PROTETİK DİŞ HEKİMLİĞİNDE GÜNCEL YAKLAŞIMLAR:
DİJİTAL TEKNOLOJİLER, MATERYALLER VE KLİNİK UYGULAMALAR

Editör:
PROF. DR. EMİNE GÖNCÜ BAŞARAN



BİDGE Yayınları

BİDGE Yayınları

Protetik Diş Hekimliğinde Güncel Yaklaşımlar: Dijital Teknolojiler, Materyaller ve Klinik Uygulamalar

Editör: PROF. DR. EMİNE GÖNCÜ BAŞARAN

ISBN: 978-625-5436-02-3

1. Baskı
Sayfa Düzeni: Gözde YÜCEL
Yayınlama Tarihi: 2026-10-25
BİDGE Yayınları

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

Sertifika No: 71374
Yayın hakları © BİDGE Yayınları
www.bidgeyayinlari.com.tr - bidgeyayinlari@gmail.com
Krc Bilişim Ticaret ve Organizasyon Ltd. Şti.
Güzeltepe Mahallesi Abidin Daver Sokak Sefer Apartmanı No: 7/9 Çankaya / Ankara

İÇİNDEKİLER

PROTETIK DIŞ TEDAVISINDE DIJITAL İŞ AKIŞLARI: KLINIKTEN DENTAL LABORATUVARA GÜNCEL YAKLAŞIMLAR 1
HASAN DEMİR

CAD/CAM SİSTEMLERDE EKSİLTMELİ VE EKLEMELİ ÜRETİM TEKNİKLERİ 17
BERNA BİŞKİN DİNÇER, SEDA BOZKURT

DİŞ HEKİMLİĞİNDE CAD/CAM SİSTEMLERİ VE EKLEMELİ ÜRETİM 40
CANSU ERKAN

3 BOYUTLU YAZICI İLE ÜRETİLEN REZİNLERDE OKSİJEN İNHİBİSYONU VE AZOT DESTEKLİ KÜRLEME ..57
MERVE SOYDAN

İNTRAORAL FOTOGRAMETRİ İLE TAM ARK İMPLANT ÖLÇÜSÜ 72
SİMAY BOZKURT, BERFU ERHAN GÜRESER, SÜHEYLA ESEN

TAM ARK İMPLANT DESTEKLİ SABİT PROTEZLERDE DİJİTAL ÖLÇÜNÜN DOĞRULANMASI VE PASİF UYUMUN DEĞERLENDİRİLMESİ 93
ETHEM FURKAN HIDIR

CURRENT AND NEXT-GENERATION DENTAL IMPLANT ABUTMENT MATERIALS: CLINICAL PERFORMANCE AND MATERIAL SELECTION 109
ELİF YEĞİN, BAŞAK BURCU KÖMÜRATEŞ

MONOLİTİK ZİRKONYA RESTORASYONLARDA YÜZEY İŞLEMLERİ VE SİMANTASYON PROTOKOLLERİ 135
ALİ SİNCAR

İÇİNDEKİLER

SABİT PROTETİK RESTORASYONLARDA ADEZİV SİMANTASYON: YÜZEY İŞLEMLERİ VE SİMAN SEÇİMİ 166
NAFİA EBRU POLAT AYDOĞDU

BÖLÜM 1:
PROTETIK DIŞ TEDAVISINDE DIJITAL İŞ AKIŞLARI: KLINIKTEN DENTAL LABORATUVARA GÜNCEL YAKLAŞIMLAR

Hasan DEMİR[1]

Giriş

Protetik diş tedavisinin dijitalleşmesi yalnızca geleneksel ölçünün tarayıcıyla değiştirilmesi değildir. Klinik ve laboratuvar arasında izlenebilir bir veri akışı kurulması, restorasyonun tasarım kararlarının üretimle tutarlı biçimde aktarılması ve klinik kontrollerin sürdürülmesi anlamına gelir.

