya sert doku komplikasyonları ve protez komplikasyonları açısından iki konfigürasyon arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark bulamamıştır. Bu bulgu, daha az implantla ve eğimli yerleştirmeye tam ark desteğinin biyomekanik açıdan güvenli bir alternatif olabileceği görüşünü desteklemiştir (Lin & Eckert, 2018).

3.3. Güncel Çok Merkezli Randomize Kontrollü Çalışmalar

Daha yakın tarihli çok merkezli randomize kontrollü çalışmalar bu tabloyu doğrulamanın yanı sıra birkaç nüans eklemektedir. Tallarico ve ark.'nın rehberli cerrahiyle yerleştirilen ve hemen yüklenen dört veya altı implantla desteklenen maksiller tam ark sabit protezleri karşılaştırdığı beş yıllık randomize kontrollü çalışması, iki grup arasında implant ve protez sağkalımı açısından anlamlı bir fark bildirmemiştir; All-on-4 grubunda komplikasyonlara

bir eğilim gözlenirse de bu farkın istatistiksel anlamlılığa erişmediğini bildirmiştir (Tallarico et al., 2016). Toia ve ark. tarafından yürütülen çok merkezli randomize kontrollü bir çalışma, önce üç yıllık ara sonuçlarla raporlanmış, ardından beş yıllık nihai sonuçlarla güncellenmiştir. Bu çalışmada, titanyum CAD/CAM freze iskelet kullanılan maksiller tam ark sabit protezlerde dört ve altı implant grupları karşılaştırılmış; birincil sonlanım noktası olarak marjinal kemik seviyesindeki değişim ele alınmıştır. Sonuçlar, dört implant grubunun marjinal kemik kaybı açısından altı implant grubuna göre daha kötü olmadığını destekleyen bulgular ortaya koymuştur. (Toia et al., 2021, 2025). Öte yandan 2024 tarihli bir meta-analiz, dört ve altı implant grupları arasında implant sağkalımının (%98,5'e karşı %97) ve protez sağkalımının (%99,8'e karşı %99,6) istatistiksel olarak benzer kaldığını doğrularken, dört implant grubunda marjinal kemik kaybının altı implant grubuna kıyasla anlamlı derecede daha fazla olduğunu (1,02 mm'ye karşı 0,46 mm; $p < 0,01$) bildirmiş ve bu farkı büyük ölçüde distal kantilever varlığına bağlamıştır (Sharaf et al., 2024).

Sonuç olarak güncel yaklaşım kemik kalitesi ve anteroposterior yayılım gibi anatomik koşulların uygun olduğu olgularda dört implantın öngörülebilir bir tedavi alternatifi olduğunu, ancak bu yaklaşımın marjinal kemik kaybı açısından bir miktar dezavantaj taşıyabileceğini, karşıt çene tipi, parafonksiyonel alışkanlıklar ve kemik yoğunluğunun düşük olduğu maksiller arkta ise altı implantın biyomekanik güvenlik payı sağlamak adına halen güçlü bir endikasyon alanı koruduğunu desteklemektedir (Daudt Polido et al., 2018; Gallucci et al., 2018; Lin & Eckert, 2018; Sharaf et al., 2024; Tallarico et al., 2016; Toia et al., 2021).

4. YERLEŞTİRME VE YÜKLEME ZAMANLAMASI

4.1. Hemen (immediat), Erken ve Geç Yerleştirme Protokolleri

Dişsiz veya diş çekimi planlanan maksillanın implant destekli rehabilitasyonunda cerrahi yerleştirme ve protetik yükleme zamanlamasının seçimi, mevcut kret hacmi ile greft ihtiyacına doğrudan bağlıdır (Haroyan-Darbinyan et al., 2025; Marković et al., 2022). Çekim soketine hemen (immediate) yerleştirilen implantlar; kemik hacminin korunduğu alanlarda veya eş zamanlı kontur ogmentasyonu ile kombine edildiğinde tedavi süresini ve cerrahi seans sayısını azaltmaktadır (Marković et al., 2022). Buna karşın, ileri derecede rezorbe atrofik maksillada sinüs tabanı yükseltme (Pjetursson et al., 2008) ve alveolar kret ogmentasyonu gibi kemik rekonstrüksiyonu gerektiren greftli senaryolarda; primer stabilite eksikliği ve greftin bekleme süreci nedeniyle geç (delayed) yerleştirme ve geç yükleme protokolleri geleneksel olarak tercih edilen güvenli yaklaşımı temsil etmektedir (Morton et al., 2023).

4.2. Primer Stabilite Eşikleri: Yerleştirme Torku ve ISQ

Yerleştirme zamanlamasından bağımsız olarak, hemen fonksiyonel yüklemeye uygunluk kararı esas olarak implantın primer stabilitesine dayanır; bu stabilite klinikte en sık yerleştirme torku ve rezonans frekans analizi (ISQ, implant stabilite katsayısı) ile değerlendirilmektedir. Tam ark sabit protezler için literatürde kabul edilen yerleştirme torku aralığı geniştir. Herhangi bir protez tipi için genel kabul gören aralık 25-45 Ncm olarak bildirilirken, özellikle tam ark immediat yükleme endikasyonu için en az 30 Ncm'lik bir minimum eşik önerilmiştir (Papaspnyidakos et al., 2014). Ancak güncel bir sistematik derleme ve meta-analiz, düşük yerleştirme torku değerleriyle (≤ 35 Ncm) yerleştirilen implantlar ile daha yüksek torkla yerleştirilenler arasında implant sağkalımı açısından istatistiksel olarak anlamlı bir fark bulamamış; ayrıca yüksek, orta ve düşük tork tanımları için literatürde standart bir konsensusun bulunmadığını vurgulamıştır (Darriba et al., 2023). Dolayısıyla güncel kanıt, immediat yükleme kararının tek bir “eşik tork değerinden” ziyade; kemik kalitesi, cerrahi protokol ve splintlenmiş tam ark protez tasarımının bütüncül değerlendirilmesiyle verilmesi gerektiğine işaret etmektedir. Rezonans frekans analizi (ISQ) de klinik pratikte tamamlayıcı bir stabilite göstergesi olarak yaygın şekilde kullanılmakla birlikte, immediat yükleme için evrensel olarak kabul edilmiş, standardize bir ISQ eşik değeri de henüz tanımlanmamıştır. Primer stabilitenin, tek bir sayısal ölçütten ziyade çok parametrelili bir klinik karar olarak ele alınması gerekliliğini ortaya koymaktadır.

4.3. Yükleme Protokollerinin Klinik Sonuçları

Varolan kemikte yeterli primer stabilite sağlandığında, immediat yerleştirilen konik geometrili ve hidrofilik yüzeyli implantların immediat veya erken (postoperatif 6-8. hafta) yüklenmesinin; altı haftalık iyileşme sürecinde yerleştirme torku ve rezonans frekans analiziyle ölçülen primer ve sekonder stabilite açısından geç yüklenen implantlarla karşılaştırılabilir sonuçlar verdiği, submilimetrik marjinal kemik kaybı ve yüksek hasta memnuniyetiyle birlikte iki protokol arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark yaratmadığı bildirilmiştir (Marković et al., 2022). Güncel uzun dönemli kohort verileri ise geleneksel geç-yerleştirme tercihini kısmen sorgulatmaktadır. Atrofik maksillada greftli kemiğe geç yerleştirilip geç yüklenen implantlar ile greftsiz yaklaşımla varolan kemiğe immediat yüklenen implantların 10 yıla varan takiplerde benzer başarı sergilediği; bu bulgunun, immediat ve geç yerleştirme protokollerini doğrudan karşılaştıran diğer sistematik derleme ve meta-analizlerle de büyük ölçüde uyumlu olduğu bildirilmiştir (Chatzopoulos & Wolff, 2025;

Garcia-Sanchez et al., 2022; Haroyan-Darbinyan et al., 2025). Bu tablo, greftsiz-immediat protokollerin invaziv ogmentasyon prosedürlerine güvenilir bir alternatif oluşturabileceğine işaret etmektedir. Bu klinik tablolarda başarıyı belirleyen en kritik parametrelerden birinin, yerleştirme zamanlamasının kendisinden ziyade kemik/greft kalitesi, elde edilen primer stabilite düzeyi ve karşıt çenedeki dentisyon tipi olduğu bildirilmiştir (Haroyan-Darbinyan et al., 2025; Marković et al., 2022).

5. BÖLGE HAZIRLAMA TEKNOLOJİSİNDEKİ GELİŞMELER: OSSEODANSİFİKASYON

İmplant osteotomi bölgesinin hazırlanmasında konvansiyonel subtraktif (kemik eksizyonuna dayalı) frezleme yöntemleri, özellikle Tip III ve IV gibi düşük kemik yoğunluğuna sahip maksiller kreterlerde yetersiz primer stabilite riskini beraberinde getirmektedir (Huweis & Meyer, 2017). Bu biyomekanik kısıtlamayı aşmak amacıyla geliştirilen osseodansifikasyon tekniği; ters yönde (saat yönünün tersine) ve bol irigasyon altında çalışan özel çok yivli frezler (Densah® Bur teknolojisi) vasıtasıyla kemik trabeküllerini kesip uzaklaştırmak yerine osteotomi çeperine doğru hidrodinamik olarak sıkıştırarak otolog bir osteoplasti ve kondensasyon sağlamaktadır (Huweis & Meyer, 2017; Oliveira et al., 2018). Bu biyolojik ve mekanik modifikasyon, osteotomi çevresinde yüksek mineralize dansiteye sahip bir kemik manşonu oluşturarak insersiyon torkunu istatistiksel olarak anlamlı derecede yükseltmektedir; bir hayvan modelinde konvansiyonel subtraktif frezelemeye kıyasla belirgin ölçüde daha yüksek insersiyon torku değerleri bildirilmiştir (Oliveira et al., 2018). Ancak bu tork artışının implant stabilite katsayısına (ISQ) aynı oranda yansıyor yansımadığı tartışmalıdır: osseodansifikasyonu konvansiyonel frezelemeyle doğrudan karşılaştıran bir randomize kontrollü çalışma, implant yerleştirme anında ve altıncı ayda iki teknik arasında ISQ açısından istatistiksel olarak anlamlı bir fark bulamamış; her iki grupta da ISQ'nun zamanla benzer biçimde yükseldiğini bildirmiştir (Mello-Machado et al., 2021). Dolayısıyla güncel kanıt, insersiyon torkundaki artışın tutarlı biçimde desteklendiğini, ancak bunun ISQ'ya aynı tutarlılıkla yansımadığını göstermektedir. Ayrıca, osseodansifikasyonla hazırlanan osteotomilerde konvansiyonel frezelemeye kıyasla iyileşme sürecinde histolojik bir bozulma gözlenmediği de bildirilmiştir (Witek et al., 2019). Primer stabilitede elde edilen bu artış -özellikle insersiyon torku açısından-, zayıf kemik kalitesine sahip veya çekim sonrası hacim kaybı yaşayan maksiller sahalarda dahi hemen (immediate) implant yerleştirme ve hemen fonksiyonel yükleme protokollerinin endikasyon sınırlarını genişletmektedir (Oliveira et al., 2018). Bu biyomekanik avantajların klinik ve ticari karşılığı

güncel endüstri hareketlerinde de görülmektedir (Nobel Biocare, 2026).

6. 2026 KÜRESEL KONSENSUS VE İTALYAN KONSENSUS KONFERANSI

6.1. Ortak Öneriler ve Farklılık Gösteren Noktalar

Tam dişsiz maksillanın cerrahi ve protetik rehabilitasyonuna ilişkin güncel kılavuzlar, 2026 Küresel Konsensus serisi ile İtalyan Konsensus Konferansı (Italian Consensus Conference) kararları ışığında önemli bir paradigmatik dönüşüm yaşamaktadır (Donos et al., 2026; Rapone et al., 2026; Strauss et al., 2026). Her iki uzlaş panelinin birleştiği ortak temel öneri dijital iş akışları (statik şablonlu veya dinamik navigasyonlu cerrahi), implant eksenlerinin biyomekanik optimizasyonu ve hasta odaklı sonuç ölçütlerinin (PROMs) klinik başarının merkezine yerleştirilmesidir (Pannuti et al., 2026; Rapone et al., 2026; Strauss et al., 2026). Ancak iki konsensus arasında bazı klinik yaklaşımlarda farklılıklar bulunmaktadır. Küresel Konsensus'un implant sayısı/zamanlama/yükleme grubu, greftsiz açılı implantasyon (All-on-4/All-on-6) konseptlerini ve kemik ekspansiyon/osseodansifikasyon tekniklerini yüksek kanıt düzeyiyle destekleyerek minimal invaziv yaklaşımlara ağırlık verirken (Donos et al., 2026); İtalyan Konsensus ekolü ve Küresel Konsensus'un görüntüleme/ogmentasyon grubu, özellikle ileri maksiller atrofide (Cawood & Howell Sınıf V-VI) (Cawood & Howell, 1988) kemik ogmentasyonlarının, sinüs tabanı elevasyonunun ve sert doku rekonstrüksiyonunun uzun dönemli doku stabilitesi için vazgeçilmez bir biyolojik güvenlik payı sunduğunu savunmaktadır (Fiorellini et al., 2026; Rapone et al., 2026).

6.2. Geçmiş Konsensustan Farklılıklar

Önceki 2018 (6. ITI) ve 2023 (7. ITI) konsensus raporlarıyla kıyaslandığında görülen farklılık sadece implant sağkalım oranlarına odaklanan geleneksel kriterlerin terk edilerek, peri-implant yumuşak doku kalınlığı, keratinize mukoza genişliği, protetik tasarım tipi (konvansiyonel protez, implant üstü overdenture veya sabit protez) ve mekanik/biyolojik komplikasyon profilinin birincil başarı kriteri olarak kabul edilmesidir (Gallucci et al., 2018; Jung et al., 2018; Morton et al., 2023; Pannuti et al., 2026; Stilwell et al., 2026). Ayrıca önceki dönemlerde “kesin endikasyon” sınırlarında kabul edilen kret anatomisi sınırları (Cawood & Howell, 1988), yeni nesil hidrofilik implant yüzeyleri ve osseodansifikasyon ile elde edilen artırılmış primer stabilite sayesinde hemen yüklemeye lehine daha esnek hale getirilmiştir (Donos et al., 2026; Strauss et al., 2026).

7. KLİNİK KARAR ALGORİTMASI

Tam dişsiz maksillanın rehabilitasyonunda klinik karar algoritması kalan kemik hacmi, maksiller sinüs pnömatizasyonu, yumuşak doku fenotipi, gülme hattı yüksekliği ve özellikle karşıt ark dentisyonu ve parafonksiyonel alışkanlıklar gibi oklüzal dinamikleri içeren değişkenlerin bütünüyle değerlendirilmesine dayanmaktadır (Daudt Polido et al., 2018). Yeterli anterior kemik desteği ve uygun anteroposterior ark yayılımı bulunan olgularda greftsiz açılı implant konseptleri (ör. All-on-4 / All-on-6) ile immediat fonksiyonel yükleme, minimal invaziv ve öngörülebilir bir tedavi çerçevesi sunarken ileri derecede atrofik kretlerde ve sinüs tabanı kayıplarında kemik ogmentasyonları veya ileri cerrahi yaklaşımlar (zigomatik/pterygoid implantlar) kaçınılmaz hale gelebilmektedir (Solà Pérez et al., 2022). Ancak mevcut klinik kanıtların önemli bir sınırlılığı; heterojen cerrahi protokoller, değişken implant tasarımları ve uzun dönemli (10 yıl ve üzeri) randomize kontrollü çalışmaların azlığı nedeniyle standardizasyonun her vakaya mutlak uygulanamamasıdır (Daudt Polido et al., 2018; Donos et al., 2026). Gelecek araştırma yönelimleri dinamik navigasyon ve robotik cerrahi sistemlerinin mikro-hassasiyeti (Pisla et al., 2025), yapay zekâ destekli kişiselleştirilmiş protetik biyomekanik modellemeler (Khaohoen et al., 2025), yeni nesil biyoaktif/hidrofilik implant yüzeyleri (Marković et al., 2022) ve kemik densifikasyon teknolojilerinin (Huweis & Meyer, 2017; Witek et al., 2019) uzun dönem peri-implant doku stabilitesi üzerindeki etkilerini aydınlatmaya odaklanmalıdır.

8. SONUÇ

Sonuç olarak, dişsiz maksillanın tam ark implant rehabilitasyonu, tek bir standart protokole indirgenemeyecek kadar çok değişkenli bir klinik tablo sunmaktadır. İmplant sayısı, yerleştirme ve/veya yükleme zamanlaması, bölge hazırlama tekniği ve protez tasarımı gibi parametrelerin her biri, hastaya özgü anatomik ve biyomekanik koşullar ışığında ayrı ayrı değerlendirilmelidir (Gallucci et al., 2018; Strauss et al., 2026). Güncel konsensus raporları, geleneksel olarak “altın standart” kabul edilen altı implant ve geç yükleme protokollerinin yerini; uygun vaka seçimiyle dört implant, greftsiz açılı yerleştirme ve hemen fonksiyonel yüklemeyi içeren daha minimal invaziv yaklaşımlara bırakabileceğini güçlü kanıtlarla desteklemektedir (Donos et al., 2026; Marković et al., 2022). Bununla birlikte bu paradigma değişiminin sınırları da nettir: ileri derecede atrofik kretlerde, düşük kemik yoğunluğunda ve karşıt çenede doğal dentisyon bulunan olgularda, altı implant ve/veya kemik ogmentasyonu temelli konvansiyonel protokoller halen biyomekanik güvenlik payı açısından

vazgeçilmezliğini korumaktadır (Rapone et al., 2026; Sharaf et al., 2024). Klinisyenin görevi, bu iki uç arasında -tam standardizasyon ile tam bireyselleştirme arasında- hastaya özgü risk-fayda dengesini kurarak kanıta dayalı ama esnek bir tedavi planı oluşturmaktır; gelecekteki konsensus süreçlerinin, yapay zekâ destekli karar algoritmaları ve dijital iş akışlarının klinik rutine entegrasyonu ile bu bireyselleştirme sürecini daha da nesnel ve öngörülebilir bir zemine oturtması beklenmektedir (Khaohoen et al., 2025; Pısla et al., 2025).

KAYNAKÇA

- Adell, R. (1981). A 15-year study of osseointegrated implants in the treatment of the edentulous jaw. *International Journal of Oral Surgery*, 10(6), 387–416. [https://doi.org/10.1016/S0300-9785\(81\)80077-4](https://doi.org/10.1016/S0300-9785(81)80077-4)
- Adell, R., Eriksson, B., Lekholm, U., Brånemark, P.-I., & Jemt, T. (1990). Long-term follow-up study of osseointegrated implants in the treatment of totally edentulous jaws. *International Journal of Oral & Maxillofacial Implants*, 5(4), 347–359.
- Aghaloo, T. L., & Moy, P. K. (2007). Which hard tissue augmentation techniques are the most successful in furnishing bony support for implant placement? *International Journal of Oral & Maxillofacial Implants*, 22(Suppl), 49–70.
- Aparicio, C., Perales, P., & Rangert, B. (2001). Tilted implants as an alternative to maxillary sinus grafting: A clinical, radiologic, and periotest study. *Clinical Implant Dentistry and Related Research*, 3(1), 39–49. <https://doi.org/10.1111/j.1708-8208.2001.tb00127.x>
- Brånemark, P.-I., Svensson, B., & van Steenberghe, D. (1995). Ten-year survival rates of fixed prostheses on four or six implants ad modum Brånemark in full edentulism. *Clinical Oral Implants Research*, 6(4), 227–231. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0501.1995.060405.x>
- Cawood, J. I., & Howell, R. A. (1988). A classification of the edentulous jaws. *International Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, 17(4), 232–236. [https://doi.org/10.1016/S0901-5027\(88\)80047-X](https://doi.org/10.1016/S0901-5027(88)80047-X)
- Chatzopoulos, G. S., & Wolff, L. F. (2025). Assessing the long-term survival of dental implants in a retrospective analysis: Immediate versus delayed placement. *Clinical and Experimental Dental Research*, 11(1), e70096. <https://doi.org/10.1002/cre2.70096>
- Chiapasco, M., Casentini, P., & Zaniboni, M. (2009). Bone augmentation procedures in implant dentistry. *International Journal of Oral & Maxillofacial Implants*, 24(Suppl), 237–259.
- Darriba, I., Seidel, A., Moreno, F., Botelho, J., Machado, V., Mendes, J. J., et al. (2023). Influence of low insertion torque values on survival rate of immediately loaded dental implants: A systematic review and meta-analysis. *Journal of Clinical Periodontology*, 50(2), 158–169. <https://doi.org/10.1111/jcpe.13733>
- Daudt Polido, W., Aghaloo, T., Emmett, T. W., Taylor, T. D., & Morton, D. (2018). Number of implants placed for complete-arch fixed prostheses: A systematic review and meta-analysis. *Clinical Oral Implants Research*, 29(Suppl 16), 154–183. <https://doi.org/10.1111/clr.13312>

- Donos, N., Ng, E., Pannuti, C. M., Romito, G. A., Francisco, H. C. O., Abou-Ayash, S., et al. (2026). Consensus Report of Group 1 of the 1st Global Consensus for Clinical Guidelines for the Rehabilitation of the Edentulous Maxilla: Number of implants, timing of implant placement and loading. *Clinical Oral Implants Research*, 37(Suppl 30), S28–S48.
<https://doi.org/10.1111/clr.70063>
- Fiorellini, J., Lin, G. H., Rocchietta, I., Mojaver, S., Aghaloo, T., Ahn, K. M., et al. (2026). Consensus Report of Group 3 of the 1st Global Consensus for Clinical Guidelines for the Rehabilitation of the Edentulous Maxilla: Advanced diagnostic imaging, augmentation techniques, and management of complications. *Clinical Oral Implants Research*, 37(Suppl 30).
<https://doi.org/10.1111/clr.70079>
- Gallucci, G. O., Hamilton, A., Zhou, W., Buser, D., & Chen, S. (2018). Implant placement and loading protocols in partially edentulous patients: A systematic review. *Clinical Oral Implants Research*, 29(Suppl 16), 106–134. <https://doi.org/10.1111/clr.13276>
- Garcia-Sanchez, R., Dopico, J., Kalemaj, Z., Buti, J., Pardo Zamora, G., & Mardas, N. (2022). Comparison of clinical outcomes of immediate versus delayed placement of dental implants: A systematic review and meta-analysis. *Clinical Oral Implants Research*, 33(3), 231–277.
<https://doi.org/10.1111/clr.13892>
- Haroyan-Darbinyan, E., Gao, Q., de Lillo, P., Torres, J., Abi-Nader, S., Nach, D., et al. (2025). Rehabilitation of the atrophic edentulous maxilla: A retrospective cohort study comparing survival of delayed-loaded implants in grafted bone versus immediately loaded implants in native bone. *Clinical and Experimental Dental Research*, 11(6), e70167.
<https://doi.org/10.1002/cre2.70167>
- Huwais, S., & Meyer, E. (2017). A novel osseous densification approach in implant osteotomy preparation to increase biomechanical primary stability, bone mineral density, and bone-to-implant contact. *International Journal of Oral & Maxillofacial Implants*, 32(1), 27–36.
<https://doi.org/10.11607/jomi.4817>
- Jung, R. E., Al-Nawas, B., Araujo, M., Avila-Ortiz, G., Barter, S., Brodala, N., et al. (2018). Group 1 ITI Consensus Report: The influence of implant length and design and medications on clinical and patient-reported outcomes. *Clinical Oral Implants Research*, 29(Suppl 16), 69–77.
<https://doi.org/10.1111/clr.13342>
- Khaohoen, A., Yoda, N., Rungsiyakull, P., Rungsiyakull, C., & Taichi, T. (2025). Can artificial intelligence optimize treatment planning and outcome prediction in fixed tooth- and implant-supported prosthodontics? A scoping review. *BMC Oral Health*, 26(1), 104.