Protetik diş tedavisi, diş hekiminin klinik kararları ile diş protez teknikerinin laboratuvar uygulamalarının birbirini doğrudan etkilediği, zincirleme bir karar alma sürecidir. Bu süreçte ölçü alma, çene ilişkilerinin kaydedilmesi, restorasyonun tasarımı, üretimi ve bitirme işlemleri birbirine bağımlı aşamalar oluşturur; herhangi bir aşamadaki bilgi kaybı, nihai restorasyonun uyumunu ve klinik başarısını doğrudan etkiler. Dijital diş hekimliğinin son yirmi yılda gösterdiği gelişim, bu zincirin büyük ölçüde sayısal veri üzerinden yürütülmesine olanak tanımış; ağız içi tarama sistemleri, CAD yazılımları, frezeleme üniteleri ve üç boyutlu (3B) baskı sistemleri klinik ve laboratuvar arasındaki ilişkiyi yeniden tanımlamıştır. Bu dönüşüm, yalnızca yeni cihazların kullanıma girmesi anlamına gelmemekte; aynı zamanda mesleki rollerin, eğitim içeriklerinin ve üretim ekonomisinin yeniden düzenlenmesini gerektirmektedir. (Afrashtehfar ve ark., 2022; Saeed ve ark., 2023).

Dijital iş akışlarının yaygınlaşması ile birlikte literatürde karşılaştırmalı çalışmaların sayısı hızla artmıştır. Sistematik derlemeler ve meta-analizler, intraoral tarayıcıların kısa mesafeli taramalarda güvenilir sonuçlar verdiğini, ancak tam ark taramalarında sapmanın artabileceğini göstermektedir. İmplant üstü restorasyonlarda dijital ölçünün doğruluğu; tarayıcı tipi, scanbody tasarımı, tarama stratejisi ve implant açılanması gibi çok sayıda değişkenden etkilenmekte, bu nedenle çalışmalar arasında tutarsız sonuçlar bildirilebilmektedir. Benzer bir heterojenlik, eklemeli ve eksiltmeli üretim yöntemlerinin karşılaştırıldığı çalışmalarda da görülmekte; bazı araştırmalar eksiltmeli üretimin daha yüksek trueness sağladığını bildirirken, diğerleri eklemeli üretimin presizyon üstünlüğüne dikkat çekmektedir. Bu tablo, "dijital yöntemler konvansiyonel yöntemlerden daha doğrudur" veya "3B baskı frezelemeden daha avantajlıdır" gibi genelleyici ifadelerin bilimsel olarak savunulamaz olduğunu göstermektedir. (Saeed ve ark., 2023; Mou ve ark., 2025).

Protetik diş tedavisinde dijital iş akışlarını klinik ve dental laboratuvar perspektiflerini bütünleştirerek değerlendirmektir. Çalışma dört ana eksende yapılandırılmıştır:

(i) Dijitalleşmenin gelişimi ve geleneksel-dijital iş akışlarının karşılaştırılması,

(ii) Klinik uygulamalarda dijital iş akışları,

(iii) Dental laboratuvarda dijital tasarım ve üretim teknolojileri,

(iv) Güncel sınırlılıklar, gelecek perspektifleri ve klinik-laboratuvar entegrasyonu.

[1] Mardin Artuklu Üniversitesi, Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksek Okulu, Dişçilik Hizmetleri Bölümü, Mardin, TÜRKİYE, Orcid No: 0000-0001-5838-472X, e-mail: hasanprof47@gmail.com

Dijital Iş Akişinin Temel Yapisi

Klinik Veriden Restorasyona

Dijital üretimde doğruluk, yalnızca tarayıcıya ait bir özellik değil, birbirini izleyen aşamaların ortak sonucudur. Tarama, tasarım, üretim ve bitirme aşamalarının her biri toplam hataya katkıda bulunabilir.