<https://doi.org/10.1186/s12903-025-07300-8>

- Lin, W. S., & Eckert, S. E. (2018). Clinical performance of intentionally tilted implants versus axially positioned implants: A systematic review. *Clinical Oral Implants Research*, 29(Suppl 16), 78–105. <https://doi.org/10.1111/clr.13294>
- Maló, P., Rangert, B., & Nobre, M. (2003). “All-on-Four” immediate-function concept with Brånemark System implants for completely edentulous mandibles: A retrospective clinical study. *Clinical Implant Dentistry and Related Research*, 5(Suppl 1), 2–9. <https://doi.org/10.1111/j.1708-8208.2003.tb00010.x>
- Marković, A., Mišić, T., Janjić, B., Šćepanović, M., Trifković, B., Ilić, B., et al. (2022). Immediate vs early loading of bone level tapered dental implants with hydrophilic surface in rehabilitation of fully edentulous maxilla: Clinical and patient centered outcomes. *Journal of Oral Implantology*, 48(5), 358–369. <https://doi.org/10.1563/AAID-JOI-D-21-00045>
- Mello-Machado, R. C., Mourão, C. F. A. B., Javid, K., Ferreira, H. T., Montemezzi, P., Calasans-Maia, M. D., & Senna, P. M. (2021). Clinical assessment of dental implants placed in low-quality bone sites prepared with osseodensification concept: A randomized clinical trial. *Applied Sciences*, 11(2), 640. <https://doi.org/10.3390/app11020640>
- Morton, D., Chen, S., Martin, W., Levine, R., & Buser, D. (2014). Consensus statements and recommended clinical procedures regarding optimizing esthetic outcomes in implant dentistry. *International Journal of Oral & Maxillofacial Implants*, 29(Suppl), 186–215. <https://doi.org/10.11607/jomi.2013.g3>
- Morton, D., Wismeijer, D., Chen, S., Hamilton, A., Wittneben, J., Casentini, P., et al. (2023). Group 5 ITI Consensus Report: Implant placement and loading protocols. *Clinical Oral Implants Research*, 34(Suppl 26), 349–356. <https://doi.org/10.1111/clr.14137>
- Nobel Biocare. (2026). Nobel Biocare acquires Versah, expanding its regeneratives and implant solutions portfolio [Press release]. <https://www.nobelbiocare.com/en-int/news/nobel-biocare-acquires-versah-expanding-its-regeneratives-and-implant-solutions-portfolio>
- Oliveira, P. G. F. P. de, Bergamo, E. T. P., Neiva, R., Bonfante, E. A., Witek, L., Tovar, N., et al. (2018). Osseodensification outperforms conventional implant subtractive instrumentation: A study in sheep. *Materials Science and Engineering: C*, 90, 300–307. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2018.04.051>
- Pannuti, C. M., Hassan, M. A., Reis, I. N. R., Villar, C. C., Francisco, H., & Romito, G. A. (2026). Patient- and clinician-reported outcomes and outcome measures evaluating timing of implant

- loading in the edentulous maxilla: A systematic review of prospective studies. *Clinical Oral Implants Research*, 37(Suppl 30). <https://doi.org/10.1111/clr.14451>
- Papaspyridakos, P., Chen, C. J., Chuang, S. K., & Weber, H. P. (2014). Implant loading protocols for edentulous patients with fixed prostheses: A systematic review and meta-analysis. *International Journal of Oral & Maxillofacial Implants*, 29(Suppl), 256–270. <https://doi.org/10.11607/jomi.2014suppl.g4.3>
- Pisla, D., Bulbucan, V., Hedesiu, M., Vaida, C., Pusca, A., Mocan, R., et al. (2025). Accuracy of navigation and robot-assisted systems for dental implant placement: A systematic review. *Dentistry Journal*, 13(11), 537. <https://doi.org/10.3390/dj13110537>
- Pjetursson, B. E., Tan, W. C., Zwahlen, M., & Lang, N. P. (2008). A systematic review of the success of sinus floor elevation and survival of implants inserted in combination with sinus floor elevation. *Journal of Clinical Periodontology*, 35(8 Suppl), 216–240. <https://doi.org/10.1111/j.1600-051X.2008.01272.x>
- Rapone, B., Ferrara, E., Tomarelli, F., Giovannico, G., Bacci, C., Dalmaschio, G., et al. (2026). Consensus statement on full-arch implant rehabilitations: Evidence-based recommendations from the Italian Consensus Conference. *Journal of Clinical Medicine*, 15(10), 3695. <https://doi.org/10.3390/jcm15103695>
- Saber, F. S., Ghasemi, S., Koodaryan, R., Babaloo, A., & Abolfazli, N. (2015). The comparison of stress distribution with different implant numbers and inclination angles in All-on-Four and conventional methods in maxilla: A finite element analysis. *Journal of Dental Research, Dental Clinics, Dental Prospects*, 9(4), 246–253. <https://doi.org/10.15171/jodddd.2015.044>
- Sharaf, M. A., Wang, S., Mashrah, M. A., Xu, Y., Haider, O., & He, F. (2024). Outcomes that may affect implant and prosthesis survival and complications in maxillary fixed prosthesis supported by four or six implants: A systematic review and meta-analysis. *Heliyon*, 10(3), e24365. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e24365>
- Solà Pérez, A., Pastorino, D., Aparicio, C., Pegueroles Neyra, M., Khan, R. S., Wright, S., et al. (2022). Success rates of zygomatic implants for the rehabilitation of severely atrophic maxilla: A systematic review. *Dentistry Journal*, 10(8), 151. <https://doi.org/10.3390/dj10080151>
- Stilwell, C., Jung, R. E., Beuer, F., Brunello, G., Cha, J. K., Ling, J. C. K., et al. (2026). Consensus Report of Group 4 of the 1st Global Consensus for Clinical Guidelines for the Rehabilitation of the Edentulous Maxilla: Conventional dentures, implant overdentures and implant-supported fixed dental prostheses. *Clinical Oral Implants Research*, 37(Suppl 30), S81–S107. <https://doi.org/10.1111/clr.70069>

- Strauss, F. J., Brunello, G., Thoma, D. S., Kopp, I., Stilwell, C., Jung, R. E., et al. (2026). 1st Global Consensus for Clinical Guidelines for the Rehabilitation of the Edentulous Maxilla: A single-round survey on standard, short, and zygomatic implant-supported prostheses. *Clinical Oral Implants Research*, 37(Suppl 30), S135–S154. <https://doi.org/10.1111/clr.70015>
- Tallarico, M., Meloni, S. M., Canullo, L., Caneva, M., & Polizzi, G. (2016). Five-year results of a randomized controlled trial comparing patients rehabilitated with immediately loaded maxillary cross-arch fixed dental prosthesis supported by four or six implants placed using guided surgery. *Clinical Implant Dentistry and Related Research*, 18(5), 965–972. <https://doi.org/10.1111/cid.12380>
- Toia, M., Stocchero, M., Corrà, E., Becktor, J. P., Wennerberg, A., & Cecchinato, D. (2021). Fixed full-arch maxillary prostheses supported by four versus six implants with a titanium CAD/CAM milled framework: 3-year multicentre RCT. *Clinical Oral Implants Research*, 32(1), 44–59. <https://doi.org/10.1111/clr.13679>
- Toia, M., Moreira, C. S., Dias, D. R., Corrà, E., Ravidà, A., & Cecchinato, D. (2025). Fixed full-arch maxillary prostheses supported by four versus six implants: 5-year results of a multicenter randomized clinical trial. *Clinical Oral Implants Research*, 36(3), 298–313. <https://doi.org/10.1111/clr.14383>
- Tonetti, M., & Palmer, R. (2012). Clinical research in implant dentistry: Study design, reporting and outcome measurements: Consensus report of Working Group 2 of the VIII European Workshop on Periodontology. *Journal of Clinical Periodontology*, 39(Suppl 12), 73–80. <https://doi.org/10.1111/j.1600-051X.2011.01843.x>
- Witek, L., Neiva, R., Alifarag, A., Shahraki, F., Sayah, G., Tovar, N., et al. (2019). Absence of healing impairment in osteotomies prepared via osseodensification drilling. *International Journal of Periodontics & Restorative Dentistry*, 39(1), 65–71. <https://doi.org/10.11607/prd.3504>
- Zarb, G. A., & Schmitt, A. (1990). The longitudinal clinical effectiveness of osseointegrated dental implants: The Toronto study. Part I: Surgical results. *Journal of Prosthetic Dentistry*, 63(4), 451–457. [https://doi.org/10.1016/0022-3913\(90\)90237-7](https://doi.org/10.1016/0022-3913(90)90237-7)

BÖLÜM 5

PROTETİK DİŞ TEDAVİSİNDE EKLEMELİ ÜRETİM TEKNOLOJİLERİ: GEÇİCİ VE DAİMİ RESTORATİF MATERYALLERİN MEKANİK VE BİYOUYUMLULUK ÖZELLİKLERİ

Burcu DERELİ İNAN¹

¹ Uzm. Dt., Bağımsız Araştırmacı, Protetik Diş Tedavisi, İstanbul, Türkiye. ORCID: 0000-0001-7537-9017. E-posta: dtburcudereli@gmail.com

1. GİRİŞ VE TARİHSEL GELİŞİM

Protetik diş tedavisi, son yirmi yılda dijital iş akışlarının klinik ve laboratuvar uygulamalarına entegrasyonu ile belirgin bir dönüşüm geçirmiştir. Ağız içi tarayıcılar, bilgisayar destekli tasarım (CAD) yazılımları ve bilgisayar destekli üretim (CAM) sistemleri, konvansiyonel ölçü-model-mum modelaj-döküm zincirinin önemli bir bölümünü sayısal ortama taşımıştır. Bu dönüşümün üretim aşamasında iki temel yaklaşım öne çıkmaktadır: blok hâlindeki materyalden frezler aracılığıyla materyal uzaklaştırılmasına dayanan eksiltmeli üretim (frezeleme) ve sayısal modelin ince katmanlar hâlinde, katman üzerine katman eklenerek oluşturulmasına dayanan eklemeli üretim (katmanlı üretim, üç boyutlu [3B] baskı) (Watanabe vd., 2022).

1.1. Eksiltmeli ve Eklemeli Üretimin Karşılaştırılması

Eksiltmeli üretim, endüstriyel olarak üretilmiş, yüksek yoğunluklu ve düşük poroziteli bloklardan yararlanması nedeniyle daimi restorasyonların üretiminde yerleşik referans yöntemlerden biridir. Fabrikasyon koşullarında yüksek basınç ve sıcaklık altında polimerize edilmiş rezin bloklar ile önceden sinterlenmiş seramik bloklar, homojen bir mikroyapı ve öngörülebilir mekanik davranış sunar. Bununla birlikte eksiltmeli yöntemin bazı yapısal sınırlılıkları bulunmaktadır: frez çapı, iç yüzeydeki keskin açılar ve dar oluk morfolojilerinin birebir aktarılmasını kısıtlar; frezlerin aşınması doğruluğu zamanla etkileyebilir ve blok materyalin bir bölümü talaş olarak kaybedilir. Ayrıca üretilen restorasyon sayısı; kullanılan blok veya disk boyutuna, cihazın kapasitesine ve restorasyonların yerleşimine bağlıdır.

Eklemeli üretim ise bu sınırlılıkların önemli bir kısmını ortadan kaldırma potansiyeline sahiptir. Materyal yalnızca gerekli olduğu yerde katılaştırıldığından atık miktarı belirgin biçimde azalır; tek bir baskı tablasında çok sayıda restorasyon eş zamanlı üretilir ve frez geometrisinden kaynaklanan kısıtlamalar ortadan kalkar (Watanabe vd., 2022). Buna karşılık katmanlı yapının doğurduğu anizotropi, baskı sonrası işlemlere duyarlılık ve materyalin kimyasal bileşiminden kaynaklanan sınırlılıklar, eklemeli üretimin daimi restorasyonlarda kullanımını hâlâ tartışmalı kılmaktadır. Nitekim güncel sistematik derlemeler, daimi restorasyon amaçlı 3B baskı kompozit reçinelerinin mekanik özelliklerinin eksiltmeli yöntemle üretilen muadillerinin gerisinde kaldığını bildirmektedir (Mandurino vd., 2025; Pot vd., 2024).

1.2. Eklemeli Üretimin Protetik Diş Tedavisindeki Avantajları

Eklemeli üretimin protetik diş tedavisine sağladığı katkılar üç ana başlıkta toplanabilir. Birincisi materyal tasarrufudur: eksiltmeli yöntemde blok materyalin bir bölümü kullanılmadan uzaklaştırılırken, vat polimerizasyon sistemlerinde kullanılmayan sıvı reçine üretici önerileri doğrultusunda filtrelenerek yeniden kullanılabilir. İkincisi karmaşık anatomilerin üretilebilirliğidir: oklüzal fissür morfolojisi, iç boşluklu yapılar, kişiye özel post-kor sistemleri ve çok parçalı protetik tasarımlar frez erişimi kısıtı olmaksızın üretilebilir. Örneğin Çelik Öge ve arkadaşları (2024), daimi kron reçinesinden 3B yazıcıyla üretilen kişiye özel post-kor yapılarının kırılma dayanımı ve elastik modül açısından fiber post-kompozit kor sistemlerinden istatistiksel olarak farklı olmadığını göstermiştir. Üçüncüsü iş akışı verimliliği ve potansiyel maliyet avantajıdır: masaüstü vat polimerizasyon yazıcılarının erişilebilirliği, tek seansta geçici restorasyon üretimini ve klinik içi (chairside) üretim modellerinin yaygınlaşmasını desteklemiştir.

Bu avantajlar, eklemeli üretimi ilk aşamada çalışma modelleri, cerrahi rehberler ve geçici restorasyonlar gibi kısa ömürlü uygulamalarda yaygınlaştırmış; son yıllarda ise seramik dolduruculu hibrit reçineler ve 3B yazıcıyla üretilen zirkonya ile daimi restorasyon alanına taşımıştır (Cesar vd., 2024; Nejat, 2025). Bu bölümde, protetik diş tedavisinde kullanılan eklemeli üretim teknolojileri, geçici ve daimi restoratif materyallerin kimyasal yapıları, baskı parametreleri ile baskı sonrası işlemlerin materyal davranışı üzerindeki etkileri, mekanik özellikler ve biyouyumluluk 2021-2026 yılları arasında yayımlanmış kanıta dayalı literatür ışığında ele alınmaktadır.

2. PROTETİKTE KULLANILAN EKLEMELİ ÜRETİM TEKNOLOJİLERİ

ISO/ASTM 52900 sınıflandırmasında yedi ana eklemeli üretim kategorisi tanımlanmış olmakla birlikte, protetik diş tedavisinde klinik karşılığı olan teknolojiler ağırlıklı olarak vat polimerizasyon ve toz yatağı füzyon grupları altında toplanmaktadır. Daha sınırlı ölçüde materyal püskürtme (*material jetting*) ve ekstrüzyon tabanlı sistemler de araştırma düzeyinde kullanılmaktadır.

2.1. Vat Polimerizasyon Teknikleri

Vat polimerizasyon, bir hazne (vat) içindeki sıvı fotopolimer reçinenin belirli dalga boyundaki ışıkla seçici olarak polimerize edilmesi ilkesine dayanır. Her katmanın polimerizasyonunun ardından üretim tablası bir katman kalınlığı kadar hareket eder ve süreç

sayısal model tamamlanana kadar tekrarlanır. Bu gruptaki üç temel teknoloji, ışık kaynağı ve ışığın reçine yüzeyine aktarılma biçimi bakımından ayrışır.

Stereolitografi (SLA): Uygun dalga boyundaki bir lazer ışınının galvanometrik aynalar aracılığıyla katman kesiti boyunca nokta nokta taranması esasına dayanır. Lazer odak çapı çözünürlüğü belirler; yüzey kalitesi ve boyutsal doğruluk yüksektir, ancak her katmanın taranması gerektiğinden büyük kesitlerde baskı süresi uzayabilir.

Dijital Işık İşleme (DLP): Işık kaynağı olarak bir projektör ve dijital mikro ayna cihazı (DMD) kullanılır; bir katmanın tamamı tek bir görüntü olarak eş zamanlı polimerize edilir. Bu nedenle baskı süresi kesit alanından büyük ölçüde bağımsızdır. Çözünürlük projektör piksel boyutuyla sınırlı olup eğimli yüzeylerde katman kenarlarına bağlı basamaklanma (*stair-stepping*) gözlenebilir. Saini ve arkadaşlarının (2024) meta-analizinde, geçici restorasyon araştırmalarında en sık kullanılan teknolojinin DLP olduğu bildirilmiştir.

LCD/MSLA (Maskeli Stereolitografi): Bir LED dizisinden gelen ışık, maske işlevi gören sıvı kristal ekrandan geçerek katman görüntüsünü oluşturur. Edinim maliyetinin düşüklüğü bu sistemleri muayenehane içi üretimde yaygınlaştırmıştır; ancak LCD ekranın ışık geçirgenliğinin sınırlı olması ve ekranın zamanla bozulması, polimerizasyon homojenliğini etkileyebilecek değişkenler olarak değerlendirilmelidir (Kirby vd., 2024).

Üç teknolojiye de polimerizasyon mekanizması serbest radikal fotopolimerizasyondur: fotobaşlatıcı (sıklıkla fosfin oksit türevleri) uygun dalga boyundaki ışığı absorbe ederek serbest radikaller üretir; bu radikaller metakrilat monomerlerinin C=C çift bağlarını açarak zincir büyümesini ve çapraz bağlanmayı başlatır. Baskı sırasında elde edilen polimerizasyon kısmidir; baskı sonrası polimerizasyon öncesindeki bu tam polimerize olmamış ara durum literatürde ham durum (green state) olarak adlandırılır. Yapı, mekanik ve biyolojik açıdan yeterli özellikleri baskı sonrası polimerizasyonla kazanır (bkz. Bölüm 3.3).

2.2. Toz Yatağı Füzyon Sistemleri

Toz yatağı füzyon teknolojilerinde ince bir toz tabakası üretim platformuna serilir ve yüksek enerjili bir lazer ışını katman kesitine karşılık gelen bölgeleri seçici olarak kaynaştırır. Seçici lazer sinterleme (SLS) partiküllerin kısmi erimeyle birbirine bağlanmasını, seçici lazer ergitme (SLM) ise metal tozunun tamamen ergitilerek yoğun bir yapı oluşturmasını ifade eder. Protetik diş tedavisinde SLM, özellikle kobalt-krom (Co-Cr) ve titanyum alaşımlarından metal-seramik altyapıların, hareketli bölümlü protez iskeletlerinin ve implant üstü çerçevelerin üretiminde kullanılmaktadır.

Bani-Younes ve arkadaşlarının (2024) 22 hastada gerçekleştirdiği klinik çalışmada, SLM ile ve 3B yazıcıyla üretilen döküm modeli aracılığıyla elde edilen üç üyeli metal-seramik sabit bölümlü protezlerin marjinal uyumu benzer bulunmuş; SLM altyapıların aksiyel ve aksiy-oklüzal bölgelerde daha geniş iç aralık gösterdiği, ancak seramik tabakalama işleminden daha az etkilendiği bildirilmiştir. Daou (2024) ise SLM ile üretilen Co-Cr sabit bölümlü protezlerde baskı açısının (0° , 30° , 45°) uyumu anlamlı düzeyde etkilediğini; en düşük uyumsuzluğun 0° grubunda, en yüksek uyumsuzluğun ise 45° grubunda görüldüğünü, ancak tüm değerlerin klinik olarak kabul edilebilir sınırlar içinde kaldığını raporlamıştır.

Seramiklerin eklemeli üretiminde ise doğrudan toz yatağı füzyonu yerine, seramik tozunun fotopolimer içinde süspanse edildiği vat polimerizasyon tabanlı yöntemler (litografi tabanlı seramik üretimi) ile materyal püskürtme yöntemleri ön plana çıkmıştır. Bu yaklaşımlarda baskı sonrası organik bağlayıcının giderilmesi (debinding) ve sinterleme aşamaları kritik öneme sahiptir (Pinelli vd., 2025).

2.3. Baskı Parametrelerinin Hassasiyet ve Mekanik Davranış Üzerine Etkisi

Eklemeli üretimde nihai ürünün özellikleri yalnızca materyale değil, baskı parametrelerine de bağlıdır. Gad ve Fouda (2023) sistematik derlemesinde, doldurucu içeriği, baskı yönü ve açısı, katman kalınlığı, baskı sonrası polimerizasyon süresi ve sıcaklığı, yıkama süresi ile yazıcı-materyal uyumluluğunun 3B yazıcıyla üretilen reçinelerin bükülme dayanımını anlamlı biçimde etkilediğini ortaya koymuştur.

Katman kalınlığı: Daha ince katmanlar ($25\text{--}50\ \mu\text{m}$) yüzey düzgünlüğünü ve boyutsal doğruluğu artırırken baskı süresini uzatır. Katman sayısının artması katmanlar arası ara yüz sayısını da artırdığından, mekanik özellikler üzerindeki etki materyale özgüdür.

Baskı açısı (0° , 45° , 90°): Katmanlı yapı, materyale anizotropik bir karakter kazandırır. Yük, katman düzlemine paralel uygulandığında kırılma katman ara yüzlerinde ilerleme eğilimindedir. de Castro ve arkadaşları (2022), dört farklı geçici reçinede 90° baskı yönünün boyutsal doğruluk açısından genel olarak en iyi sonucu verdiğini; bir yıllık suda bekletme sonrasında dikey yönde basılan SLA reçinenin en yüksek bükülme dayanımını sergilediğini göstermiştir. Benzer biçimde Altarazi ve arkadaşları (2022), protez kaide reçinesinde baskı yönünün 0° 'den 90° 'ye değiştirilmesinin bükülme dayanımını, sertliği ve dönüşüm derecesini anlamlı ölçüde artırdığını raporlamıştır. Uyum açısından ise Al-Dulaijan ve arkadaşları (2024), 260 adet üç üyeli geçici sabit bölümlü protez üzerinde baskı açısı ve baskı sonrası polimerizasyon süresinin etkisinin materyale bağlı olarak farklılaştığını; bir reçinede 0° baskı

yönünün iç uyumu iyileştirirken diğerinde tüm açılarda tutarlı sonuçlar elde edildiğini göstermiştir.

Destek yapıları: Destek çubuklarının restorasyonun hangi yüzeyine yerleştirildiği, hem marjinal bölgenin bütünlüğünü hem de destek temas noktalarında oluşan yüzey düzensizliklerini belirler. Klinik açıdan desteklerin marjinal bitim çizgisinden ve iç yüzeyden uzak, tercihen oklüzal ya da bukkal yüzeylere konumlandırılması önerilmektedir. Baskı açısı ile destek yerleşimi birbirinden bağımsız düşünülemez; 45° gibi eğimli yönlendirmeler, destek ihtiyacını dengelerken her katmanın polimerizasyondan sonra hazne tabanından ayrılması sırasında oluşan çekme kuvvetlerini de azaltır.

3. 3B YAZICILARDA KULLANILAN PROTETİK MATERYALLER VE KİMYASAL YAPILARI

3.1. Geçici Restorasyon Reçineleri

Geçici (provizyonel) restorasyon amacıyla 3B yazıcılarda kullanılan reçineler, kimyasal olarak büyük ölçüde metakrilat esaslı fotopolimerlerdir. Matriks yapısında sıklıkla bisfenol A-glisidil metakrilat (bis-GMA), üretan dimetakrilat (UDMA), trietilen glikol dimetakrilat (TEGDMA) ve çeşitli monofonksiyonel metakrilatlar yer alır. Bis-GMA, rijit aromatik çekirdeği sayesinde düşük polimerizasyon büzülmesi ve yüksek mekanik dayanım sağlarken yüksek viskozitesi nedeniyle tek başına baskı için uygun değildir. Bu nedenle UDMA gibi daha esnek ve daha düşük viskoziteli monomerler ile TEGDMA gibi seyrelticiler formülasyona eklenir. Vat polimerizasyon sistemlerinde reçinenin katmanlar arasında homojen biçimde yayılabilmesi için düşük viskozite gereklidir; bu durum doldurucu oranının konvansiyonel kompozit rezinlere kıyasla sınırlı tutulmasını gerektirebilir.

"PMMA esaslı" olarak tanımlanan bazı ürünler, gerçekte saf polimetil metakrilat değil, metakrilat oligomerlerinden oluşan fotopolimer sistemlerdir. Saini ve arkadaşları (2024), geçici restorasyon literatüründe akrilat fotopolimerler, kompozit reçineler ve metakrilat oligomer esaslı materyallerin kullanıldığını ve bükülme dayanımı değerleri arasında çok yüksek heterojenite ($I^2 = \%99$) bulunduğunu bildirmiştir. Jain ve arkadaşlarının (2022) meta-analizi ise 3B yazıcıyla üretilen geçici kron ve sabit bölümlü protez materyallerinin, frezelenmiş ve konvansiyonel geçici rezinlere kıyasla üstün mekanik fakat daha zayıf fiziksel özellikler sergilediğini; bu materyallerin uzun dönem geçici restorasyonlar için alternatif olarak kullanılabileceğini ortaya koymuştur. Alzahrani ve arkadaşları (2023) da 19 çalışmayı

kapsayan sistematik derlemelerinde, 3B yazıcıyla üretilen geçici restorasyonların daha yüksek sertlik, daha düzgün yüzey ve daha az hacimsel aşınma gösterdiğini raporlamıştır.

3.2. Daimi Restorasyon Materyalleri

Seramik dolduruculu hibrit ve nanokompozit reçineler: Son beş yılda üreticiler, silanize cam ve seramik partiküllerle güçlendirilmiş, daimi tek kron, inley, onley ve veneer endikasyonu ile piyasaya sunulan rezin matrisli seramik benzeri materyaller geliştirmiştir. Di Fiore ve arkadaşlarının (2024) iki ticari daimi kompozit reçineyi karşılaştırdığı çalışmada, kuru koşullarda bükülme dayanımı $123,4 \pm 8,7$ MPa ve $109,9 \pm 15,8$ MPa, elastik modül ise $4,2 \pm 0,3$ GPa ve $3,82 \pm 0,2$ GPa olarak ölçülmüş; 30 günlük suda bekletme sonrasında bükülme dayanımı sırasıyla 97,5 MPa ve 94,2 MPa'ya gerilemiştir. Pot ve arkadaşlarının (2024) kapsam derlemesi ve Mandurino ve arkadaşlarının (2025) sistematik derlemesi, bu materyallerin mekanik özelliklerinin eksiltmeli yöntemle üretilen kompozit bloklardan hâlâ düşük olduğunu ve uzun dönem hidrolitik bozunmanın başarısızlık riskini artırabileceğini vurgulamaktadır.

3B yazıcıyla üretilen zirkonya: Zirkonyanın eklemeli üretimi, zirkonya tozunun yüksek katı oranıyla fotopolimer içinde süspansiyon edildiği bulamaçların vat polimerizasyonla şekillendirilmesi, ardından bağlayıcının uzaklaştırılması ve sinterleme ile gerçekleştirilmektedir. Pinelli ve arkadaşları (2025), 14 çalışmayı değerlendirdikleri derlemede materyal püskürtme ve vat polimerizasyon yöntemleriyle üretilen zirkonya kronların doğruluk ve marjinal adaptasyonunun klinik olarak kabul edilebilir aralıkta ve frezelenmiş kronlara yakın olduğunu bildirmiştir. Cesar ve arkadaşları (2024) ise zirkonyanın son 15 yıllık gelişimini değerlendirdikleri derlemede, eklemeli üretim ve hızlı sinterleme alanlarında belirgin ilerleme kaydedildiğini, ancak gelişime açık önemli alanlar bulunduğunu vurgulamıştır. Robocasting gibi ekstrüzyon tabanlı yöntemlerle üretilen zirkonya ile güçlendirilmiş lösit kompozitleri de deneysel düzeyde umut verici tribolojik ve optik özellikler sergilemektedir (Branco vd., 2024).

Biyomimetik ve deneysel yapılar: Zhao ve arkadaşları (2022), hidroksiapatit nanoçubuklarının ekstrüzyon tabanlı bir baskı yöntemiyle (*direct ink writing*; akışkan malzemenin nozülünden doğrudan çekilerek biriktirilmesi) baskı yönünde hizalandığı, mineye benzer çok ölçekli düzenli mimariye sahip kompozit kronlar üretmiş; çapraz katmanlı yapının çatlak ilerlemesini keserek $134,1 \pm 3,9$ MPa bükülme dayanımı sağladığını göstermiştir.

3.3. Baskı Sonrası İşlemler ve Dönüşüm Derecesi

Baskı tamamlandığında restorasyon yüzeyinde polimerize olmamış reçine bulunur ve yapının iç kısmında da önemli miktarda reaksiyona girmemiş monomer mevcuttur. Bu nedenle baskı sonrası iş akışı iki temel aşamadan oluşur: yıkama ve baskı sonrası polimerizasyon.

Yıkama çözücüler: Yüzeydeki artık reçine, en sık izopropil alkol (IPA) ile uzaklaştırılır. Çözücü türü ve yıkama süresi kritik değişkenlerdir: yetersiz yıkama yüzeyde yapışkan bir tabaka ve sitotoksik monomer birikimi bırakırken, aşırı uzun yıkama polimer ağına çözücü difüzyonu yoluyla mikrosertliği ve boyutsal kararlılığı olumsuz etkileyebilir. Finck ve arkadaşları (2024), IPA ve mutlak etanolün üç farklı geçici reçine üzerindeki etkisini incelemiş; mikrosertlik, kırılma tokluğu ve parlaklık üzerindeki etkinin reçine türüne bağlı olarak farklılaştığını göstermiştir.

Baskı sonrası polimerizasyon süresi ve ışık şiddeti: Dönüşüm derecesi (*degree of conversion*, DC), polimerize olan C=C çift bağlarının oranını ifade eder ve mekanik özellikler, su Emilimi, renk stabilitesi ve biyouyumluluk üzerinde belirleyici rol oynar. Lee ve arkadaşları (2022), baskı sonrası polimerizasyon süresi 10 dakikaya kadar arttıkça DC'nin yükseldiğini; polimerizasyon uygulanmayan örneklerde su emiliminin daha düşük ancak çözünürlüğün belirgin biçimde daha yüksek olduğunu ve renk stabilitesinin süre arttıkça iyileştiğini raporlamıştır. Kang ve arkadaşları (2022), farklı ışık şiddetlerinde bükülme özelliklerinin ve mikrosertliğin polimerizasyonun başlangıcında keskin biçimde yükseldiğini, ardından ışık şiddeti ve süre arttıkça kademeli olarak artmaya devam ettiğini, buna karşın üç üyeli köprünün boyutsal doğruluğunun anlamlı biçimde etkilenmediğini göstermiştir.

Soto-Montero ve arkadaşları (2022), dört geçici reçinede bükülme dayanımının materyale bağlı olarak 5–10 dakikalık polimerizasyondan sonra plato değerine ulaştığını; daha uzun sürelerin ise bazı reçinelerde kabul edilebilirlik eşiğini aşan renk değişimlerine yol açtığını bildirmiştir. Siqueira ve arkadaşları (2024) ise FT-IR analizinde bir geçici reçinenin yüzeyinde yaklaşık %46, merkezinde ise %37 DC saptamış; en yüksek bükülme dayanımının 32 dakika ve 1 saatlik polimerizasyon gruplarında elde edildiğini göstermiştir. Bu bulgu, restorasyon kalınlığı boyunca polimerizasyonun homojen olmadığını ve kalın kesitlerde merkezdeki artık monomer yükünün klinik açıdan dikkate alınması gerektiğini düşündürmektedir.

Polimerizasyon cihazının türü de sonuçları etkileyebilir. Lassila ve arkadaşları (2024), farklı baskı sonrası polimerizasyon cihazları ve 150 °C ısı polimerizasyon karşılaştırmasında

üreticinin önerdiği cihazın en yüksek bükülme dayanımını ve en düşük aşınma derinliğini sağladığını bildirmiştir. Kirby ve arkadaşları (2024) ise model reçinesi üzerinde cihaz türünün DC'yi anlamlı biçimde değiştirmedeğini, ancak polimerizasyon süresinin (15 ve 45 dakika) anlamlı fark yarattığını göstermiştir. Sonuç olarak, baskı sonrası işlem protokolünün materyale özgü olduğu ve üretici talimatlarından sapılmaması gerektiği literatürde tutarlı biçimde vurgulanmaktadır (Atria vd., 2022).

4. MEKANİK ÖZELLİKLERİN GÜNCEL LİTERATÜR IŞIĞINDA DEĞERLENDİRİLMESİ

4.1. Bükülme Dayanımı ve Elastik Modül

Bükülme dayanımı, protetik restorasyonların özellikle köprü gövdesi ve konnektör bölgelerinde maruz kaldığı çekme ve basma gerilmelerinin birleşik etkisini yansıttığı için en sık değerlendirilen mekanik parametredir. ISO 4049 ve ISO 10477 standartlarına göre üç nokta bükme testiyle ölçülür. Elastik modül ise materyalin rijitliğini gösterir; dentine yakın (yaklaşık 15–20 GPa) bir modül, gerilmenin restorasyon–diş ara yüzünde daha dengeli dağılmasını sağlar.

Geçici reçinelerde bulgular heterojendir. Ribeiro ve arkadaşları (2023), 3B yazıcıyla üretilen geçici kron materyalinin mini-bükülme dayanımını ($49,87 \pm 7,55$ MPa) bis-akril ($118,23 \pm 16,26$ MPa) ve diğer konvansiyonel materyallerin altında bulmuş; ancak 10.000 devirlik termal döngünün diğer tüm materyallerde dayanımı düşürürken 3B yazıcıyla üretilen reçinede anlamlı bir düşüşe yol açmadığını göstermiştir. Atria ve arkadaşları (2022), üç ticari geçici reçine ve bir deneysel daimi reçineyi karşılaştırdıkları Weibull analizinde, daimi amaçlı reçinenin 250 MPa yük altında %35 sağkalım olasılığına ulaştığını, geçici reçinelerin ise %10'un altında kaldığını raporlamıştır. de Castro ve arkadaşları (2022) da 3B yazıcıyla üretilen tüm geçici reçinelerin elastik modülünün, baskı yönünden ve yaşlandırma süresinden bağımsız olarak frezelenmiş PMMA kontrol grubunun altında kaldığını göstermiştir.

Daimi kompozit reçinelerde bükülme dayanımı genellikle 100–130 MPa, elastik modül ise 3,5–4,5 GPa aralığında rapor edilmektedir (Di Fiore vd., 2024). Bu modül değerleri dentinin oldukça altındadır; bu durum, düşük modüllü restorasyonun fonksiyonel yük altında daha fazla deforme olması ve adeziv ara yüzde gerilme yoğunlaşması anlamına gelebilir. Öte yandan daha düşük modül, kırılğan seramiklere kıyasla daha sünek bir davranış sunar. Nam ve arkadaşları (2024), yüzey glazürünün 3B yazıcıyla üretilen daimi reçinelerde bükülme

dayanımını ve Vickers sertliğini anlamlı biçimde artırdığını göstererek, yüzey işleminin mekanik performansın da bir belirleyicisi olduğunu ortaya koymuştur.

4.2. Aşınma Direnci ve Antagonist Doğal Diş Aşınması

Restoratif materyalin ideal aşınma davranışı, kendisinin mineye benzer hızda aşınması ve karşıt doğal dişte aşırı aşınmaya yol açmamasıdır. Bora ve arkadaşları (2025), %50 doldurucu içeren ve 3B yazıcıyla üretilen bir kron materyalini lityum disilikat ile karşılaştırdıkları in vitro çalışmada, 400.000 çiğneme döngüsü boyunca hem materyal aşınmasının hem de antagonist mine aşınmasının lityum disilikatta tüm ölçüm aralıklarında daha yüksek olduğunu bildirmiştir. Aynı çalışmada, 1,2 mm oklüzal kalınlıkta üretilip rezin simanla adeziv olarak yapıştırılan onleyler 2 milyon döngümlük yorgunluk testinde çatlak göstermemiş; kırılma yükleri (2574 ± 303 N ve 2396 ± 277 N) arasında anlamlı fark bulunmamıştır.

Bununla birlikte materyalin aşınma direnci, doldurucu oranı ve tipiyle doğrudan ilişkilidir. Gentle ve arkadaşları (2026), ISO/TS 14569-2 protokolüne göre gerçekleştirdikleri çiğneme simülasyonunda, doldurucu oranı yüksek ve 3B yazıcıyla üretilen reçinenin doğrusal aşınmasının çift çapraz bağlı PMMA protez dişlerinden farklı olmadığını, ancak "hibrit seramik" olarak tanımlanan başka bir reçinenin en yüksek doğrusal (0,515 mm) ve hacimsel ($1,841 \text{ mm}^3$) aşınmayı gösterdiğini; tüm yapay materyallerin mineden daha fazla aşındığını raporlamıştır. Lassila ve arkadaşları (2024) ise baskı sonrası işlem koşullarının aşınma derinliğini anlamlı biçimde etkilediğini göstermiştir. Klinik açıdan, 3B yazıcıyla üretilen reçine restorasyonların antagonist mineye karşı koruyucu olduğu, ancak brüksizm gibi yüksek yük koşullarında kendi aşınmalarının zamanla oklüzal temasları değiştirebileceği göz önünde bulundurulmalıdır.

4.3. Marjinal ve İç Uyum

Marjinal uyum; siman çözünmesi, mikrosızıntı, sekonder çürük ve periodontal inflamasyon riskiyle ilişkili önemli bir klinik parametredir. Marjinal aralık değerlerinin yorumlanmasında tek bir evrensel klinik eşik bulunmamakla birlikte, daha düşük ve homojen aralık değerleri genel olarak daha olumlu kabul edilmektedir. Güncel çalışmalar, 3B yazıcıyla üretilen restorasyonların uyumunun materyal, üretim yöntemi, baskı parametreleri ve baskı sonrası işlemlerden belirgin biçimde etkilendiğini göstermektedir.

Zirkonya kronlarda Abualsaud ve Alalawi (2022), 3B yazıcıyla üretilen ve frezelenmiş 3Y-TZP kronların iç ve marjinal uyumunun benzer olduğunu; buna karşılık 3B yazıcıyla üretilen kronların genel kesinliğinin (precision) anlamlı biçimde daha iyi olduğunu ($9,59 \pm 0,75 \text{ } \mu\text{m}$ ve

17,31 $\pm$ 3,39 μm) göstermiştir. Doğruluk (trueness) açısından ise oklüzal ve aksiyel yüzeylerde 3B baskı, iç yüzeyde ise frezeleme daha başarılı bulunmuştur. Pinelli ve arkadaşları (2025) da 3B yazıcıyla üretilen zirkonya kronların marjinal adaptasyonunun klinik olarak kabul edilebilir aralıkta olduğunu bildirmiştir.

Geçici restorasyonlarda uyum, baskı açısı ve polimerizasyon süresine duyarlıdır; Al-Dulaijan ve arkadaşları (2024) daha uzun polimerizasyon sürelerinin genellikle marjinal uyumu iyileştirdiğini ve iki reçine arasında genel uyum açısından tutarlı farklar bulunduğunu raporlamıştır. Metal altyapılarda ise SLM ile üretilen Co-Cr yapıların marjinal uyumunun döküm yöntemleriyle benzer olduğu, ancak baskı açısının uyumu etkilediği gösterilmiştir (Bani-Younes vd., 2024; Daou, 2024).

4.4. Renk Stabilitesi, Yaşlandırma, Su Emilimi ve Çözünürlük

Polimer esaslı restorasyonların ağız ortamındaki uzun dönem davranışını belirleyen önemli etkenlerden biri su ile etkileşimdir. Su emilimi polimer ağının plastikleşmesine, matriks-doldurucu ara yüzünde hidrolitik bozunmaya ve buna bağlı olarak mekanik özelliklerin azalmasına yol açabilir; çözünürlük ise artık monomer ve diğer bileşenlerin ortama salınımını yansıtır. Di Fiore ve arkadaşları (2024) iki daimi kompozit reçinede 21 günlük su emilimini 11,52 ve 12,43 $\mu\text{g}/\text{mm}^3$, 28 günlük çözünürlüğü ise 1,36 ve 0,98 $\mu\text{g}/\text{mm}^3$ olarak ölçmüş ve yaşlandırmanın bükülme dayanımını her iki materyalde de düşürdüğünü göstermiştir. Lassila ve arkadaşları (2024) hızlandırılmış hidrotermal yaşlandırmanın bükülme dayanımını anlamlı biçimde azalttığını raporlamıştır.

Renk stabilitesi, dönüşüm derecesi ile yakından ilişkilidir. Lee ve arkadaşları (2022), kahve ve kırmızı şarapta bekletilen örneklerde baskı sonrası polimerizasyon süresi arttıkça renk değişiminin (ΔE) azaldığını göstermiştir. Ancak Soto-Montero ve arkadaşları (2022), aşırı polimerizasyonun bazı reçinelerde kendiliğinden kabul edilemez renk değişimine yol açabileceğine dikkat çekmiştir. Jain ve arkadaşlarının (2022) meta-analizinde 3B yazıcıyla üretilen geçici materyallerin fiziksel özellikleri (renk stabilitesi, su emilimi ve çözünürlük dâhil) konvansiyonel ve frezelenmiş materyallere kıyasla daha zayıf bulunmuştur. Bu veriler, 3B yazıcıyla üretilen reçine restorasyonların estetik açıdan kritik bölgelerde uzun dönem kullanımında dikkatli olunması gerektiğini göstermektedir.

5. BİYOUYUMLULUK VE DOKU ETKİLEŞİMLERİ

5.1. Biyolojik Güvenlik ve Materyale Özgü Standartlar

Diş hekimliğinde kullanılan tıbbi cihazların biyolojik değerlendirmesi ISO 10993 serisi standartlarına göre yürütülür. Bu serinin 5. bölümü (ISO 10993-5) in vitro sitotoksikite testlerini tanımlar; genellikle materyal ekstraktları ya da doğrudan temas yöntemleriyle fibroblast veya epitel hücre hatlarında hücre canlılığı ölçülür ve canlılığın %70'in altına düşmesi sitotoksik potansiyelin göstergesi olarak kabul edilir. ISO 22674 ise sabit ve hareketli protezlerde kullanılan metalik materyallerin sınıflandırılmasını, mekanik gereksinimlerini ve korozyon davranışını düzenler; SLM ile üretilen Co-Cr ve titanyum altyapıların bu standarda uygunluğu, üretim yönteminden bağımsız olarak sağlanmalıdır. Polimer esaslı restoratif materyaller için ise ISO 4049 su emilimi ve çözünürlük açısından referans alınmaktadır.