Protetik diş tedavisinde dijitalleşmenin tarihsel seyri, tek bir teknolojik atılımdan çok, birbirini besleyen üç ayrı gelişim hattının kesişmesiyle açıklanabilir: sayısal veri toplama (tarayıcılar), sayısal tasarım ve sayısal üretim. Geleneksel iş akışında aljinat veya elastomerik ölçü maddeleriyle alınan ölçülerin alçıya dökülmesi, mum modelaj ile restorasyonun şekillendirilmesi ve kayıp mum yöntemiyle döküm ya da presleme işlemleri yer alırken; dijital iş akışında bu aşamaların büyük bölümü sanal ortamda gerçekleştirilmekte ve veri, eklemeli veya eksiltmeli üretim cihazlarına aktarılmaktadır. Bu dönüşümün temel belirleyicisi, ağız içi görüntüleme teknolojilerinin olgunlaşması olmuştur; çünkü klinik verinin sayısallaştırılması, laboratuvar tarafındaki tüm dijital süreçlerin ön koşuludur. (Saeed ve ark., 2023; Bernauer ve ark., 2023; Abduo ve Rasaie, 2025).

Dijital iş akışının ilk halkası veri toplamadır. Ağız içi tarayıcılar, bir ışık kaynağı aracılığıyla dental arkların yüzeylerini tarar, görüntü sensörleri tarafından kaydedilen görüntüler yazılım tarafından işlenerek bir nokta bulutu oluşturulur. Bu nokta bulutu, ardından çokgen (poligonal) bir yüzeye dönüştürülerek sanal model oluşturulur. Modelin çokgen yoğunluğu arttıkça yüzey kalitesi yükselirken, tarama süresi uzamakta ve daha yüksek işlem gücüne sahip bilgisayarlara gereksinim doğmaktadır. İkinci halka, sanal model üzerinde restorasyonun tasarlandığı CAD aşamasıdır. Kron, köprü, inley, onley, veneer ve implant üstü restorasyonlar bu aşamada tasarlanır; diş protez teknikeri burada biyofonksiyonel sınırlar, marjinal bütünlük ve karşıt ark ile uyum parametrelerini yönetir. Üçüncü halka, tasarımın fiziksel nesneye dönüştürüldüğü CAM aşamasıdır: eksiltmeli (frezeleme) veya eklemeli (3B baskı) üretim yöntemleri devreye girer. (Grande ve ark., 2022; Mou ve ark., 2025). Dijital iş akışının klinik, laboratuvar ve klinik-laboratuvarı birleştiren biçimlerde kurulabilmesi, her vakanın aynı üretim yolunu izlemesinin zorunlu olmadığını göstermektedir (Abduo ve Rasaie, 2025).

Klinik pratikte dijital iş akışları tek tip değildir. Tam dijital iş akışı, ölçüden restorasyonun teslimine kadar tüm aşamaların dijital araçlarla yürütüldüğü süreci tanımlar. Bu yaklaşımda ağız içi tarama, sanal artikülatörde çene ilişkilerinin kaydı, CAD tasarımı ve doğrudan CAM üretimi birbirini izler. Kısmi dijital iş akışında ise bazı aşamalar analog olarak sürdürülür; örneğin konvansiyonel ölçünün alınmasının ardından alçı modelin laboratuvar tarayıcısıyla sayısallaştırılması veya analog ölçüyle elde edilen verinin dijital tasarıma aktarılması söz konusudur. (Abduo ve Rasaie, 2025; Bernauer ve ark., 2023).

Tam, Kısmi Ve Hibrit Iş Akişlari

Tam dijital sistemler ile karma iş akışları karşıt seçenekler değildir. Vakanın anatomik zorlukları, mevcut cihazlar, ölçü gereksinimi ve laboratuvar altyapısı doğrultusunda birlikte değerlendirilebilir (Afrashtehfar ve ark., 2022; Saeed ve ark., 2023).

Bu ayrım yalnızca tanımsal değil, klinik sonuçlar açısından da anlamlıdır. Sabit restorasyonlar üzerinde yapılan bir meta-analizde, ağız içi tarama ile üretilen protezlerin marjinal aralık değerlerinin, ölçü ve alçı model tarama yöntemlerine göre daha düşük olduğu bildirilmiştir. Benzer şekilde, doğrudan (ağız içi) sayısallaştırma sonrasında elde edilen sabit protezlerin

marjinal uyumunun dolaylı sayısallaştırmaya kıyasla daha iyi olduğu raporlanmıştır. Bu bulgular, ara basamakların azalmasının bilgi kaybını sınırlayabileceğine işaret etmektedir; ancak söz konusu çalışmaların farklı tarayıcı modelleri, ölçü materyalleri, preparasyon tasarımları ve değerlendirme yöntemleri içermesi, doğrudan karşılaştırmaları sınırlandırmaktadır. (Saeed ve ark., 2023).