Vat polimerizasyon reçinelerinin biyolojik güvenliği, materyalin kimyasal bileşiminin yanı sıra üretim ve baskı sonrası işlem koşullarına da bağlıdır. Üretici tarafından biyouyumluluk sertifikası alınmış bir reçine, uygun olmayan yazıcıda, yetersiz yıkama veya eksik polimerizasyonla işlendiğinde sertifikasyon koşullarını karşılamayabilir. Atria ve arkadaşları (2022), üretici iş akışına uygun biçimde üretilen üç geçici ve bir deneysel daimi reçinede hücre proliferasyonu ve sitotoksikite açısından anlamlı fark bulunmadığını; ancak alternatif baskı ve baskı sonrası yöntemlerin literatürde yeterli kanıt oluşana kadar kullanılmaması gerektiğini vurgulamıştır.

5.2. Artık Monomer Salınımının Diş Eti Epitel Hücreleri ve Fibroblastlar Üzerindeki Etkileri

Polimerize olmamış metakrilat monomerleri ve katkı maddeleri (fotobaşlatıcılar, inhibitörler), tükürük ortamına salındığında gingival fibroblastlar ve epitel hücreleri üzerinde sitotoksik, genotoksik ve inflamatuvar etkiler oluşturabilir. TEGDMA ve HEMA gibi düşük molekül ağırlıklı monomerler, yüksek difüzyon kapasiteleri nedeniyle özellikle önemlidir; bu monomerlerin hücre içi glutatyon tüketimi ve reaktif oksijen türlerinin artışı yoluyla apoptozu tetiklediği bilinmektedir.

Wedekind ve arkadaşları (2021), 3B yazıcıyla üretilen, frezelenmiş ve konvansiyonel PMMA esaslı oklüzal splint materyallerinden salınan bileşikler gaz kromatografisi/kütle spektrometrisi ile analiz etmiştir. Su ortamında yalnızca 3B yazıcıyla üretilen materyalden tetrahidrofurfuril metakrilat (THFMA) salınımı saptanmış (72 saatte 7,47 µmol/L) ve bu değer insan gingival fibroblastları için hesaplanan sitotoksik eşiğin altında kalmıştır; ancak

metanol eluatlarında tüm materyallerden salınan bileşikler, gerçek splint boyutları esas alınan en kötü senaryo hesaplamasında sitotoksik konsantrasyonları aşmıştır. Bu bulgu, restorasyon hacmi ve yüzey alanının monomer yükü değerlendirmesinde dikkate alınması gerektiğini göstermektedir.

Baskı sonrası polimerizasyon süresinin biyolojik yanıt üzerindeki etkisi, 2026 yılında yayımlanan bir çalışmada ayrıntılı biçimde incelenmiştir. Dinescu ve arkadaşları (2026), iki protez kaide reçinesinde insan gingival fibroblastlarının doğrudan temas ve eluat yöntemleriyle değerlendirildiği çalışmada, doğrudan temasta metabolik aktivitenin kontrol grubuna göre azaldığını; uzatılmış polimerizasyonun bir reçinede metabolik aktiviteyi iyileştirip apoptotik sinyalleri (kaspaz-3/7) azalttığını, diğer reçinede ise yanıtın daha az tutarlı olduğunu göstermiştir. Araştırmacılar, sitotoksitenin yalnızca tükürükte çözünen artık monomerler üzerinden değil, baskı parametreleriyle birlikte değerlendirilmesi gerektiğini vurgulamıştır.

Yüzey işlemleri de biyolojik yanıtı etkiler. Nam ve arkadaşları (2024), glazür uygulanmış ve 3B yazıcıyla üretilen daimi reçine yüzeylerinde protein adsorpsiyonunun azaldığını ve hücre canlılığının arttığını bildirmiştir. Bu bulgu, glazür tabakasının hem artık monomer salınımına karşı bir bariyer hem de daha düzgün bir yüzey oluşturduğunu düşündürmektedir.

5.3. Yüzey Pürüzlülüğü, Polisaj Protokolleri ve Mikrobiyal Adezyon

Yüzey pürüzlülüğü (Ra), mikrobiyal tutulum ve biyofilm oluşumunu etkileyen önemli yüzey özelliklerinden biridir. 3B yazıcıyla üretilen restorasyonlarda katman çizgileri, destek temas noktaları ve doldurucu partiküllerinin yüzeyde açığa çıkması pürüzlülüğü artırabilir; bu nedenle yüzeyin mümkün olduğunca düzgün hâle getirilmesi ve materyale uygun mekanik polisaj ve/veya ışıkla polimerize olan glazür protokollerinin uygulanması önerilmektedir.

Ribeiro ve arkadaşları (2023), 3B yazıcıyla üretilen geçici kron materyalini konvansiyonel akrilik, kompozit, bis-akril ve CAD/CAM rezinlerle karşılaştırmış; termal döngünün yüzey pürüzlülüğünü etkilemediğini, mikro-BT analizinde porozitenin en yüksek bis-akril ve akrilik rezinlerde olduğunu ve Candida albicans adezyonunun en yüksek kompozit rezinde gözlemlendiğini raporlamıştır. Araştırmacılar, 3B yazıcıyla üretilen reçinelerin iyi mekanik özellikleri ve düşük fungal adezyonu nedeniyle klinik uygulamalar için umut verici olduğu sonucuna varmıştır. Streptococcus mutans açısından ise CAD/CAM rezin esaslı blok materyallerde yapılan çalışmalar, yüzey pürüzlülüğü (0,144–0,264 µm Ra), temas açısı ve yüzey serbest enerjisi farklılıklarına rağmen bakteriyel adezyonun materyaller arasında sınırlı

farklılık gösterdiğini ortaya koymuştur (Barutçugil vd., 2024). Bu veriler, yüzey pürüzlülüğünün tek başına belirleyici olmadığını, yüzey kimyası ve hidrofobisitenin de mikrobiyal adezyonda rol oynadığını göstermektedir.

Klinik açıdan önerilen polisaj protokolü; destek kalıntılarının tungsten karbür frezlerle uzaklaştırılması, ardından kaba-orta-ince grenli silikon polisaj lastikleri ve elmas içerikli polisaj patlarıyla yüksek parlaklık elde edilmesi ya da üretici tarafından önerilen ışıkla polimerize olan glazürün oksijen inhibisyon tabakası oluşmayacak koşullarda (örneğin gliserin jel altında veya azot atmosferinde) uygulanması şeklinde özetlenebilir.

6. KLİNİK UYGULAMALAR VE GELECEK VİZYONU

6.1. Klinik Kanıt Düzeyi ve İzlem Sonuçları

3B yazıcıyla üretilen restorasyonların klinik değerlendirmesinde FDI ve modifiye USPHS kriterleri temel alınmakta; estetik (renk uyumu, yüzey parlaklığı), fonksiyonel (kırılma, retansiyon, marjinal adaptasyon, oklüzal aşınma) ve biyolojik (sekonder çürük, periodontal yanıt, hassasiyet) parametreler birlikte ele alınmaktadır. Laboratuvar verilerinin genişliğine karşın randomize kontrollü klinik çalışmaların sayısı hâlâ sınırlıdır ve mevcut çalışmaların izlem süreleri çoğunlukla 12 ayı aşmamaktadır.

Mevcut klinik kanıtın önemli bir bölümü süt dişi restorasyonlarından gelmektedir. Lee ve arkadaşlarının (2024) çok merkezli randomize kontrollü çalışmasında, pulpa tedavisi uygulanmış süt azı dişlerinde 3B yazıcıyla üretilen reçine kronlar paslanmaz çelik kronlarla karşılaştırılmış; 12 ayda reçine kronların sağkalım oranı %82,1, paslanmaz çelik kronlarındaki %100 bulunmuştur. Bu çalışmayı değerlendiren kanıt özeti, reçine kron grubunda çatlak, renklenme ve daha belirgin oklüzal aşınma gibi sorunlara dikkat çekmiştir (Tiplady & Karia, 2024). Abbas ve arkadaşlarının (2025) randomize kontrollü çalışmasında ise pulpotomi uygulanmış süt azı dişlerinde 3B yazıcıyla üretilen endokronlar ile prefabrike zirkonya kronlar arasında 12 aylık sağkalım süresi açısından anlamlı fark bulunmamış ve her iki grupta klinik başarı oranı %64,3 olarak raporlanmıştır. Bununla birlikte bu pedodontik verilerin erişkin protetik restorasyonlara doğrudan genellenemeyeceği dikkate alınmalıdır.

Zirkonya restorasyonlar açısından Dewan (2023), sistematik derleme ve meta-analizinde 3B yazıcıyla üretilen zirkonya kronlara ilişkin klinik çalışma bulunmadığını, karşılaştırmanın in vitro çalışmalar üzerinden yapılabildiğini ve frezelenmiş zirkonya kronların daha yüksek performans ve tatmin edici klinik sağkalım gösterdiğini bildirmiştir. Daimi reçine restorasyonlar için de durum benzerdir: güncel derlemeler, uzun dönem in vivo çalışmalara ve

klirik araştırmalara gereksinim olduğunu vurgulamaktadır (Mandurino vd., 2025; Pot vd., 2024).

Bu kanıt düzeyi çerçevesinde, 3B yazıcıyla üretilen materyallerin güncel klinik endikasyonları řu şekilde özetlenebilir:

- Klinik kullanımı daha yerleşik olan uygulamalar: Kısa ve orta dönem geçici kron ve köprüler, tanısal mock-up uygulamaları, çalışma modelleri ve cerrahi rehberler.
- Kanıtı gelişmekte olan uygulamalar: Uzun dönem geçici restorasyonlar, tek üyeli daimi kompozit reçine kron ve onleyler, kişiye özel post-kor yapıları ve SLM ile üretilen metal altyapılar.
- Deneysel veya sınırlı kanıta sahip uygulamalar: 3B yazıcıyla üretilen zirkonya kronlar, çok üyeli daimi reçine köprüler ve fonksiyonel derecelendirilmiş (gradyanlı) restorasyonlar.

6.2. 4D Baskı ve Akıllı Materyaller

4D baskı, 3B yazıcıyla üretilen bir yapının sıcaklık, nem, pH, ışık veya manyetik alan gibi dış uyaranlara yanıt olarak zamanla şeklini ya da işlevini programlanmış biçimde değiştirebilmesini ifade eder; dördüncü boyut "zaman"dır (Javaid vd., 2022). şekil hafızalı polimerler ve hidrojeller bu alanın temel materyalleridir. Protetik diş tedavisi açısından olası uygulamalar arasında ağız sıcaklığında adaptasyonu artan protez kaideleri, nem veya pH değişimine yanıt olarak antimikrobiyal ajan salan restorasyonlar ve marjinal aralığı kapatabilen kendini onaran reçineler sayılabilir. Ancak bu uygulamalar henüz kavram kanıtı düzeyindedir; materyallerin biyouyumluluğu, uzun dönem mekanik kararlılığı ve uyarana yanıt kinetiğinin ağız ortamında öngörülebilirliği yanıtlanması gereken temel sorulardır.

6.3. Çoklu Materyal Yazıcılar ve Fonksiyonel Derecelendirilmiş Restorasyonlar

Doğal diş, mine ve dentinden oluşan, mekanik ve optik özellikleri yapı boyunca derecelendirilmiş bir biyokompozittir. Çoklu materyal yazıcılar, tek bir baskı işleminde farklı renk, translüsensi ve elastik modüle sahip materyallerin birleştirilmesine olanak tanıyarak bu doğal yapının taklit edilmesini hedefler. Materyal püskürtme teknolojileri bu alanda öncüdür. Zirkonya alanında, bloğun alt katmanlarında daha dayanıklı 3Y-TZP ve üst katmanlarında daha translüsent 5Y-PSZ bulunan çok katmanlı yapılar frezeleme için hâlihazırda mevcuttur (Cesar vd., 2024); eklemeli üretimin bu derecelendirmeyi katman düzeyinde kontrol edebilmesi, gelecekte kişiye özel optik ve mekanik profil tasarımına imkân tanıyabilir. Hidroksiapatit nanoçubuklarının baskı yönünde hizalanmasıyla mine benzeri mimari oluşturulması da bu vizyonun erken örneklerindendir (Zhao vd., 2022).

Bunlara ek olarak, yapay zekâ destekli baskı parametresi optimizasyonu, antibakteriyel kaplamalarla (Branco vd., 2024) işlevselleştirilmiş yüzeyler ve yazıcı–reçine–polimerizasyon cihazı uyumluluğunu standartlaştıracak kalite kontrol protokolleri, eklemeli üretimin daimi restorasyonlarda yaygınlaşmasının önündeki engelleri azaltacak gelişmeler olarak öne çıkmaktadır.

7. SONUÇ

Eklemeli üretim teknolojileri, protetik diş tedavisinde materyal tasarrufu, karmaşık geometrilerin üretilebilirliği, eş zamanlı çoklu üretim ve muayenehane içi iş akışı olanakları sayesinde dijital üretimin önemli bir bileşeni hâline gelmiştir. 2021-2026 yılları arasında yayımlanan literatür, 3B yazıcıyla üretilen geçici restorasyon reçinelerinin konvansiyonel ve frezelenmiş materyallere kıyasla yeterli, hatta bazı parametrelerde üstün mekanik özellikler sergilediğini ve uzun dönem geçici restorasyonlar için güvenilir bir alternatif oluşturduğunu göstermektedir. Buna karşın renk stabilitesi, su emilimi ve çözünürlük gibi fiziksel özellikler ise başlıca sınırlılıklar arasında yer almaktadır.

Daimi restorasyon amaçlı seramik dolduruculu reçineler, antagonist mineye karşı görece olumlu aşınma davranışı ve kabul edilebilir yorgunluk dayanımı sunmakla birlikte, bükülme dayanımı ve elastik modül açısından eksiltmeli yöntemle üretilen blokların gerisinde kalabilmekte ve hidrolitik yaşlanmaya duyarlılık gösterebilmektedir. 3B yazıcıyla üretilen zirkonya, in vitro uyum ve kesinlik açısından frezelenmiş zirkonyaya yaklaşmış olsa da klinik kanıt henüz sınırlıdır. SLM ile üretilen metal altyapılar ise klinik olarak kabul edilebilir uyum değerleriyle daha yerleşik bir teknoloji niteliğindedir.

Bu bölümde incelenen kanıtlar, 3B yazıcıyla üretilen restorasyonların performansının materyal özelliklerinin yanı sıra üretim sürecinden de önemli ölçüde etkilendiğini göstermektedir. Baskı açısı, katman kalınlığı, destek yerleşimi, yıkama çözücüsü ve süresi ile baskı sonrası polimerizasyon süresi ve ışık şiddeti; dönüşüm derecesini ve buna bağlı olarak mekanik dayanımı, boyutsal doğruluğu, renk stabilitesini ve artık monomer kaynaklı biyolojik yanıtı etkileyebilmektedir. Bu nedenle klinisyen ve diş teknisyenleri açısından temel yaklaşım; üretici tarafından doğrulanmış yazıcı–reçine–polimerizasyon cihazı kombinasyonuna ve iş akışına uyulması, restorasyon yüzeylerinin materyale uygun biçimde polisajlanması veya glazürlenmesidir.

Gelecekte uzun dönemli randomize kontrollü klinik çalışmalar, standardize test protokolleri, çoklu materyal ve fonksiyonel derecelendirilmiş baskı ile 4D akıllı materyaller alanındaki

gelişmeler, eklemeli üretimin geçici restorasyonlardan daimi protetik tedavilere güvenle taşınmasını belirleyecek temel unsurlar olacaktır.

KAYNAKÇA

- Abbas, L. H., Wassel, M. O., Hassan, I. T., El-Dimeery, A. G., & Elghazawy, R. K. (2025). 3D printed endocrowns versus prefabricated zirconia crowns for pulpotomized primary molars: A randomized controlled trial. *Journal of Dentistry*, 153, 105556. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2025.105556>
- Abualsaud, R., & Alalawi, H. (2022). Fit, precision, and trueness of 3D-printed zirconia crowns compared to milled counterparts. *Dentistry Journal*, 10(11), 215. <https://doi.org/10.3390/dj10110215>
- Al-Dulaijan, Y. A., Aldamanhori, R., Algaoud, H., Alshubaili, R., Alkhateeb, R., Alalawi, H., Abualsaud, R., Alqarawi, F. K., Al-Qarni, F. D., & Gad, M. M. (2024). Internal and marginal fits of 3D-printed provisional prostheses: Comparative effect of different printing parameters. *Frontiers in Oral Health*, 5, 1491984. <https://doi.org/10.3389/froh.2024.1491984>
- Altarazi, A., Haider, J., Alhotan, A., Silikas, N., & Devlin, H. (2022). Assessing the physical and mechanical properties of 3D printed acrylic material for denture base application. *Dental Materials*, 38(12), 1841–1854. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2022.09.006>
- Alzahrani, S. J., Hajjaj, M. S., Azhari, A. A., Ahmed, W. M., Yeslam, H. E., & Carvalho, R. M. (2023). Mechanical properties of three-dimensional printed provisional resin materials for crown and fixed dental prosthesis: A systematic review. *Bioengineering*, 10(6), 663. <https://doi.org/10.3390/bioengineering10060663>
- Atria, P. J., Bordin, D., Marti, F., Nayak, V. V., Conejo, J., Benalcázar Jalkh, E., Witek, L., & Sampaio, C. S. (2022). 3D-printed resins for provisional dental restorations: Comparison of mechanical and biological properties. *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry*, 34(5), 804–815. <https://doi.org/10.1111/jerd.12888>
- Bani-Younes, S. A., Al Fodeh, R. S., Khasawneh, L., & Tabnjh, A. (2024). Clinical internal and marginal fit of metal-ceramic fixed dental prostheses fabricated with selective laser melting and 3D-printed pattern casting using cobalt-chromium metal alloy. *Journal of Prosthodontics*, 33(9), 861–868. <https://doi.org/10.1111/jopr.13949>
- Barutçugil, Ç., Tayfun, D., Çetin Tuncer, N., & DüNDAR, A. (2024). Bacterial adhesion and surface properties of computer-aided design-computer-aided manufacturing restorative materials. *Journal of Oral Science*, 66(3), 157–162. <https://doi.org/10.2334/josnurd.24-0056>

- Bora, P. V., Lawson, N. C., Givan, D. A., Arce, C., & Roberts, H. (2025). Enamel wear and fatigue resistance of 3D printed resin compared with lithium disilicate. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 133(2), 523.e1–523.e9.
<https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2024.10.024>
- Branco, A. C., Santos, T., Bessa, L. J., Barahona, I., Polido, M., Colaço, R., Serro, A. P., & Figueiredo-Pina, C. G. (2024). Optimized 3D printed zirconia-reinforced leucite with antibacterial coating for dental applications. *Dental Materials*, 40(4), 629–642.
<https://doi.org/10.1016/j.dental.2024.02.021>
- Cesar, P. F., Miranda, R. B. P., Santos, K. F., Scherrer, S. S., & Zhang, Y. (2024). Recent advances in dental zirconia: 15 years of material and processing evolution. *Dental Materials*, 40(5), 824–836. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2024.02.026>
- Çelik Öge, S., Küden, C., & Ekren, O. (2024). Evaluation of the mechanical properties of 3D-printed post and core systems. *The International Journal of Prosthodontics*, 37(7), 127–131. <https://doi.org/10.11607/ijp.8860>
- Daou, E. E. (2024). Does the build orientation parameter affect the fit of fixed partial dentures fabricated by additive manufacturing? *The International Journal of Prosthodontics*, 37(7), 41–47. <https://doi.org/10.11607/ijp.8343>
- de Castro, E. F., Nima, G., Rueggeberg, F. A., & Giannini, M. (2022). Effect of build orientation in accuracy, flexural modulus, flexural strength, and microhardness of 3D-printed resins for provisional restorations. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 136, 105479. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2022.105479>
- Dewan, H. (2023). Clinical effectiveness of 3D-milled and 3D-printed zirconia prosthesis: A systematic review and meta-analysis. *Biomimetics*, 8(5), 394.
<https://doi.org/10.3390/biomimetics8050394>
- Di Fiore, A., Stellini, E., Alageel, O., & Alhotan, A. (2024). Comparison of mechanical and surface properties of two 3D printed composite resins for definitive restoration. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 132(4), 839.e1–839.e7.
<https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2024.07.003>
- Dinescu, M., Vasilescu, V. G., Ciocan, L. T., Voicu-Balasea, B., Țâncu, A. M. C., Ripszky, A., Miculescu, F., Răuță, S.-A., Cârstea, A.-E., Pantea, M., & Imre, M. (2026). Evaluation of post-processing time's influence on biocompatibility of 3D-printed

- denture base resins. *Journal of Functional Biomaterials*, 17(4), 188.
<https://doi.org/10.3390/jfb17040188>
- Finck, N. S., Fraga, M. A. A., Correr, A. B., Dalmaschio, C. J., Rodrigues, C. S., & Moraes, R. R. (2024). Effects of solvent type and UV post-cure time on 3D-printed restorative polymers. *Dental Materials*, 40(3), 451–457.
<https://doi.org/10.1016/j.dental.2023.12.005>
- Gad, M. M., & Fouda, S. M. (2023). Factors affecting flexural strength of 3D-printed resins: A systematic review. *Journal of Prosthodontics*, 32(S1), 96–110.
<https://doi.org/10.1111/jopr.13640>
- Gentle, M., Alsahafi, T., Bashiri, R., Abreu-Serrano, A., & Sulaiman, T. A. (2026). Wear resistance of additive-manufactured denture teeth following mastication simulation. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 135(2), 390.e1–390.e7.
<https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2025.09.026>
- Jain, S., Sayed, M. E., Shetty, M., Alqahtani, S. M., Al Wadei, M. H. D., Gupta, S. G., Othman, A. A. A., Alshehri, A. H., Alqarni, H., Mobarki, A. H., Motlaq, K., Bakmani, H. F., Zain, A. A., Hakami, A. J., & Sheayria, M. F. (2022). Physical and mechanical properties of 3D-printed provisional crowns and fixed dental prosthesis resins compared to CAD/CAM milled and conventional provisional resins: A systematic review and meta-analysis. *Polymers*, 14(13), 2691.
<https://doi.org/10.3390/polym14132691>
- Javaid, M., Haleem, A., Singh, R. P., Rab, S., Suman, R., & Kumar, L. (2022). Significance of 4D printing for dentistry: Materials, process, and potentials. *Journal of Oral Biology and Craniofacial Research*, 12(3), 388–395.
<https://doi.org/10.1016/j.jobcr.2022.05.002>
- Kang, M.-J., Lim, J.-H., Lee, C.-G., & Kim, J.-E. (2022). Effects of post-curing light intensity on the mechanical properties and three-dimensional printing accuracy of interim dental material. *Materials*, 15(19), 6889. <https://doi.org/10.3390/ma15196889>
- Kirby, S., Pesun, I., Nowakowski, A., & França, R. (2024). Effect of different post-curing methods on the degree of conversion of 3D-printed resin for models in dentistry. *Polymers*, 16(4), 549. <https://doi.org/10.3390/polym16040549>

- Lassila, L., Mangoush, E., He, J., Vallittu, P. K., & Garoushi, S. (2024). Effect of post-printing conditions on the mechanical and optical properties of 3D-printed dental resin. *Polymers*, 16(12), 1713. <https://doi.org/10.3390/polym16121713>
- Lee, E.-H., Ahn, J.-S., Lim, Y.-J., Kwon, H.-B., & Kim, M.-J. (2022). Effect of post-curing time on the color stability and related properties of a tooth-colored 3D-printed resin material. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 126, 104993. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2021.104993>
- Lee, K. E., Kang, H. S., Shin, S. Y., Lee, T., Lee, H.-S., & Song, J. S. (2024). Comparison of three-dimensional printed resin crowns and preformed stainless steel crowns for primary molar restorations: A randomized controlled trial. *The Journal of Clinical Pediatric Dentistry*, 48(3), 59–67. <https://doi.org/10.22514/jocpd.2024.060>
- Mandurino, M., Cortili, S., Coccoluto, L., Greco, K., Cantatore, G., Gherlone, E. F., Vichi, A., & Paolone, G. (2025). Mechanical properties of 3D printed vs. subtractively manufactured composite resins for permanent restorations: A systematic review. *Materials*, 18(5), 985. <https://doi.org/10.3390/ma18050985>
- Nam, N.-E., Hwangbo, N.-K., & Kim, J.-E. (2024). Effects of surface glazing on the mechanical and biological properties of 3D printed permanent dental resin materials. *Journal of Prosthodontic Research*, 68(2), 273–282. https://doi.org/10.2186/jpr.JPR_D_22_00261
- Nejat, A. H. (2025). Overview of current dental ceramics. *Dental Clinics of North America*, 69(2), 155–171. <https://doi.org/10.1016/j.cden.2024.11.001>
- Pinelli, L. A. P., Ferreira, I., & Cândido dos Reis, A. (2025). Accuracy and adaptation of 3D printed zirconia crowns: A review of current methodologies. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 134(6), 2146–2155. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2025.01.027>
- Pot, G. J., Van Overschelde, P. A., Keulemans, F., Kleverlaan, C. J., & Tribst, J. P. M. (2024). Mechanical properties of additive-manufactured composite-based resins for permanent indirect restorations: A scoping review. *Materials*, 17(16), 3951. <https://doi.org/10.3390/ma17163951>
- Ribeiro, A. K. C., de Freitas, R. F. C. P., de Carvalho, I. H. G., de Miranda, L. M., da Silva, N. R., de Fátima Dantas de Almeida, L., Zhang, Y., da Fonte Porto Carreiro, A., & de Assunção e Souza, R. O. (2023). Flexural strength, surface roughness, micro-CT analysis, and microbiological adhesion of a 3D-printed temporary crown material.

- Clinical Oral Investigations*, 27(5), 2207–2220. <https://doi.org/10.1007/s00784-023-04941-3>
- Saini, R. S., Gurumurthy, V., Quadri, S. A., Bavabeedu, S. S., Abdelaziz, K. M., Okshah, A., Alshadidi, A. A. F., Yessayan, L., Mosaddad, S. A., & Heboyan, A. (2024). The flexural strength of 3D-printed provisional restorations fabricated with different resins: A systematic review and meta-analysis. *BMC Oral Health*, 24(1), 66. <https://doi.org/10.1186/s12903-023-03826-x>
- Siqueira, J. R. C. D. S., Rodriguez, R. M. M., Campos, T. M. B., Ramos, N. C., Bottino, M. A., & Tribst, J. P. M. (2024). Characterization of microstructure, optical properties, and mechanical behavior of a temporary 3D printing resin: Impact of post-curing time. *Materials*, 17(7), 1496. <https://doi.org/10.3390/ma17071496>
- Soto-Montero, J., de Castro, E. F., Romano, B. C., Nima, G., Shimokawa, C. A. K., & Giannini, M. (2022). Color alterations, flexural strength, and microhardness of 3D printed resins for fixed provisional restoration using different post-curing times. *Dental Materials*, 38(8), 1271–1282. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2022.06.023>
- Tiplady, L., & Karia, S. (2024). Who wears the crown? Comparing 3D-printed resin crowns to preformed stainless steel crowns for restoring primary molars. *Evidence-Based Dentistry*, 25(3), 152–153. <https://doi.org/10.1038/s41432-024-01053-z>
- Watanabe, H., Fellows, C., & An, H. (2022). Digital technologies for restorative dentistry. *Dental Clinics of North America*, 66(4), 567–590. <https://doi.org/10.1016/j.cden.2022.05.006>
- Wedekind, L., Güth, J.-F., Schweiger, J., Kollmuss, M., Reichl, F.-X., Edelhoff, D., & Högg, C. (2021). Elution behavior of a 3D-printed, milled and conventional resin-based occlusal splint material. *Dental Materials*, 37(4), 701–710. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2021.01.024>
- Zhao, M., Yang, D., Fan, S., Yao, X., Wang, J., Zhu, M., & Zhang, Y. (2022). 3D-printed strong dental crown with multi-scale ordered architecture, high-precision, and bioactivity. *Advanced Science*, 9(5), e2104001. <https://doi.org/10.1002/advs.202104001>

BÖLÜM 6

PROTETİK DİŞ TEDAVİSİNDE PLAZMA UYGULAMALARI

Muhammet Fatih BULUT¹

¹ Uzm. Dt. , Karadeniz Teknik Üniversitesi Protetik Diş Tedavisi Anabilim Dalı, Trabzon, Türkiye. mfatih.bulut@ktu.edu.tr, ORCID: 0009-0000-1860-5938

1. Plazmanın Temel Özellikleri ve Diş Hekimliğindeki Yeri

Protetik diş tedavisinde kullanılan materyallerin klinik performansı küresel özelliklerinin yanı sıra yüzey özelliklerinden de etkilenir. Rezin siman ile restorasyon arasındaki bağlantı, implant yüzeyinin çevre dokularla etkileşimini ve protez kaidesinde mikroorganizma tutunmasını etkiler. Ayrıca bu durumlar yüzey kimyası, yüzey enerjisi ve pürüzlülük gibi özelliklerle yakından ilişkilidir. Bu nedenle mevcut materyallerin yüzeylerinin klinik gereksinimlere göre değiştirilmesi, dental materyal araştırmalarının önemli konularından biridir. Uygun bir yüzey işleminin materyalin mekanik özelliklerini olumsuz etkilememesi ve toksik kalıntı bırakmaması beklenir. Plazma esaslı teknikler de bu amaçla araştırılan yöntemler arasındadır (Li ve ark., 2017).

Plazma; katı, sıvı ve gaz hâllerinin ardından maddenin dördüncü hâli olarak tanımlanan iyonize bir gazdır. Nötral bir gaza enerji verilmesiyle oluşur. Serbest elektronlar, iyonlar ve hidroksil radikali gibi reaktif türler içerir. Ayrıca kızılötesi, görünür ve ultraviyole ışın yayarlar. Dental uygulamalar açısından plazmanın önemi bu bileşenlerin hedef yüzeyle etkileşime girebilme kapasitesidir (Liu ve ark., 2016; Lata ve ark., 2022; von Woedtke ve ark., 2013).

Plazmalar içerdikleri parçacıkların sıcaklıklarına göre termal ve non-termal olarak sınıflandırılır. Termal plazmada elektronlar ve ağır parçacıklar termal dengede yani aynı enerjidedir (von Woedtke ve ark., 2013). Non-termal plazmada ise elektronlar yüksek enerjili olmasına karşın iyonlar ve nötral parçacıklar oda sıcaklığına yakın kalır. Diş hekimliği açısından istenilen plazma, gaz fazı oda sıcaklığında olan ve vakum yerine atmosferik basınçta üretilen non-termal atmosferik plazmadır. Bu plazmalar literatürde soğuk atmosferik plazma (cold atmospheric plasma, CAP) olarak da anılır (Lata ve ark., 2022; Liu ve ark., 2016). Bu bölümde ve izleyen bölümlerde bu terim kullanılacaktır.

CAP sistemlerinin biyomedikal kullanım açısından avantajları vardır. Vakum düzeneği gerektirmezler, gaz bileşimi, gaz akış hızı, güç, uygulama süresi ve uygulama mesafesi gibi parametreler değiştirilebilir (Li ve ark., 2017). Ayrıca kompakt boyutlarda üretilibildikleri için klinikte elde taşınarak kullanılabilirler (Liu ve ark., 2016). Biyomedikal amaçlı farklı plazma kaynakları tanımlanmış olmakla birlikte araştırmalar ağırlıklı olarak atmosferik basınçta çalışan bariyer deşarjları ve plazma jetleri üzerinde yoğunlaşmıştır (von Woedtke ve ark., 2013). Dielektrik bariyer deşarjı (dielectric barrier discharge, DBD) sistemlerinde elektrotlar dielektrik bir materyalle kaplanır ve elektrotlar arasından geçen gaz iyonize olur. Atmosferik basınçlı

plazma jetlerinde (atmospheric-pressure plasma jet, APPJ) ise çalışma gazı iki elektrot arasından hızla geçirilerek plazma elde edilir. Dental çalışmalarda plazma çoğunlukla iğne elektrotla veya jet biçiminde üretilmiştir. Bu sistemler küçük bölgelere odaklanabildikleri için de ilgi görmüştür (Lata ve ark., 2022).

CAP'nin etkilerinde reaktif oksijen ve nitrojen türleri (ROS/RNS) önemli rol oynar. Süperoksit, singlet oksijen, hidroksil radikali ve hidrojen peroksit başlıca reaktif oksijen türleri; nitrik oksit, peroksinitrit, nitrit ve nitrat ise başlıca reaktif nitrojen türleri arasındadır (Li ve ark., 2017). Plazma materyal yüzeyine ulaştığında bu türler yüzeyi temizleyebilir ve aşındırabilir. Çeşitli yüzeylere bağlanabilir ya da ince bir kaplama tabakası oluşturabilir. Plazmanın antimikrobiyal etkisinde de özellikle reaktif oksijen türlerinin hücre zarı, DNA ve enzimlerde oksidatif hasara yol açtığı bildirilmiştir (Liu ve ark., 2016).

Plazmanın tıbbi kullanımı genel olarak indirekt ve direkt uygulamalar şeklinde değerlendirilebilir. İndirekt uygulamalarda yüzeyler, materyaller veya tıbbi cihazlar sonraki kullanımlarına yönelik özellikler kazanmaları için plazmayla işlenirken, direkt uygulamalarda plazma canlı dokuyla doğrudan etkileşir. Direkt uygulamalar ağırlıklı olarak yara iyileşmesini de kapsayan dermatoloji alanında yoğunlaşmıştır. Kanser tedavisi, endoskopi ve diş hekimliği de bu alanlar arasında yer almıştır (von Woedtke ve ark., 2013). Li ve arkadaşları (2017) diş hekimliğini, kanser tedavisi ve dermatolojiyle birlikte plazma tıbbının en umut verici üç uygulama alanından biri olarak değerlendirmektedir.

Diş hekimliğinde plazma; dental aletlerin sterilizasyonu, kavite ve kök kanal dezenfeksiyonu, diş beyazlatma, biyofilm kontrolü, adeziv restorasyonlar ve implant yüzeylerinin modifikasyonu gibi farklı amaçlarla araştırılmıştır (Lata ve ark., 2022). Protetik diş tedavisi açısından başlıca araştırma alanlarından biri restoratif ve protetik materyallerin yüzey özelliklerinin değiştirilmesidir. Plazma uygulaması yüzey kimyasını ve ıslanabilirliği değiştirebilmektedir. Buna bağlı olarak materyallerin adeziv ve biyolojik yüzeylerle etkileşimini etkileyebilmektedir. Bunun yanında akrilik rezinlerde *Candida albicans*'ın erken tutunmasının önlenmesi ve titanyum yüzeylerde biyofilmin uzaklaştırılması gibi antimikrobiyal uygulamalar da araştırılmıştır. Plazmanın etkisi kaynağın özelliklerine, hedef materyale ve uygulama yöntemine göre değişmektedir (Li ve ark., 2017).

2. Plazmanın Dental Materyallerin Yüzey Özellikleri Üzerindeki Etkileri

Plazma uygulaması dental materyallerin yüzeyinde kimyasal ve fiziksel değişikliklere yol açabilir. Bu değişiklikler plazma kaynağına, çalışma gazına, uygulama parametrelerine ve materyalin yapısına bağlıdır. Plazma; yüzeyi temizleyebilir, aşındırabilir ve yüzeye yeni özellikler kazandırabilir. Dental materyallerde bu etkiler başlıca yüzey kimyası, yüzey enerjisi ve ıslanabilirlik ile yüzey morfolojisindeki değişiklikler üzerinden değerlendirilmektedir (Li ve ark., 2017; Liu ve ark., 2016).

Yüzey kimyasında bildirilen başlıca değişiklik karbon içeriğinin azalması ve oksijen içeriğinin artmasıdır. Chen ve ark. (2013) 36–38 °C'de çalışan bir argon plazma fırçasını dentine, mineye ve iki kompozit rezine uygulamış ve yapılan analizlerde dört yüzeyin tümünde karbon oranının azaldığını oksijen oranının ise arttığını bildirmiştir. Bu değişiklikler yüzeyin oksijen içeriğinin ve polar karakterinin arttığını düşündürmektedir. Liu ve ark. (2016) derlemesinde bu değişim, diş dokusunda protein, kompozitte polimer gibi duyarlı organik bileşenlerin seçici olarak aşınması ve inorganik fazın açığa çıkmasıyla açıklanmaktadır.

Yüzey kimyasındaki değişikliklerin önemli sonuçlarından biri ıslanabilirliğin artmasıdır. Islanabilirlik genellikle sıvı damlası ile katı yüzey arasında oluşan temas açısı üzerinden değerlendirilir. Temas açısının azalması yüzeyin sıvı tarafından daha iyi ıslatıldığını gösterir. Chen ve ark. (2013) çalışmasında su temas açısı dentin, mine ve iki kompozit rezinde kısa süreli plazma uygulamasının ardından belirgin biçimde azalmıştır. Uygulama süresi uzadıkça daha da düşerek süper-hidrofilik yüzeylere yakın değerlere ulaşmıştır. Bu etki, yüzeyin başlangıçtaki hidrofilik ya da hidrofobik niteliğinden bağımsız olarak elde edilmiştir.

Bununla birlikte yüzey enerjisinin veya ıslanabilirliğin artması tek başına adeziv bağlanmanın güçleneceği anlamına gelmez. Liebermann ve ark. (2013) polimetilmetakrilat (PMMA) esaslı bilgisayar destekli tasarım/bilgisayar destekli üretim (CAD/CAM) materyalinde argon plazma uygulamasının yüzey enerjisini anlamlı biçimde artırmasına rağmen self-adeziv rezin simanlara bağlanma dayanımını artırmadığını bildirmiştir. Bu bulgu plazma ile oluşturulan yüzey aktivasyonunun bağlanmaya etkisinin materyalin yapısı ve kullanılan adeziv sistemle birlikte değerlendirilmesi gerektiğini düşündürmektedir.

Plazma, yüzey kimyasını değiştirebilmesine karşın yüzey topografisinde her zaman belirgin bir değişikliğe neden olmaz. Chen ve ark. (2013) taramalı elektron mikroskopunda dentin, mine ve

kompozit rezinlerde plazma sonrasında belirgin bir morfolojik değişiklik saptamamıştır. PMMA esaslı CAD/CAM materyalinde de yüzey pürüzlülüğü plazma uygulamasından anlamlı düzeyde etkilenmemiştir (Liebermann ve ark., 2013). Zirkonyada ise plazma sonrasında yüzey pürüzlülüğünde sınırlı bir artış bildirilmiştir (Kang ve ark., 2024). Bu bulgular incelenen materyallerde plazmanın etkisinin belirgin bir mekanik pürüzlendirmeden çok yüzey kimyası ve yüzey enerjisindeki değişikliklerle ilişkili olabileceğini düşündürmektedir. Bununla birlikte yüzey morfolojisindeki değişikliklerin materyale ve uygulanan plazma protokolüne bağlı olduğu göz önünde bulundurulmalıdır.

Plazmanın oluşturduğu yüzey değişikliklerinin büyüklüğü uygulama koşullarına bağlıdır. Çalışma gazının bileşimi, değarj gücü, uygulama süresi ve plazma kaynağı ile yüzey arasındaki mesafe oluşan reaktif türlerin niteliğini ve yüzeye aktarılan enerjiyi etkileyebilir. Sonuçlar ayrıca işlenen materyalin özelliklerine ve uygulama yöntemine göre değişebilir (Li ve ark., 2017). Uygulama süresinin uzatılması da her zaman daha olumlu bir etki oluşurmaz. Chen ve ark. (2013) temas açısının uygulama süresiyle birlikte azaldığını bildirirken, Liu ve ark. (2016) aşırı uzun süreli plazma uygulamasının dentin kollajenine zarar vererek bağlanma dayanımını azaltabileceğini belirtmektedir. Bu nedenle farklı plazma sistemleriyle elde edilen sonuçların karşılaştırılmasında işlem parametrelerinin dikkate alınması gerekir.

Plazma ile kazandırılan hidrofilik özellik zamanla azalabilir. Hidrofobik geri dönüş olarak tanımlanan bu süreç plazma uygulaması ile sonraki klinik işlem arasındaki zamanlama açısından önemlidir. Kang ve ark. (2024) plazma uygulanmış itriya ile stabilize edilmiş tetragonal zirkonya polikristali (Y-TZP) yüzeylerde hava ortamında bekletilen örneklerin belirgin hidrofobik geri dönüş gösterdiğini bildirmiştir. Deiyonize suda saklanan örneklerde ise hidrofilik özellik dört haftalık izlem boyunca korunmuş veya artmıştır. Dolayısıyla plazma uygulamasından sonra geçen süre ve yüzeyin bu dönemde bulunduğu ortam elde edilen yüzey özelliklerinin devamlılığını etkileyen değişkenlerdir.

Genel olarak değerlendirildiğinde incelenen birçok dental materyalde plazma uygulamasının etkisi belirgin bir topografik değişiklikten çok yüzey kimyası, yüzey enerjisi ve ıslanabilirlikteki değişikliklerle ortaya çıkmaktadır. Ancak bu değişikliklerin büyüklüğü ve adeziv bağlanma gibi klinik açıdan önemli sonuçlara yansması materyale, plazma protokolüne ve işlem sonrası koşullara bağlıdır. Bu nedenle plazmanın protetik materyaller üzerindeki etkilerinin her materyal ve uygulama protokolü için ayrı değerlendirilmesi gerekir.

3. Sabit Protetik Restorasyonlarda Plazma Uygulamaları

Sabit protetik restorasyonlarda güvenilir bir adeziv bağlanma, materyalin yapısına uygun bir yüzey işlemi gerektirir. Silika esaslı seramiklerde hidroflorik asit ve silan uygulaması etkili bir yöntemdir. Kimyasal olarak inert olan ve silika fazı içermeyen zirkonyada ise farklı mekanik ve kimyasal yüzey işlemlerine gereksinim duyulur. Plazma, materyalin kütsel özelliklerini etkilemeden yüzey özelliklerini değiştirebildiği için alternatif ya da tamamlayıcı bir yöntem olarak araştırılmaktadır. Silika esaslı seramiklerde plazmanın hidroflorik asitle pürüzlendirme protokolünün yerini alıp alamayacağı da incelenmiştir (Birk ve ark., 2024; Li ve ark., 2024).

Mevcut laboratuvar bulguları plazmanın yüzey özellikleri üzerindeki etkisinin her materyalde doğrudan daha yüksek bağlanma dayanımına dönüşmediğini göstermektedir. Silika esaslı seramikler üzerinde yapılan sistematik bir derlemde plazma sonrasında ıslanabilirlik ve yüzey pürüzlülüğünde artış bildirilmiş ancak elde edilen bağlanma dayanımı çoğunlukla hidroflorik asitle elde edilenin altında kalmıştır (Birk ve ark., 2024). Zirkonya-rezin bağlantısını değerlendiren ve gaz plazmanın yalnızca beş çalışmada incelendiği bir meta-analizde ise gaz plazma uygulaması kontrol grubuna kıyasla bağlanma dayanımında anlamlı bir artış sağlamamıştır (Li ve ark., 2024). Çalışmalar arasında plazma sistemi, uygulama protokolü ve yaşlandırma koşulları bakımından belirgin farklılıklar bulunması sonuçların doğrudan karşılaştırılmasını güçleştirmektedir. Bu derlemelere alınan çalışmaların tamamı laboratuvar çalışmasıdır (Birk ve ark., 2024; Li ve ark., 2024).

3.1. Seramik Materyallerde Plazma Uygulamaları

Zirkonyada plazmanın etkisi özellikle yüzey kimyası, yüzey enerjisi ve rezin simanla bağlanma açısından araştırılmıştır. Cilalı Y-TZP'de düşük olan yüzey enerjisinin kumlama sonrasında arttığı, atmosferik basınçlı argon plazmasının ise hem cilalı hem de kumlanmış yüzeylerde yüzey enerjisini artırdığı bildirilmiştir. Yapılan analizlerde plazma sonrasında yüzeydeki oksijen miktarı artarken karbon miktarı azalmıştır. Karbon miktarındaki azalmanın yüzeye adsorbe olmuş hidrokarbonların uzaklaştırılmasıyla ilişkili olabileceği belirtilmiştir (Valverde ve ark., 2013).