Dijitalleşmenin protetik tedavi süreçlerine katkıları birkaç başlıkta toplanabilir. İlk olarak, veri kalıcılığı ve yeniden erişilebilirlik artmaktadır: sanal modeller saklanabilmekte, gerektiğinde yeniden değerlendirilebilmekte ve farklı üretim birimlerine aktarılabilmektedir. İkinci olarak, ölçü sürecinde ölçü maddesinin distorsiyonundan kaynaklanan hatalar azalabilmekte, üretim süreçleri basitleşebilmekte ve maliyetler düşebilmektedir. Üçüncü olarak, hasta deneyimi iyileşmektedir: çapraz tasarımlı bir klinik çalışmada, tek diş implant restorasyonlarında dijital ölçü ile konvansiyonel ölçü karşılaştırıldığında, hastaların konvansiyonel ölçüde daha fazla rahatsızlık bildirdiği görülmüştür. (Hanozin ve ark., 2022; Abdulkarim ve ark., 2024).

Bu katkılara karşın, dijitalleşmenin klinik sonuçlara yansıması her zaman aynı yönde değildir. Tam protezlerde yapılan bir sistematik derleme ve meta-analizde, frezelenmiş ve 3B baskı ile üretilmiş protezlerin konvansiyonel protezlere kıyasla retansiyon, randevu sayısında azalma, hasta konforu ve öngörülebilir bakım açısından daha iyi sonuç verdiği; ancak hasta algısı ve memnuniyetinin dijital ve konvansiyonel protezler arasında farklılık göstermediği bildirilmiştir. Başka bir derlemede dijital protezlerin maliyet-etkinlik ve üretim süresi açısından üstün olduğu, fakat memnuniyet ve protez kalitesinin tutarlı biçimde iyileşmediği vurgulanmıştır. Bu sonuçlar, dijitalleşmenin süreç verimliliği ile hasta bildirimli sonuçlar arasındaki ilişkinin doğrusal olmadığını göstermektedir. (El Osta ve ark., 2025; Joda ve ark., 2024).

Klinik-Laboratuvar Iş Birliği

Klinisyen ve teknikerin ortak veri üstünden ilerlemesi, preparasyon sınırı, oklüzal boşluk, materyal seçimi ve estetik beklentilerin yazılı ve görsel olarak netleştirilmesini kolaylaştırır (Ismail ve ark., 2023).

Geleneksel iş akışında klinik ile laboratuvar arasındaki iletişim fiziksel ölçü, alçı model ve yazılı reçete üzerinden kurulurdu. Bu yapıda bilgi aktarımı, ölçünün taşınması sırasında oluşabilecek deformasyon, model üretim hatası ve sözlü/yazılı talimatların yorumlanmasına bağlı belirsizlikler içeriyordu. Dijital iş akışında bu aktarım, sanal model dosyalarının ve tasarım parametrelerinin paylaşımına dönüşmüştür. Açık sistem kullanan tarayıcılarda elde edilen veriler belirli bir iş akışına bağlı kalmaksızın, açık arayüz üzerinden serbest çalışan diş protez teknikerlerine veya frezeleme merkezlerine gönderilebilmekte; veriler internet üzerinden portallara veya bulut sistemlerine yüklenip zincirin bir sonraki halkası tarafından indirilebilmektedir. Bu dönüşüm, diş hekimine üretim zincirinde çalışacağı partneri seçme serbestliği kazandırırken, birden fazla partnerle çalışılması durumunda süreç karmaşıklığını artırabilmektedir. (Ismail ve Al-Moghrabi, 2023; Abduo ve Rasaie, 2025).