Plazmanın oluşturduğu bu yüzey değişiklikleri bağlanma dayanımını her koşulda aynı şekilde etkilememektedir. Yaşlandırma uygulanmayan Y-TZP örneklerinde plazma işlemi self-adeziv rezin simanla birlikte kullanıldığında bağlanma dayanımını artırmıştır. Plazma uygulanan yüzeylerde kumlama ve primer kullanımı ek bir artış sağlamamıştır. Ancak test öncesinde kırılan örnekler de hesaba katıldığında plazmanın başka bir işlem uygulanmamış yüzeylerde bağlanmaya etkisi az bulunmuştur. Yapay yaşlandırmanın uygulandığı çalışmalarda sonuçlar daha sınırlıdır. Termal siklus ve suda bekletme sonrasında argon plazması, zirkonya ile 10-MDP içeren adeziv sistemler ve rezin simanlar arasındaki makaslama bağlanma dayanımını artırmamıştır. Zirkonya kronların titanyum alt yapılara simante edildiği ve termal siklus uygulanan bir çalışmada en yüksek çekme dayanımı kumlama ile primerin birlikte kullanıldığı grupta elde edilmiştir. Soğuk atmosferik plazma yalnızca primerle birlikte uygulandığında küçük ancak anlamlı bir artış sağlamış bu artış kumlama ve primer kombinasyonunun etkisine yaklaşmamıştır. Bu bulgular plazmanın zirkonya yüzeyini aktive edebildiğini ancak yaşlandırma sonrasında adeziv bağlanmaya katkısının sınırlı kaldığını göstermektedir. Kumlama ve 10-MDP içeren protokollerin yerini alabileceğine ilişkin yeterli kanıt bulunmamaktadır (Görgen ve ark., 2023; Pott ve ark., 2018; Valverde ve ark., 2013).

Cam seramiklerde özellikle lityum disilikatta plazma uygulamasına ilişkin veriler daha sınırlıdır. Lityum disilikat yüzeyinde non-termal plazma uygulaması temas açısını belirgin biçimde azaltmış, yüzeyde oksijen ve silisyum miktarı artarken karbon miktarı azalmıştır. Aynı çalışmada yüzey pürüzlülüğünde anlamlı bir değişiklik saptanmamıştır (Vechiato Filho ve ark., 2014). Farklı plazma protokollerinin karşılaştırıldığı başka bir çalışmada ise oksijen plazması uygulanan grupta pürüzlülük daha yüksek bulunmuş ve bu grupta rezin simanla bağlanma dayanımı hidroflorik asitle elde edilen değerlere benzer olmuştur (Bitencourt ve ark., 2020). Bununla birlikte silika esaslı seramikleri değerlendiren sistematik derlemede plazma uygulaması sonrasında bağlanma dayanımının çoğu çalışmada hidroflorik asitle pürüzlendirme sonrasında elde edilen değerlerin altında kaldığı bildirilmiştir (Birk ve ark., 2024). Bu sonuçlara göre plazma uygulamaları seramik materyallerde adeziv bağlanmayı artıran bir yöntem olarak değerlendirilebilir. Ancak standart protokollerin belirlendiği ve klinik koşulları yansıtan çalışmalara ihtiyaç vardır.

3.2. Polimer Esaslı Restoratif Materyallerde Plazma Uygulamaları

Sabit protezlerin yapımında kullanılan polimer esaslı materyaller arasında PMMA esaslı CAD/CAM bloklar, rezin nano-seramikler ve poliarileterketon (PAEK) ailesine ait PEKK gibi yüksek performanslı polimerler bulunmaktadır. Özellikle PAEK grubunda yüzeyin kimyasal olarak inert ve hidrofobik olması rezin esaslı materyallerle güvenilir bir adeziv bağlanma elde edilmesini güçleştirmektedir. Plazma uygulamaları bu materyallerin yüzey özelliklerini değiştirerek bağlanma dayanımını iyileştirmek amacıyla araştırılmaktadır (Huang ve ark., 2024).

PEEK'te plazmanın bağlanma dayanımına etkisi kullanılan yüzey işlemine ve adeziv sisteme göre farklılık göstermektedir. Self -adeziv rezin simanların değerlendirildiği bir çalışmada adeziv ön işlem uygulanmayan PEEK yüzeylerinde plazma kullanılsa da istenilen seviyede bağlanma sağlanamamıştır. Metil metakrilat (MMA) esaslı adezivlerle yapılan ön işlem daha iyi bağlanma sağlamış ancak plazma uygulaması bu değerlere ek bir katkı sağlamamıştır (Stawarczyk ve ark., 2014). Buna karşılık üç farklı PAEK materyalinin değerlendirildiği daha güncel bir çalışmada, kullanılan non termal plazma cihazı yüzeyleri süperhidrofilik hâle getirmiştir. Plazma uygulanan örneklerde makaslama bağlanma dayanımı kumlama grubundan yüksek bulunmuş ve yapay yaşlandırma sonrasında da elde edilen bağlanma dayanımı devam etmiştir. Bu sonuç keton oranı yüksek olan materyallerde daha belirgindir (Huang ve ark., 2024). Mevcut bulgular plazmanın PAEK materyallerdeki etkinliğinin uygulama protokolüne bağlı olduğunu göstermektedir.

Diğer polimer esaslı CAD/CAM materyallerde de yüzey aktivasyonu her zaman daha yüksek bağlanma dayanımı sağlamamaktadır. PMMA esaslı CAD/CAM bloklarda argon plazması yüzey enerjisini artırmış ancak yüzey pürüzlülüğünü değiştirmemiş ve self-adeziv rezin simanlarla bağlanma dayanımını artırmamıştır (Liebermann ve ark., 2013). Resin nano-seramiklerde plazma uygulaması temas açısını azaltmış, yüzey pürüzlülüğünü ise anlamlı biçimde değiştirmemiştir. Plazma uygulanan yüzeylerin pürüzlülüğü hidroflorik asitle pürüzlendirilen yüzeylerden daha düşük bulunmuştur. Buna karşın iki yüzey işlemi arasında mikro-makaslama bağlanma dayanımı açısından anlamlı bir fark bulunmamıştır (Jassim & Majeed, 2023).

Genel olarak plazma, polimer esaslı restoratif materyallerin ıslanabilirliğini artırabilmekte ancak bu değişiklik her zaman bağlanma dayanımında beklenen artışı sağlayamamaktadır. Elde edilen sonuçlar materyalin kimyasal yapısına, kullanılan adeziv sisteme ve plazma protokolüne bağlıdır. Bu nedenle plazmanın geleneksel yüzey işlemlerinin yerine kullanılabilmesi için farklı materyallerde uzun dönem bağlanma dayanımını değerlendiren çalışmalara ihtiyaç vardır.

4. Hareketli Protezlerde Plazma Uygulamaları

Hareketli protezlerde plazma uygulamaları başlıca iki amaçla araştırılmaktadır. Bunlardan ilki protez kaide materyalinin yüzey özelliklerini değiştirerek tamir rezinleri ve yumuşak astar materyalleriyle bağlantısını iyileştirmektir. Diğeri ise protez yüzeyinde Candida türlerinin tutunmasını azaltmak veya oluşmuş biyofilmleri inaktive etmektir. Bu alanlardaki araştırmaların büyük bölümü laboratuvar koşullarında yürütülmüş olup klinik etkinliğe ilişkin veriler sınırlıdır.

4.1. Plazma Uygulaması ile Protez Kaide Materyallerinin Yüzey Modifikasyonu

Akrilik esaslı protez kaidelerinde tamir rezinleri ve yumuşak astar materyalleriyle yeterli bağlanmanın sağlanması protezin kullanım süresi açısından önemlidir. Özellikle yumuşak astar materyalinin kaideden ayrılması klinikte karşılaşılan sorunlardan biridir. Bu bağlantıyı iyileştirmek amacıyla farklı mekanik ve kimyasal yüzey işlemlerinin yanı sıra plazma uygulamaları da araştırılmaktadır (Yıldırım ve ark., 2020).

Isıyla polimerize akrilik rezin yüzeyine plazma uygulanması kendiliğinden polimerize olan tamir reziniyle kısa dönem bağlantıyı iyileştirebilmektedir. Bununla birlikte 100 gün suda bekletilen örneklerde plazma uygulanan grubun makaslama bağlanma dayanımı kontrol grubundan yüksek bulunmasına rağmen fark istatistiksel olarak anlamlı değildir. Bu sonuç plazmanın uzun dönem bağlantı dayanımı açısından üstünlüğünün henüz gösterilemediğine işaret etmektedir (Nishigawa ve ark., 2004).

Yumuşak astar materyalleriyle bağlanmada da plazmanın olumlu etkileri bildirilmiştir. Akrilik kaide ile iki farklı silikon esaslı yumuşak astar materyalinin değerlendirildiği bir çalışmada bir dakikalık argon plazması uygulaması her iki materyalde de çekme bağlanma dayanımını kontrol grubuna göre artırmıştır (Yıldırım ve ark., 2020).

Bu çalışmalar plazmanın akrilik kaide yüzeyinde bağlanmayı iyileştirebildiğini göstermektedir. Ayrıca kısa dönem sonuçların uzun süreli suda bekletme sonrasında aynı düzeyde korunacağı kesin değildir. Bu nedenle plazmanın protez tamiri ve yumuşak astar uygulamalarında geleneksel yüzey işlemlerine alternatif olarak kullanılabilmesi için farklı materyalleri ve yaşlandırma koşullarını değerlendiren çalışmalara ihtiyaç vardır.

4.2. Plazma Uygulamasının Mikrobiyal Adezyona ve Biyofilm Kontrolüne Etkisi

Hareketli protezlerin akrilik yüzeyleri Candida türlerinin tutunması ve biyofilm oluşturmaları için uygun bir ortam sağlayabilir. Özellikle Candida albicans protez stomatitiyle ilişkili başlıca mikroorganizmalardan biridir. Plazma uygulamaları bu alanda iki farklı yaklaşımla değerlendirilmiştir. Bunlardan biri mikroorganizmaların yüzeye tutunmasını azaltmak amacıyla kaide materyalinin yüzey özelliklerini değiştirmek diğeri ise oluşmuş biyofilmleri doğrudan inaktive etmektir (Matthes ve ark., 2015; Zamperini ve ark., 2013).

Yüzey modifikasyonu amacıyla uygulanan plazma, akrilik kaide rezininin kimyasal bileşimini, hidrofobikliğini ve topografisini değiştirebilmektedir. Argon plazması uygulanan akrilik yüzeylerde Candida glabrata tutunması kontrol grubuna göre anlamlı derecede azalmıştır. Ancak yüzeyler mikroorganizma ile temas etmeden önce tükürükle kaplandığında bu fark ortadan kalkmıştır. Ayrıca suda bekletme sonrasında yüzey serbest enerjisinde anlamlı değişiklikler gözlenmiştir (Zamperini ve ark., 2013). Bu bulgular plazmayla oluşturulan yüzey özelliklerinin kalıcılığının ve tükürük varlığındaki etkisinin klinik açıdan dikkate alınması gerektiğini göstermektedir.

Plazmanın oluşmuş biyofilmler üzerindeki etkisi de araştırılmıştır. PMMA diskler üzerinde oluşturulan iki günlük C. albicans biyofilmlerinde argon esaslı plazma uygulanması canlı mikroorganizma sayısında azalma sağlamış ve tek başına klorheksidin uygulamasından daha etkili bulunmuştur. Buna karşılık 7 ve 16 günlük biyofilmlerde plazma uygulaması anlamlı bir azalma oluşturmamıştır (Matthes ve ark., 2015). Bu sonuç plazmanın antimikrobiyal etkinliğinin biyofilmin olgunluğundan etkilenebileceğini göstermektedir. Genç biyofilmlerde elde edilen sonuçlar düzenli protez dezenfeksiyonu açısından araştırılmaya değer olduğunu göstermiştir.

Klinik veriler ise sınırlıdır. Protez stomatitli sekiz hastada gerçekleştirilen randomize bir çalışmada standart antifungal tedaviye ek olarak ağız mukozasına ve hareketli protezlere plazma uygulanmıştır. Plazma uygulanan tarafta ikinci ve altıncı haftalar arasında eritem alanındaki azalma kontrol tarafına göre anlamlı derecede daha fazla bulunmuştur. Buna karşılık hasta şikâyetleri ve tedavi sonrasında orta veya yoğun Candida üremesi görülme sıklığı açısından iki taraf arasında anlamlı fark saptanmamıştır (Preissner ve ark., 2016). Bu bulgular plazmanın klinik iyileşmeye katkı sağlayabileceğini ortaya koymuştur.

Genel olarak plazma, hareketli protez yüzeylerinde özellikle erken dönem Candida biyofilmlerine karşı laboratuvar koşullarında etkili sonuçlar göstermektedir. Bununla birlikte yüzey modifikasyonunun tükürük varlığındaki etkisinin belirsiz olması, olgun biyofilmlere karşı etkinliğin sınırlı kalması ve klinik çalışmaların azlığı bu alanda daha fazla araştırma yapılması gerektiğini göstermektedir.

5. İmplant Tedavisinde Plazma Uygulamaları

İmplant destekli protetik tedavilerin uzun dönem başarısında osseointegrasyonun korunması ve peri-implant dokuların sağlığı önemli rol oynar. İmplant yüzeyinin kemik dokusuyla etkileşiminin yanı sıra transmukozal implant ve abutment yüzeylerinin çevre yumuşak dokularla uyumu da önemlidir. Plazma bu alanda iki temel amaçla araştırılmaktadır. İmplant ve abutment yüzeylerinin fizikokimyasal özelliklerini değiştirerek hücrel yanıtı desteklemek ve yüzeylerde oluşan mikrobiyal biyofilmi azaltmak (Hui ve ark., 2020).

Soğuk atmosferik plazmanın titanyum yüzeylerde mikroyapıyı belirgin biçimde değiştirmeden sıvı temas açısını azaltabildiği ve yüzeyin ıslanabilirliğini artırabildiği bildirilmektedir. Titanyum ve zirkonya üzerinde yürütülen laboratuvar çalışmalarında da plazma uygulaması sonrasında osteoblast ve fibroblastların tutunması, yayılması ve çoğalması açısından olumlu sonuçlar elde edilmiştir. Bununla birlikte bu etkiler kullanılan plazma sistemine, yüzey özelliklerine ve uygulama koşullarına bağlıdır. Hayvan çalışmalarında osseointegrasyon açısından olumlu bulgular bildirilmiş olsa da klinik etkinliğe ilişkin kanıtlar henüz sınırlıdır (Hui ve ark., 2020).

Peri-implant hastalıklarının gelişiminde mikrobiyal biyofilm temel etiyolojik faktörlerden biridir. Bu nedenle implant yüzeyinin dekontaminasyonu, özellikle peri-implantitis tedavisinde önemli bir aşamadır. Plazmanın biyofilm üzerindeki etkisi laboratuvar çalışmalarında lazer,

hava abrazyonu ve klorheksidin gibi yöntemlerle karşılaştırılmış ve bazı çalışmalarda bu yöntemlerden daha fazla biyofilm azalması sağladığı bildirilmiştir. Ancak biyofilmin tamamen uzaklaştırılmadığını gösteren sonuçlar da bulunmaktadır. Bazı çalışmalarda mekanik temizlikle birlikte uygulanan plazmanın antimikrobiyal etkinliği artırdığı ve temizlenen yüzeylerde hücresel tutunmayı desteklediği bildirilmiştir. Bununla birlikte biyofilm inaktivasyonu ve hücresel yanıt açısından uygun plazma parametreleri farklılık gösterebildiğinden her iki amaç için uygulama koşullarının ayrı değerlendirilmesi gerekmektedir (Hui ve ark., 2020).

5.1. İmplant ve Abutment Yüzeylerinin Modifikasyonu

Titanyum implant yüzeylerinin biyolojik aktivitesi yüzey hazırlandıktan sonra zamanla değişebilmektedir. “Biyolojik yaşlanma” olarak tanımlanan bu süreçte yüzeyin ıslanabilirliği azalır. Asitle pürüzlendirilmiş titanyum yüzeylerde yeni hazırlanmış örnekler süperhidrofilik özellik gösterirken bir ila altı ay bekletilen yüzeylerin hidrofobik hâle geldiği bildirilmiştir. Aynı dönemde osteoblastların tutunması, yayılması, hücre yoğunluğu ve alkalen fosfataz aktivitesinde de azalma gözlenmiş ve bu değişim altı aya kadar devam etmiştir. Bununla birlikte değerlendirilen hücresel parametrelerden yalnızca tutunan hücre sayısı ıslanabilirlikteki değişimle ilişkili bulunmuştur. Bu bulgu titanyum yüzeylerin biyolojik yaşlanmasının yalnızca ıslanabilirlik kaybıyla açıklanamayacağını göstermektedir (Minamikawa ve ark., 2016).

Plazma, titanyum yüzeylerin fizikokimyasal özelliklerini yeniden düzenlemek amacıyla araştırılan yöntemlerden biridir. Kumlanmış ve asitle pürüzlendirilmiş titanyum disklerle uygulanan argon veya oksijen plazması yüzey yapısını değiştirmeden yüzeydeki oksidasyonu artırmış ve karbon miktarını azaltmıştır. Fare kaynaklı osteoblast benzeri hücrelerle yapılan bu çalışmada plazma uygulanan yüzeylerde hücre tutunması anlamlı olarak daha yüksek bulunmuştur (Henningesen ve ark., 2018). Zirkonya yüzeylerinde de plazma uygulamasının topografide belirgin değişiklik oluşturmada ıslanabilirliği artırabildiği ve osteoblast yanıtını destekleyebildiği bildirilmiştir. Bununla birlikte elde edilen hücresel yanıtın kullanılan plazma gazına ve uygulama koşullarına bağlı olduğu görülmektedir (Hui ve ark., 2020).

Laboratuvar bulgularının osseointegrasyona yansması hayvan çalışmalarında da değerlendirilmiştir. Hayvan çalışmalarını derleyen Hui ve ark. (2020) plazma uygulamasının osseointegrasyonu hızlandırma açısından umut verici olduğunu ancak hava bileşimli plazmada

etkinin daha az belirgin kaldığını ve olumlu sonuçların mekanizmasının hiçbir çalışmada araştırılmadığını bildirmiştir. Köpeklerde yapılan kontrollü bir çalışmada plazma uygulanan implantlarda bir aylık iyileşme sonrasında yeni kemik ile implant yüzeyi arasındaki temas oranı sayısal olarak daha yüksek bulunmuş ancak gruplar arasındaki fark istatistiksel olarak anlamlı olmamıştır (Canullo ve ark., 2018). Bu nedenle mevcut hayvan verileri plazmanın osseointegrasyonu kesin olarak artırdığı sonucuna ulaşmak için yeterli değildir.

Abutment yüzeylerinde ise peri-implant yumuşak dokularla uyum ön plana çıkmaktadır. Laboratuvar çalışmalarında plazma uygulamasının titanyum ve zirkonya yüzeylerde fibroblast tutunmasını ve kolonizasyonunu özellikle kültürün erken dönemlerinde destekleyebildiği bildirilmiştir (Hui ve ark., 2020). Klinik veriler ise sınırlıdır. İnce dişeti biyotipine ve periodontal hastalık öyküsüne sahip 30 hastada gerçekleştirilen randomize kontrollü bir çalışmada üst çene ön bölgedeki implantlara ait kişiye özel titanyum abutmentler yerleştirilmeden önce argon plazmasıyla veya buharla temizlenmiştir. Beş yıllık takip sonunda her iki grupta da implant veya protetik restorasyon kaybı görülmemiştir. Marjinal kemik kaybı plazma grubunda 6, 24 ve 60. aylarda anlamlı olarak daha düşük bulunmuş ve zaman içinde anlamlı kemik kaybı yalnızca kontrol grubunda gözlenmiştir. Plazma grubunda bukkal yumuşak doku seviyesinde daha fazla kazanç saptanırken papil yüksekliği ve değerlendirilen periodontal parametreler açısından gruplar arasında anlamlı fark bulunmamıştır (Canullo ve ark., 2016).

Genel olarak plazma uygulaması titanyum ve zirkonya yüzeylerin fizikokimyasal özelliklerini değiştirebilir ve laboratuvar koşullarında hücresel yanıtı destekleyebilir. Buna karşılık osseointegrasyona ilişkin hayvan çalışmalarında olumlu bulgular bildirilmekle birlikte istatistiksel olarak anlamlı bir fark her çalışmada gösterilememiştir. Uzun dönem klinik kanıtlar ise sınırlı kalmaktadır.

5.2. Dekontaminasyon ve Peri-implant Biyofilm Kontrolü

Peri-implantitis tedavisinde implant yüzeyinin dekontaminasyonu yüzey pürüzlülüğü ve implant geometrisi nedeniyle güçlük göstermektedir. Mikroorganizmaların yüzeydeki girinti ve düzensizliklerde korunabilmesi mekanik debridmanın etkinliğini sınırlayabilmektedir (Matthes ve ark., 2022). Bu nedenle soğuk plazma uygulaması mevcut dekontaminasyon yöntemlerine alternatif veya tamamlayıcı bir uygulama olarak araştırılmaktadır. Titanyum yüzeylerde oluşan biyofilmler üzerinde plazmanın etkisi lazer, hava abrazyonu ve klorheksidin gibi yöntemlerle

karşılaştırılmıştır. Bazı laboratuvar çalışmalarında plazma uygulamasıyla biyofilm canlılığında ve miktarında azalma sağlanmış ancak biyofilmin tamamen uzaklaştırılması mümkün olmamıştır. Elde edilen antimikrobiyal etkinlik, kullanılan plazma sistemine ve deney koşullarına göre değişmektedir (Hui ve ark., 2020).

Plazmanın mekanik temizlikle birlikte uygulanması dekontaminasyonun yanı sıra yüzeyin hücreler tarafından kolonize edilmesini iyileştirmek amacıyla da araştırılmıştır. Bazı deneysel çalışmalarda kombine uygulama sonrasında osteoblast büyümesi steril kontrol yüzeylerine yaklaşıırken diğerlerinde mekanik temizliğe plazma eklenmesi hücre yayılmasını artırmamıştır (Hui ve ark., 2020). Pürüzlü titanyum yüzeylerde yapılan bir in vitro çalışmada mekanik temizlikle birlikte soğuk atmosferik plazma uygulanmasının bakteriyel çoğalmayı azaltmış ve osteoblast benzeri hücrelerin yüzeydeki oranını artırmıştır. Bu bulgular plazmanın mekanik dekontaminasyonu tamamlayıcı bir yöntem olarak yüzeydeki hücresel kolonizasyonu destekleyebileceğini göstermektedir (Matthes ve ark., 2022).

Genel olarak plazma uygulaması, implant yüzeylerinde mikrobiyal biyofilmin azaltılmasına ve dekontaminasyon sonrasında hücrelerin yüzeyi yeniden kolonize etmesine katkı sağlayabilmektedir. Ancak mevcut kanıtlar büyük ölçüde laboratuvar çalışmalarına ve hayvan modellerine dayanmaktadır. Ayrıca plazmanın tek başına biyofilmi tamamen uzaklaştırabildiği gösterilmemiştir. Bu nedenle plazmanın peri-implantitis tedavisindeki klinik etkinliğini ve mevcut tedavilere sağlayabileceği ek yararı belirlemek için kontrollü klinik çalışmalara ihtiyaç vardır.

6. Sonuç

Plazma uygulamaları dental materyallerin ve implant yüzeylerinin ıslanabilirliğini ve yüzey kimyasını genellikle topografide belirgin değişiklik oluşturmada düzenleyebilen bir yaklaşım olarak protetik diş hekimliğinde araştırılmaktadır. Bununla birlikte yüzeyde elde edilen fizikokimyasal değişiklikler her materyalde ve her uygulamada klinik açıdan anlamlı bir kazanıma dönüşmemektedir. Seramiklerde ve polimer esaslı restoratif materyallerde plazmanın adeziv bağlantıya katkısı materyale, adeziv sisteme ve uygulama protokolüne göre değişmektedir. Özellikle zirkonyada yaşlandırma sonrasında bu katkı sınırlı kalabilmektedir. Hareketli protezlerde bağlanmanın iyileştirilmesi ve mikrobiyal adezyonun azaltılması açısından olumlu laboratuvar bulguları bulunmaktadır. Ancak yüzey modifikasyonunun tükürük varlığındaki etkisi belirsizdir ve biyofilmlere karşı etkinlik açısından klinik veriler yetersizdir.

İmplant tedavisinde plazmanın laboratuvar koşullarında hücresel yanıtı desteklediği ve dekontaminasyona katkı sağlayabildiği bildirilmiştir. Ancak osseointegrasyona ilişkin hayvan verileri tutarlı bir üstünlük göstermemekte, klinik kanıtlar ise sınırlı kalmaktadır. Bu nedenle plazmanın protetik diş hekimliğindeki klinik rolünün belirlenebilmesi için standartlaştırılmış uygulama protokollerinin kullanıldığı, uygun yaşlandırma koşullarını içeren ve uzun dönem klinik sonuçları değerlendiren çalışmalara ihtiyaç vardır.

7. Kaynakça

- Birk, L., Rener-Sitar, K., Benčina, M., & Junkar, I. (2024). Dental silicate ceramics surface modification by nonthermal plasma: A systematic review. *Dental Materials*, 40(3), 531–545. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2024.01.001>
- Bitencourt, S. B., Piacenza, L. T., Souza, J. P. do V., da Silva, E. V. F., Rangel, E. C., Barão, V. A. R., Goiato, M. C., & dos Santos, D. M. (2020). The effect of different plasma treatments on the surface properties and bond strength between lithium disilicate and resin cement. *The Journal of Adhesive Dentistry*, 22(5), 531–538. <https://doi.org/10.3290/j.jad.a45183>
- Canullo, L., Tallarico, M., Botticelli, D., Alccayhuaman, K. A. A., Martins Neto, E. C., & Xavier, S. P. (2018). Hard and soft tissue changes around implants activated using plasma of argon: A histomorphometric study in dog. *Clinical Oral Implants Research*, 29(4), 389–395. <https://doi.org/10.1111/clr.13134>
- Canullo, L., Tallarico, M., Peñarrocha-Oltra, D., Monje, A., Wang, H.-L., & Peñarrocha-Diago, M. (2016). Implant abutment cleaning by plasma of argon: 5-year follow-up of a randomized controlled trial. *Journal of Periodontology*, 87(4), 434–442. <https://doi.org/10.1902/jop.2015.150549>
- Chen, M., Zhang, Y., Driver, M. S., Caruso, A. N., Yu, Q., & Wang, Y. (2013). Surface modification of several dental substrates by non-thermal, atmospheric plasma brush. *Dental Materials*, 29(8), 871–880. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2013.05.002>
- Görge, C.-I., Sagheb, K., Lehmann, K. M., Schmidtman, I., & Wentaschek, S. (2023). Influence of cold atmospheric-pressure-plasma in combination with different pretreatment methods on the pull-off tensile load in two-piece abutment-crowns: An in-vitro study. *BMC Oral Health*, 23, Article 186. <https://doi.org/10.1186/s12903-023-02880-9>
- Henningsen, A., Smeets, R., Hartjen, P., Heinrich, O., Heuberger, R., Heiland, M., Precht, C., & Cacaci, C. (2018). Photofunctionalization and non-thermal plasma activation of titanium surfaces. *Clinical Oral Investigations*, 22(2), 1045–1054. <https://doi.org/10.1007/s00784-017-2186-z>

- Huang, H.-Y., Lai, S.-Y., Lee, F.-T., Wu, Y.-C., Feng, S.-W., Nikawa, H., & Peng, T.-Y. (2024). Influence of handheld nonthermal plasma on shear bond strength of polyaryletherketone to resin-matrix cement. *Journal of Dental Sciences*, 19(4), 2057–2064. <https://doi.org/10.1016/j.jds.2024.05.029>
- Hui, W. L., Perrotti, V., Iaculli, F., Piattelli, A., & Quaranta, A. (2020). The emerging role of cold atmospheric plasma in implantology: A review of the literature. *Nanomaterials*, 10(8), Article 1505. <https://doi.org/10.3390/nano10081505>
- Jassim, S. J., & Majeed, M. A. (2023). Effect of plasma surface treatment of three different CAD/CAM materials on the micro shear bond strength with resin cement (A comparative in vitro study). *Heliyon*, 9(7), Article e17790. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e17790>
- Kang, S. U., Lee, D.-Y., Kim, Y.-K., Kim, S.-J., Kim, H.-K., & Kim, C.-H. (2024). Effect of various storage media on the physicochemical properties of plasma-treated dental zirconia. *Scientific Reports*, 14, Article 25895. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-77939-w>
- Lata, S., Chakravorty, S., Mitra, T., Pradhan, P. K., Mohanty, S., Patel, P., Jha, E., Panda, P. K., Verma, S. K., & Suar, M. (2022). Aurora Borealis in dentistry: The applications of cold plasma in biomedicine. *Materials Today Bio*, 13, Article 100200. <https://doi.org/10.1016/j.mtbio.2021.100200>
- Li, H.-P., Zhang, X.-F., Zhu, X.-M., Zheng, M., Liu, S.-F., Qi, X., Wang, K.-P., Chen, J., Xi, X.-Q., Tan, J.-G., & Ostrikov, K. (2017). Translational plasma stomatology: Applications of cold atmospheric plasmas in dentistry and their extension. *High Voltage*, 2(3), 188–199. <https://doi.org/10.1049/hve.2017.0066>
- Li, X., Liang, S., Inokoshi, M., Zhao, S., Hong, G., Yao, C., & Huang, C. (2024). Different surface treatments and adhesive monomers for zirconia-resin bonds: A systematic review and network meta-analysis. *Japanese Dental Science Review*, 60, 175–189. <https://doi.org/10.1016/j.jdsr.2024.05.004>
- Liebermann, A., Keul, C., Bähr, N., Edelhoff, D., Eichberger, M., Roos, M., & Stawarczyk, B. (2013). Impact of plasma treatment of PMMA-based CAD/CAM blanks on

surface properties as well as on adhesion to self-adhesive resin composite cements. *Dental Materials*, 29(9), 935–944. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2013.06.004>

Liu, Y., Liu, Q., Yu, Q. S., & Wang, Y. (2016). Nonthermal atmospheric plasmas in dental restoration. *Journal of Dental Research*, 95(5), 496–505. <https://doi.org/10.1177/0022034516629425>

Matthes, R., Jablonowski, L., Koban, I., Quade, A., Hübner, N.-O., Schlueter, R., Weltmann, K.-D., von Woedtke, T., Kramer, A., & Kocher, T. (2015). In vitro treatment of *Candida albicans* biofilms on denture base material with volume dielectric barrier discharge plasma (VDBD) compared with common chemical antiseptics. *Clinical Oral Investigations*, 19(9), 2319–2326. <https://doi.org/10.1007/s00784-015-1463-y>

Matthes, R., Jablonowski, L., Pitchika, V., Holtfreter, B., Eberhard, C., Seifert, L., Gerling, T., Vilardell Scholten, L., Schlüter, R., & Kocher, T. (2022). Efficiency of biofilm removal by combination of water jet and cold plasma: An in-vitro study. *BMC Oral Health*, 22, Article 157. <https://doi.org/10.1186/s12903-022-02195-1>

Minamikawa, H., Att, W., Ikeda, T., Hirota, M., & Ogawa, T. (2016). Long-term progressive degradation of the biological capability of titanium. *Materials*, 9(2), Article 102. <https://doi.org/10.3390/ma9020102>

Nishigawa, G., Maruo, Y., Oka, M., Okamoto, M., Minagi, S., Irie, M., & Suzuki, K. (2004). Effect of plasma treatment on adhesion of self-curing repair resin to acrylic denture base. *Dental Materials Journal*, 23(4), 545–549. <https://doi.org/10.4012/dmj.23.545>

Pott, P.-C., Syväri, T.-S., Stiesch, M., & Eisenburger, M. (2018). Influence of nonthermal argon plasma on the shear bond strength between zirconia and different adhesives and luting composites after artificial aging. *The Journal of Advanced Prosthodontics*, 10(4), 308–314. <https://doi.org/10.4047/jap.2018.10.4.308>

Preissner, S., Kastner, I., Schütte, E., Hartwig, S., Schmidt-Westhausen, A. M., Paris, S., Preissner, R., & Hertel, M. (2016). Adjuvant antifungal therapy using tissue tolerable plasma on oral mucosa and removable dentures in oral candidiasis patients:

- A randomised double-blinded split-mouth pilot study. *Mycoses*, 59(7), 467–475. <https://doi.org/10.1111/myc.12495>
- Stawarczyk, B., Bähr, N., Beuer, F., Wimmer, T., Eichberger, M., Gernet, W., Jahn, D., & Schmidlin, P. R. (2014). Influence of plasma pretreatment on shear bond strength of self-adhesive resin cements to polyetheretherketone. *Clinical Oral Investigations*, 18(1), 163–170. <https://doi.org/10.1007/s00784-013-0966-7>
- Valverde, G. B., Coelho, P. G., Janal, M. N., Lorenzoni, F. C., Carvalho, R. M., Thompson, V. P., Weltmann, K.-D., & Silva, N. R. F. A. (2013). Surface characterisation and bonding of Y-TZP following non-thermal plasma treatment. *Journal of Dentistry*, 41(1), 51–59. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2012.10.002>
- Vechiato Filho, A. J., dos Santos, D. M., Goiato, M. C., de Medeiros, R. A., Moreno, A., Bonatto, L. da R., & Rangel, E. C. (2014). Surface characterization of lithium disilicate ceramic after nonthermal plasma treatment. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 112(5), 1156–1163. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2014.02.021>
- von Woedtke, T., Reuter, S., Masur, K., & Weltmann, K.-D. (2013). Plasmas for medicine. *Physics Reports*, 530(4), 291–320. <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2013.05.005>
- Yıldırım, A. Z., Ünver, S., Meşe, A., Bayram, C., Denkbaş, E. B., & Çevik, P. (2020). Effect of argon plasma and Er:YAG laser on tensile bond strength between denture liner and acrylic resin. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 124(6), 799.e1–799.e5. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2020.08.009>
- Zamperini, C. A., de Lima Carneiro, H., Rangel, E. C., Cruz, N. C., Vergani, C. E., & Machado, A. L. (2013). In vitro adhesion of *Candida glabrata* to denture base acrylic resin modified by glow-discharge plasma treatment. *Mycoses*, 56(2), 134–144. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0507.2012.02223.x>

BÖLÜM 7

PEEK MATERYALİ VE DİŞ HEKİMLİĞİNDE KULLANIM ALANLARI

Bilal AYZAZ¹

¹ Araştırma Görevlisi, Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Diş Hekimliği Fakültesi, Protetik Diş Tedavisi Anabilim Dalı. dtbilalayaz@gmail.com, ORCID:0009-0009-8114-0542

GİRİŞ

Bilgisayar destekli tasarım ve üretim (CAD/CAM) teknolojilerindeki gelişmeler, diş hekimliğinde kullanılan materyallerin çeşitlenmesine ve alternatif materyallerin klinik uygulamalara kazandırılmasına olanak sağlamıştır. Bu materyaller arasında yer alan polietereeterketon (PEEK), yüksek performanslı termoplastik bir polimer olup sahip olduğu mekanik dayanım, fiziksel özellikler ve kimyasal stabilite sayesinde son yıllarda diş hekimliğinin farklı alanlarında giderek daha fazla kullanım alanı bulmuştur. (Najeeb ve ark., 2016; Skirbutis ve ark., 2017)

1. Polietereeterketonun Yapısı Ve Özellikleri

PEEK, [-oksi-1,4-fenilen-oksi-1,4-fenilen-karbonil-1,4-fenilen] şeklinde tanımlanan kimyasal yapıya sahip, aromatik halkaların eter ve keton fonksiyonel grupları aracılığıyla birbirine bağlanmasıyla oluşan yarı kristalin bir termoplastik polimerdir (Ierardo ve ark., 2017). Kimyasal açıdan yüksek stabilite gösteren PEEK, çeşitli çözücü maddelere karşı sahip olduğu direnç ile dikkat çekmektedir. Sülfürik asit dışında yaygın olarak kullanılan geleneksel çözücülerde çözünmemesi ve sterilizasyon işlemlerinin ardından yapısal özelliklerini büyük ölçüde koruyabilmesi, materyalin kimyasal dayanıklılığını ortaya koyan önemli özellikler arasındadır (Staniland ve ark., 1992).

PEEK, alerjik ya da toksik etki göstermemesiyle öne çıkan biyouyumlu bir polimerik materyaldir. Metal alaşımlar ve seramiklerle karşılaştırıldığında, 3–4 GPa düzeyindeki elastisite modülünün kemiğin mekanik özelliklerine daha yakın olması önemli bir avantaj sağlamaktadır (Bötel ve ark., 2018). PEEK'in fiziksel ve mekanik özellikleri, polimer matrise farklı inorganik bileşenlerin ilave edilmesiyle modifiye edilebilmektedir. Özellikle karbon fiber takviyesiyle elastisite modülünün yaklaşık 150 GPa'ya kadar yükseltilebildiği bildirilmiştir. Karbon ve cam fiberlerle güçlendirilmiş PEEK materyalleri ise geliştirilmiş mekanik özellikleri sayesinde diş hekimliğinde kullanılan metal alaşımlara potansiyel bir alternatif olarak değerlendirilmektedir (Panayotov ve ark., 2016).

PEEK'in erime sıcaklığı 334 °C, kristalleşme sıcaklığı 343 °C ve cam geçiş sıcaklığı ise yaklaşık 145 °C olarak bildirilmektedir. Bunun yanı sıra PEEK polimerleri, 1,3–1,5 g/cm³ aralığındaki düşük yoğunlukları sayesinde daha hafif protetik restorasyonların üretimine olanak tanımaktadır (Panayotov ve ark., 2016; Kurtz ve Devine, 2007). Yaklaşık 140–170 MPa arasında değişen bükülme dayanımına sahip olan PEEK, doğal diş dokularıyla mekanik açıdan

uyumlu özellikler sergilemekte ve antagonist doğal dişlerde aşınma oluşturma eğiliminin düşük olmasıyla öne çıkmaktadır (Bathala ve ark., 2019).

Radyolusent özelliğe sahip olan PEEK, radyografik incelemelerde zirkonya ve metal alaşımlarla karşılaştırıldığında daha düşük düzeyde artefakt oluşumuna neden olmaktadır (Najeeb ve ark., 2016).

Ağız ortamında tükürük, beslenme kaynaklı kimyasal ajanlar ve tekrarlayan çiğneme kuvvetleri, dental materyallerin kimyasal ve fiziksel özelliklerini olumsuz yönde etkileyerek zaman içerisinde materyal degradasyonuna yol açabilmektedir. Bununla birlikte, çeşitli çalışmalarda PEEK'in oral ortamda karşılaştığı kimyasal ve mekanik etkenlere rağmen yapısal stabilitesini büyük ölçüde koruyabildiği bildirilmiştir (Gao ve ark., 2015).

PEEK'in estetik açıdan bazı sınırlılıkları bulunmaktadır. Düşük translusensi göstermesi ve karakteristik gri-kahverengi renginin doğal diş dokusunun optik özelliklerini yeterince taklit edememesi, özellikle görünür bölgelerde kullanımını kısıtlayabilmektedir. Materyalin estetik özelliklerini iyileştirmek amacıyla yapısına titanyum dioksit ve seramik partikülleri ilave edilmiş olmakla birlikte, mevcut renk seçenekleri halen sınırlıdır. Bu nedenle, daha doğal ve kabul edilebilir bir görünüm elde etmek amacıyla PEEK yüzeylerinin kompozit rezinlerle veneerlenmesi tercih edilebilmektedir (Soares Machado ve ark., 2022).

2. PEEK Çeşitleri

2.1 BioHPP PEEK

BioHPP'nin yapısında homojen olarak dağılım gösteren, 0,3–0,5 µm boyutundaki mikro partiküller, materyalin toplam içeriğinin yaklaşık %20'sini oluşturmaktadır. Bu partiküllerin materyalin renk stabilitesinin artırılmasına ve plak birikiminin azaltılmasına katkı sağladığı bildirilmektedir. BioHPP'nin mekanik ve fiziksel özellikleri incelendiğinde, eğilme dayanımının 150 MPa'nın üzerinde, elastisite modülünün yaklaşık 4000 MPa, yoğunluğunun 1,3–1,5 g/cm³ olduğu belirtilmektedir. Ayrıca düşük su çözünürlüğü, hafif yapısı ve korozyona karşı direnci, materyalin dikkat çeken özelliklerindendir. (Georgiev ve ark., 2018).

Mikrobiyolojik açıdan yapılan değerlendirmelerde, oral mikroorganizmaların BioHPP-PEEK yüzeylerine adezyonu ile titanyum ve zirkonyum dioksit yüzeylerine adezyonu arasında belirgin bir farklılık bulunmadığı bildirilmiştir (Georgiev ve ark., 2018). Ayrıca deneysel hayvan çalışmalarında PEEK'in kemik dokusuyla yüksek biyouyumluluk sergilediği;

sitotoksik, mutajenik, karsinojenik veya immünojenik etkilere ilişkin olumsuz bulgulara rastlanmadığı ifade edilmiştir (Wiesli ve Özcan, 2015).

2.2. Cam Fiber İlaveli PEEK (GFR-PEEK)

Cam fiber takviyeli polietereeterketon (GFR-PEEK), yarıçapları 1–10 µm arasında değişen cam fiberlerin PEEK polimerine %10 oranında ilave edilmesiyle elde edilen kompozit bir materyaldir. Cam fiberlerle güçlendirilmesi sonucunda elastisite modülünün yaklaşık 12 GPa düzeyine ulaştığı bildirilmektedir. Bunun yanı sıra, GFR-PEEK'in osteokalsin oluşumunu destekleyebilecek uygun bir ortam sağlayabildiği ve bu yönüyle kemik dokusuyla biyolojik etkileşim açısından potansiyel taşıdığı belirtilmiştir (Rahmitasari ve ark., 2017).

2.3. Karbon Fiber İlaveli PEEK (CFR-PEEK)

Karbon fiber takviyeli polietereeterketon (CFR-PEEK), PEEK polimerinin yapısına 6–9 µm boyutlarında kısa karbon fiberlerin %30 oranında ilave edilmesiyle elde edilen kompozit bir materyaldir. Karbon fiberlerle güçlendirilmesi, materyalin çigneme kuvvetlerine karşı mekanik dayanımını artırırken bu kuvvetlerin çevre kemik dokusuna daha dengeli bir şekilde iletilmesine katkı sağlamaktadır (Nakahara ve ark., 2013; Schwitalla ve ark., 2016). CFR-PEEK'in elastisite modülünün yaklaşık 18 GPa, çekme dayanımının ise 120 MPa olduğu bildirilmektedir. CFR-PEEK ve titanyum implantların biyomekanik davranışlarının karşılaştırıldığı çalışmalarda, karbon fiberle güçlendirilmiş PEEK implantların kemik-implant arayüzünde daha düşük stres birikimine neden olabildiği belirtilmiştir (Lee ve ark., 2012; Sarot ve ark., 2010).

2.4. Nano-TiO₂ PEEK (N-TiO₂-PEEK)

Biyoaktif ve hidrofilik özelliklere sahip titanyum oksidin (TiO₂) PEEK polimerinin yapısına ilave edilmesi, materyalin biyolojik aktivitesinin artırılmasına katkı sağlamaktadır. Titanyum oksit ile modifiye edilen PEEK yüzeylerinin osteoblastların adezyonunu ve gelişimini destekleyerek kemik dokusuyla biyolojik etkileşimi olumlu yönde etkileyebildiği bildirilmiştir (Wang ve ark., 2015).

2.5. Nano-Florapatit PEEK (NFA-PEEK)

Nano-floroapatit (NFA) yapısından salınan florür iyonları, bakteriyel enzimlerin aktivitesini etkileyerek NFA ile modifiye edilmiş PEEK (NFA/PEEK) materyaline antibakteriyel özellik kazandırmaktadır. Bu modifikasyonun biyofilm oluşumunu ve bakteriyel adezyonu sınırlandırabildiği, aynı zamanda bakteriyel hücre ölümünü artırarak peri-implantitis gelişme

riskinin azaltılmasına katkı sağlayabileceği bildirilmiştir (Wang ve ark., 2015; Wu ve ark., 2012).

2.6. Hidroksiapatit İlaveli PEEK (HA/PEEK)

Hidroksiapatit (HA) takviyeli PEEK, boyutları 3–1000 µm arasında değişen HA kristallerinin polimer yapısına %30 oranında ilave edilmesiyle elde edilen kompozit bir materyaldir. HA içeriğindeki artışın materyalin mikrosertliğini artırdığı, buna karşın çekme dayanımında azalmaya neden olduğu bildirilmiştir (Johansson ve ark., 2015).

3. PEEK'in Üretim Teknikleri

3.1. Selektif Laser Sinterleme Yöntemi

Yaygın olarak kullanılan üretim yöntemlerinden biri olmakla birlikte, yüksek maliyeti ve lazer ışınının sınırlı penetrasyon kapasitesi nedeniyle bazı dezavantajlara sahiptir. Özellikle yüksek yoğunluklu lazer ışını kullanımının, geniş yüzeylerin ve çok ince yapıların sinterlenmesini güçleştirebildiği bildirilmiştir (Tan ve ark., 2005).

3.2. Enjeksiyon Kalıplama Yöntemi

Enjeksiyon kalıplama yönteminde, pelet veya granül formundaki PEEK polimeri, enjeksiyon kalıplama makinesinde ısıtılarak eritilmekte ve ardından yüksek basınç altında önceden ısıtılmış kalıba aktarılmaktadır. Kalıp içerisinde şekillenen materyal, yeterli düzeyde soğuyarak katılaşmasının ardından kalıptan çıkarılmaktadır (Kurtz, 2019). Enjeksiyon kalıplama makineleri, geleneksel pres sistemlerine kıyasla daha yüksek hız ve basınç değerlerinde üretim gerçekleştirebilmektedir. Bununla birlikte, üretim parametrelerinin uygun şekilde kontrol edilmemesi veya ekipman kullanımından kaynaklanan hatalar, polimerin termal bozunmasına ve buna bağlı olarak mekanik ve fiziksel özelliklerinin olumsuz etkilenmesine neden olabilmektedir. Bu nedenle, PEEK'in eritilerek şekillendirilmesi sırasında üretici tarafından belirtilen işlem koşullarına ve teknik önerilere uyulması önem taşımaktadır (Tipton, 2015; Chen ve ark., 2016).

3.3. Çekme-Ekstrüzyon Yöntemi

Enjeksiyon kalıplama tekniğiyle benzer prensiplere dayanan bu yöntemde, pelet veya granül formundaki PEEK polimeri basınç altında eritilerek vida mekanizması aracılığıyla önceden ısıtılmış kalıba aktarılmaktadır. Kalıp içerisinde basınç uygulanarak şekillendirilen materyal, oda sıcaklığına kadar soğutulduktan sonra kalıptan çıkarılmaktadır (Kurtz, 2019). Bu üretim

yöntemi, CAD/CAM sistemleriyle karşılaştırıldığında daha düşük maliyetli bir alternatif sunmaktadır. Ayrıca, kalıp sıcaklığının uygun şekilde ayarlanmaması, PEEK polimerinin plastik faza geçişini olumsuz etkileyerek materyalin mekanik özelliklerinde istenmeyen değişikliklere neden olabilmektedir. Bu sebeple, üretim sürecinde sıcaklık parametrelerinin dikkatle kontrol edilmesi önem taşımaktadır (Siewert ve Parra, 2013).

3.4. Sıkıştırma Kalıplama Yöntemi

PEEK materyalinin pelet veya granül formundaki ham maddesi, ısıtılmış iki levha arasına yerleştirilerek basınç altında sıkıştırılmakta ve uygulanan ısının etkisiyle şekillendirilmektedir. Bu üretim yöntemi, enjeksiyon kalıplama tekniğine kıyasla daha düşük maliyetli olmakla birlikte, daha uzun bir üretim süresi gerektirmektedir (Kurtz, 2019).

3.5. Eriyik Yığma Modelleme Yöntemi

Özellikle büyük hacimli medikal implantların üretiminde tercih edilen bu teknik, üç boyutlu baskı teknolojileri arasında yer almaktadır. Bu yöntemle üretilen yapıların mekanik özellikleri; baskı hızı, üretim sıcaklığı, tarama stratejisi, katman kalınlığı, katman çapı, konum sıcaklığı ve dolgu oranı gibi çeşitli üretim parametrelerinden etkilenmektedir (Deng ve ark., 2018).

3.6. CAD/CAM ile Üretim Yöntemi

CAD/CAM teknolojisiyle PEEK restorasyonların üretimi, materyalin işlenme sürecinde fiziksel özelliklerinin büyük ölçüde korunması, başlangıçta kullanılan bloklarla benzer teknik özelliklerin elde edilmesi, üretim aşamalarının kontrol edilebilir olması, işlem süresinin kısa olması ve frez aşınmasının sınırlı düzeyde gerçekleşmesi gibi avantajlar sunmaktadır (Tipton, 2015; Alt ve ark., 2011). Bu yöntemde PEEK bloklar, bilgisayar kontrollü frezeleme cihazları ve standart frezler aracılığıyla istenilen geometrik forma dönüştürülmektedir. CAD/CAM yöntemiyle üretilen PEEK esaslı sabit protetik restorasyonların, zirkonya ve lityum disilikat cam seramik restorasyonlara kıyasla daha yüksek kırılma dayanımı gösterebildiği bildirilmiştir (Razzaque ve Dhaded, 2016). Bununla birlikte, sistemin yüksek başlangıç yatırım maliyeti, kullanım için teknik bilgi ve deneyim gerektirmesi ve frezeleme işlemi sırasında blok materyalinin kullanılmayan bölümlerinin atık hâline gelmesi, yöntemin başlıca dezavantajları arasında yer almaktadır (Harb ve ark., 2019).

4. Polietereterketonun Diş Hekimliğinde Kullanım Alanları

PEEK'in sahip olduğu biyouyumluluk, kimyasal stabilite ve mekanik dayanım gibi özellikler, bu materyalin diş hekimliğinin farklı disiplinlerinde alternatif bir biyomateryal olarak değerlendirilmesine olanak sağlamıştır (Seferli ve Sarıdağ, 2020; Tekin ve ark., 2018).

Ortodonti alanında PEEK, sahip olduğu mekanik özellikler nedeniyle diğer materyallere alternatif olarak araştırılmaktadır. Poliviniliden florür (PVDF) ve polietersülfon (PES) gibi polimerlerle karşılaştırıldığında PEEK'in daha yüksek ortodontik direnç gösterebildiği ve oluşturduğu ortodontik kuvvetlerin titanyum-molibden (Ti-Mo) ve nikel-titanyum (Ni-Ti) alaşımlarıyla elde edilen kuvvet değerlerine yakın olduğu bildirilmiştir. Bu özellikleri, PEEK'in özellikle metal içermeyen ortodontik apacey ve komponentlerin geliştirilmesinde potansiyel bir materyal olarak değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır (Tekin ve ark., 2018).

Cerrahi alanda PEEK, özellikle implant materyali olarak titanyum alaşımlarına alternatif oluşturabilecek yüksek performanslı bir polimer olarak değerlendirilmektedir. Titanyuma alternatif olarak alüminyum oksit esaslı seramik ve zirkonya implantlar da geliştirilmiş olmakla birlikte, *in-vivo* çalışmalar PEEK esaslı implantların uzun dönem kullanım açısından umut verici bir biyomateryal olduğunu göstermektedir. PEEK implantların titanyum implantlarla karşılaştırıldığında daha düşük alerjik reaksiyon potansiyeli gösterebilmesi, radyografik görüntülemelerde daha az artefakt oluşturması, estetik açıdan avantaj sağlaması ve kemiğe yakın elastisite modülüne sahip olması önemli üstünlükleri arasında yer almaktadır. Bununla birlikte, kimyasal ve biyolojik açıdan inert yapısı PEEK'in kemik dokusuyla doğrudan bağlanmasını sınırlandırabilmekte ve osteoblast farklılaşmasını yeterli düzeyde destekleyememesine neden olabilmektedir (Seferli ve Sarıdağ, 2020; Song ve ark., 2017; Guo ve ark., 2018).

Protetik diş tedavisinde PEEK; hareketli bölümlü protezlerden implant abutmentlerine ve sabit bölümlü protez altyapılarına kadar geniş bir kullanım alanına sahiptir. Hareketli bölümlü protezlerde geleneksel kobalt-krom alaşımlarının bazı estetik ve biyomekanik sınırlılıkları, termoplastik polimerlerin alternatif olarak değerlendirilmesine yol açmıştır. Poliamid materyaller düşük elastisite modülü ve estetik özellikleriyle avantaj sağlamakla birlikte oklüzal tırnak kullanımındaki sınırlılıklar, yetersiz rijitlik ve astarlama güçlükleri gibi dezavantajlara sahiptir; asetal materyaller ise mekanik açıdan daha avantajlı olmasına rağmen doğal dişlere benzer translusensi sağlayamamaktadır (Zoidis ve ark., 2016; Fueki ve ark., 2014; Arda ve ark., 2005). Bu materyallere alternatif olarak PEEK, hareketli bölümlü protezlerin altyapı ve kroşe

yapılarında kullanılmaya başlanmıştır. PEEK kroşelerin kobalt-krom kroşelere göre daha düşük retantif kuvvet gösterdiği bildirilmekle birlikte, *in-vitro* sonuçların klinik koşulları bütünüyle yansıtamayabileceği belirtilmektedir (Tannous ve ark., 2012). Ayrıca BioHPP esaslı PEEK hareketli bölümlü protezlerin kobalt-krom protezlerden yaklaşık %27,5 oranında daha hafif olabildiği, yüksek kırılma dayanımı gösterebildiği ve maksillofasiyal defektli hastalarda hafiflik, doku uyumu, estetik ve konfor açısından olumlu sonuçlar sağlayabildiği bildirilmiştir (Zoidis ve ark., 2016; Costa-Palau ve ark., 2014). İmplant üstü protetik uygulamalarda ise PEEK, titanyum, altın alaşımları ve zirkonyaya alternatif bir abutment materyali olarak değerlendirilmektedir. Titanyumun özellikle anterior bölgede oluşturabileceği metalik yansıma, altının yüksek maliyeti ve zirkonyanın mekanik özellikleriyle ilişkili bazı sınırlılıklar alternatif abutment materyallerine olan ilgiyi artırmıştır (Tekin ve ark., 2018; Al-Rabab ve ark., 2019). PEEK abutmentlerin zirkonya ve titanyum abutmentlerle benzer mikrobiyal afinite sergileyebildiği ve yumuşak dokularla histolojik açıdan uyumlu bir bağlantı oluşturabildiği bildirilmiştir (Maté Sánchez de Val ve ark., 2016).



Şekil 1. Geçici Abutmentlerde PEEK ve Titanyum Kaide Kullanımı (Suphangul ve ark., 2022)

PEEK esaslı vidaların geleneksel titanyum abutment vidalarına kıyasla kırılmaya karşı daha dirençli olabileceği ve kırılma durumunda implant içerisinde kalan parçanın daha kolay uzaklaştırılabileceği de bildirilmiştir (Neumann ve ark., 2014). Sabit protetik uygulamalarda ise PEEK; biyouyumluluğu, ağız içindeki aşınmaya karşı direnci ve seramometal restorasyonlara kıyasla daha kolay tamir edilebilmesi nedeniyle alternatif bir altyapı materyali olarak kullanılmaktadır (Stawarczyk ve ark., 2013; Taufall ve ark., 2016).

KAYNAKÇA

- Al-Rabab'ah, M., Hamadneh, W., Alsalem, I., Khraisat, A., & Abu Karaky, A. (2019). Use of high performance polymers as dental implant abutments and frameworks: A case series report. *Journal of Prosthodontics*, 28, 365–372. <https://doi.org/10.1111/jopr.12639>
- Alt, V., Hannig, M., Wöstmann, B., & Balkenhol, M. (2011). Fracture strength of temporary fixed partial dentures: CAD/CAM versus directly fabricated restorations. *Dental Materials*, 27(4), 339–347.
- Arda, T., & Arikan, A. (2005). An in vitro comparison of retentive force and deformation of acetal resin and cobalt-chromium clasps. *Journal of Prosthetic Dentistry*, 94(3), 267–274. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2005.06.009><https://doi.org/10.1111/jopr.12639>
- Bathala, L., Majeti, V., Rachuri, N., Singh, N., & Gedela, S. (2019). The Role of Polyether Ether Ketone (Peek) in Dentistry – A Review. *Journal of Medicine and Life*, 12(1), 5. <https://doi.org/10.25122/JML-2019-0003>
- Bötel, F., Zimmermann, T., Sütel, M., Müller, W. D., & Schwitalla, A. D. (2018). Influence of different low-pressure plasma process parameters on shear bond strength between veneering composites and PEEK materials. *Dental Materials*, 34(9), e246–e254. <https://doi.org/10.1016/J.DENTAL.2018.06.004>
- Chen, F., Gatea, S., Ou, H., Lu, B., & Long, H. (2016). Fracture characteristics of PEEK at various stress triaxialities. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 64, 173–186.
- Costa-Palau, S., Torrents-Nicolas, J., Brufau-de Barberà, M., & Cabratosa-Termes, J. (2014). Use of polyetheretherketone in the fabrication of a maxillary obturator prosthesis: A clinical report. *Journal of Prosthetic Dentistry*, 112(3), 680–682. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2013.10.026><https://doi.org/10.1111/jopr.12639>
- Deng, X., Zeng, Z., Peng, B., Yan, S., & Ke, W. (2018). Mechanical properties optimization of PEEK via fused deposition modeling. *Materials*, 11(2), 216.
- Fueki, K., Ohkubo, C., Yatabe, M., Arakawa, I., Arita, M., Ino, S., et al. (2014). Clinical application of removable partial dentures using thermoplastic resin. Part II: Material properties and clinical features of non-metal clasp dentures. *Journal of Prosthodontic*

- Research, 58(2), 71–84.
<https://doi.org/10.1016/j.jpor.2014.03.002><https://doi.org/10.1111/jopr.12639>
- Gao, S., Gao, S., Xu, B., & Yu, H. (2015). Effects of Different pH-Values on the Nanomechanical Surface Properties of PEEK and CFR-PEEK Compared to Dental Resin-Based Materials. *Materials* (Basel, Switzerland), 8(8), 4751–4767.
<https://doi.org/10.3390/MA8084751>
- Georgiev, J., Vlahova, A., Kissov, H., Aleksandrov, S., & Kazakova, R. (2018). Possible application of BioHPP in prosthetic dentistry: A literature review. *Journal of IMAB*, 24(1), 1896–1898.
- Harb, I., Khalek, E., & Hegazy, S. (2019). CAD/CAM constructed poly(etheretherketone) (PEEK) framework of Kennedy Class I removable partial denture: A clinical report. *Journal of Prosthodontics*, 28(2), e595–e598.
- Ierardo, G., Luzzi, V., Lesti, M., Vozza, I., Brugnoletti, O., Polimeni, A., & Bossù, M. (2017). Peek polymer in orthodontics e1271 *Journal section: Biomaterials and Bioengineering in Dentistry* Peek polymer in orthodontics: A pilot study on children. *J Clin Exp Dent*, 9(10), 1271–1276. <https://doi.org/10.4317/jced.54010>
- Johansson, P., Jimbo, R., Kozai, Y., et al. (2015). Nanosized hydroxyapatite coating on PEEK implants enhances early bone formation: A histological and three-dimensional investigation in rabbit bone. *Materials*, 8(7), 3815–3830.
- Kurtz, S. M. (2019). Synthesis and processing of PEEK for surgical implants. In S. M. Kurtz (Ed.), *PEEK Biomaterials Handbook* (2nd ed., pp. 11–25). William Andrew Publishing, Elsevier.
- Kurtz, S. M., & Devine, J. N. (2007). PEEK biomaterials in trauma, orthopedic, and spinal implants. In *Biomaterials* (Vol. 28, Number 32, pp. 4845–4869).
<https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2007.07.013>
- Lee, W. T., Koak, J. Y., Lim, Y. J., Kim, S. K., Kwon, H. B., & Kim, M. J. (2012). Stress shielding and fatigue limits of poly-ether-ether-ketone dental implants. *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials*, 100B(4), 1044–1052.
- Maté Sánchez de Val, J. E., Gómez-Moreno, G., Pérez-Albacete Martínez, C., Ramírez-Fernández, M. P., Granero-Marín, J. M., Gehrke, S. A., & Calvo-Guirado, J. L. (2016).

- Peri-implant tissue behavior around non-titanium material: Experimental study in dogs. *Annals of Anatomy*, 206, 104–109. <https://doi.org/10.1016/j.aanat.2016.03.005><https://doi.org/10.1111/jopr.12639>
- Najeeb, S., Zafar, M. S., Khurshid, Z., & Siddiqui, F. (2016). Applications of polyetheretherketone (PEEK) in oral implantology and prosthodontics. *Journal of Prosthodontic Research*, 60(1), 12–19.
- Nakahara, I., Takao, M., Bandoh, S., Bertollo, N., Walsh, W. R., & Sugano, N. (2013). In vivo implant fixation of carbon fiber-reinforced PEEK hip prostheses in an ovine model. *Journal of Orthopaedic Research*, 31(3), 485–492.
- Neumann, E. A. F., Villar, C. C., & França, F. M. G. (2014). Fracture resistance of abutment screws made of titanium, polyetheretherketone, and carbon fiber-reinforced polyetheretherketone. *Brazilian Oral Research*, 28(1), 1–5. <https://doi.org/10.1590/1807-3107BOR-2014.vol28.0028><https://doi.org/10.1111/jopr.12639>
- Panayotov, I. V., Orti, V., Cuisinier, F., & Yachouh, J. (2016). Polyetheretherketone (PEEK) for medical applications. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine* 2016 27:7, 27(7), 118–. <https://doi.org/10.1007/S10856-016-5731-4>
- Rahmitasari, F., Ishida, Y., Kurahashi, K., Matsuda, T., Watanabe, M., & Ichikawa, T. (2017). PEEK with reinforced materials and modifications for dental implant applications. *Dentistry Journal*, 5(4), 35.
- Razzaque, A., & Dhaded, S. (2016). An insight into a novel material: PEEK. *Research and Review in Prosthodontic Dentistry*, 1(1).
- Sarot, J. R., Contar, C. M. M., Cruz, A. C. C., & De Souza Magini, R. (2010). Evaluation of the stress distribution in CFR-PEEK dental implants by the three dimensional finite element method. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 21(7), 2079–2085.
- Schwitalla, A. D., Abou-Emara, M., Zimmermann, T., Spintig, T., Beuer, F., Lackmann, J., & Müller, W. D. (2016). The applicability of PEEK-based abutment screws. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 63, 244–251.
- Seferli, Z., & Sarıdağ, S. (2020). PEEK polimerinin dişhekimliğinde kullanımı. *Selcuk Dental Journal*, 7(2), 354–363. <https://doi.org/10.15311/selcukdentj.476586>

- Siewert, B., & Parra, M. (2013). A new group of material in dentistry: PEEK as a framework material used in 12-piece implant-supported bridges. *Zeitschrift für Zahnärztliche Implantologie*, 29, 148–159.
- Skirbutis, G., Dzingutė, A., Masiliūnaitė, V., Šulcaitė, G., & Žilinskas, J. (2017). A review of PEEK polymer's properties and its use in prosthodontics. *Stomatologija*, 19(1), 19-23.
- Soares Machado, P., Cadore Rodrigues, A. C., Chaves, E. T., Susin, A. H., Valandro, L. F., Pereira, G. K. R., & Rippe, M. P. (2022). Surface Treatments and Adhesives Used to Increase the Bond Strength Between Polyetheretherketone and Resin based Dental Materials: A Scoping Review. *The Journal of Adhesive Dentistry*, 24(1), 233–245. <https://doi.org/10.3290/J.JAD.B2288283>
- Staniland, P. A., Wilde, C. J., Bottino, F. A., Di Pasquale, G., Pollicino, A., & Recca, A. (1992). Synthesis, characterization and study of the thermal properties of new polyarylene ethers. *Polymer*, 33(9), 1976–1981. [https://doi.org/10.1016/0032-3861\(92\)90503-O](https://doi.org/10.1016/0032-3861(92)90503-O)
- Stawarczyk, B., Beuer, F., Wimmer, T., Jahn, D., Sener, B., Roos, M., & Schmidlin, P. R. (2013). Polyetheretherketone—A suitable material for fixed dental prostheses? *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials*, 101(7), 1209–1216. <https://doi.org/10.1002/jbm.b.32932><https://doi.org/10.1111/jopr.12639>
- Suphangul, S., Rokaya, D., Kanchanasobhana, C., Rung siyakull, P. ve Chajareenont, P. (2022). "PEEK biomaterial in long-term provisional implant restorations: A review." *Journal of Functional Biomaterials*, Cilt: 13, Sayı: 2, s. 33.
- Tan, K. H., Chua, C. K., Leong, K. F., Cheah, C. M., Gui, W. S., Tan, W. S., & Wiria, F. E. (2005). Selective laser sintering of biocompatible polymers for applications in tissue engineering. *Bio-Medical Materials and Engineering*, 15(1–2), 113–124.
- Tannous, F., Steiner, M., Shahin, R., & Kern, M. (2012). Retentive forces and fatigue resistance of thermoplastic resin clasps. *Dental Materials*, 28(3), 273–278. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2011.10.016><https://doi.org/10.1111/jopr.12639>
- Taufall, S., Eichberger, M., Schmidlin, P. R., & Stawarczyk, B. (2016). Fracture load and failure types of different veneered polyetheretherketone fixed dental prostheses. *Clinical Oral Investigations*, 20(9), 2493–2500. <https://doi.org/10.1007/s00784-016-1777-4><https://doi.org/10.1111/jopr.12639>

- Tekin, S., Cangül, S., Adıgüzel, Ö., & Değer, Y. (2018). Areas for use of PEEK material in dentistry. *International Dental Research*, 8(2), 84–92. <https://doi.org/10.5577/intdentres.2018.vol8.no2.6>
- Tipton, P. (2015). High performance polymers—Part one. *Private Dentistry*, October, 60–65.
- Wang, L., Zhang, H., Deng, Y., Luo, Z., Liu, X., & Wei, S. (2015). Study of oral microbial adhesion and biofilm formation on the surface of nano fluorohydroxyapatite/polyetheretherketone composite. *Zhonghua Kou Qiang Yi Xue Za Zhi*, 50(6), 378–382.
- Wiesli, M. G., & Özcan, M. (2015). High-performance polymers and their potential application as medical and oral implant materials: A review. *Implant Dentistry*, 24(4), 448–457.
- Wu, X., Liu, X., Wei, J., Ma, J., Deng, F., & Wei, S. (2012). Nano-TiO₂/PEEK bioactive composite as a bone substitute material: In vitro and in vivo studies. *International Journal of Nanomedicine*, 7, 1215–1225.
- Zoidis, P., Papathanasiou, I., & Polyzois, G. (2016). The use of a modified poly-ether-etherketone (PEEK) as an alternative framework material for removable dental prostheses. A clinical report. *Journal of Prosthodontics*, 25(7), 580–584. <https://doi.org/10.1111/jopr.12325>