Klinik Uygulamalarda Dijital Ölçü Ve Planlama

İntraoral Tarama Ve Ölçüm Doğruluğu

Tarama doğruluğu değerlendirilirken gerçek değere yakınlık ile tekrarlanabilirlik birbirine karıştırılmamalıdır. Laboratuvar koşullarında üretilen sonuçların hasta ağzına doğrudan genellenmesi de uygun değildir (Afrashtehfar ve ark., 2022; Schmalzl ve ark., 2023; Bernauer ve ark., 2023).

Ağız içi tarayıcılar, protetik tedavinin klinik ayağındaki dijital veri kaynağıdır. Tarayıcının ışık kaynağı dental arkların yüzeyine yansıtılmakta, görüntü sensörleri tarafından elde edilen görüntüler tarama yazılımında işlenerek nokta bulutuna dönüştürülmektedir. Taramanın daha yavaş yapılması, daha yüksek çözünürlük ve kontrast bilgisi elde edilmesini sağlamakta; cihaz, art arda topladığı iki boyutlu fotoğraf veya videolardan 3B modeli oluşturmaktadır. Bu teknik temel, tarayıcıların doğruluk performansının neden yüzey özelliklerine, tarama hızına ve açısına karşı duyarlı olduğunu açıklar. (Afrashtehfar ve ark., 2022).

Doğruluk kavramı, uluslararası standardizasyon çerçevesinde iki bileşene ayrılır: trueness (gerçek değere yakınlık) ve presizyon (tekrarlanan ölçümler arasındaki tutarlılık). Bu ayrım klinik yorum açısından kritiktir; zira bir sistem yüksek presizyona sahipken düşük trueness gösterebilir ve bu durum, tekrarlanabilir fakat sistematik olarak sapmış ölçümler üretebilir. (Afrashtehfar ve ark., 2022).

Dijital ölçü teknikleri literatürde temel olarak üç eksende tartışılmaktadır: tarama stratejisi, tarama kapsamı ve doku koşulları. Tarama stratejisinin, yani diş yüzeylerinin sayısallaştırılma sırasının ve operatör deneyiminin doğruluğu belirgin biçimde etkilediği bildirilmiştir. Doğruluğu etkileyen faktörler arasında tarama teknikleri (hız, açı), materyal özellikleri (şeffaflık, yansıtıcılık) ve klinik koşullar (ağız solunumundan kaynaklanan buğulanma, kan, tükürük, yumuşak doku varlığı) sayılmaktadır. Bu değişkenler, tarayıcılar arasında yapılan karşılaştırmaların neden her zaman tutarlı sonuç vermediğini kısmen açıklar. (Gehrke ve ark., 2024; Mohajerani ve ark., 2025).

İntraoral tarama doğruluğuna ilişkin kanıtlar, kapsama göre belirgin biçimde farklılaşmaktadır. Kısa ve orta mesafeli restorasyonlarda intraoral tarayıcıların doğruluğunun konvansiyonel ölçüleri aştığı belirtilirken, tam ark ölçümlerde sapmanın artabileceği vurgulanmaktadır. Aynı çalışmada konvansiyonel ölçülerin, özellikle ikinci molar bölgesi gibi belirli alanlarda trueness ve presizyon açısından üstün olduğu; ancak tarayıcı ile konvansiyonel yöntem arasındaki seçimin klinik bağlama ve istenen sonuca bağlı olduğu ifade edilmiştir. Bu ortalama değerin standart sapmasının ortalamadan büyük olması, örneklem içi varyasyonun ne denli yüksek olduğunu göstermesi bakımından dikkat çekicidir. (Schmalzl ve ark., 2023; Ma ve ark., 2023).

Tarayıcı neslinin doğruluk üzerindeki etkisi ayrıca incelenmiştir. Tam ark dijital ölçülerde nesil değişiminin etkisini değerlendiren bir çalışmada, kısa mesafeli restorasyonlarda intraoral tarayıcıların daha doğru ölçü sağladığı, doğruluğun tarama stratejisinden ve operatör deneyiminden büyük ölçüde etkilendiği bildirilmiştir. Bu bulgular, aynı üreticinin farklı nesil cihazları arasında bile doğruluk farkı olabileceğini ima etmekte; literatürdeki çelişkili sonuçların bir bölümünün cihaz nesli farklılığından kaynaklandığını düşündürmektedir. (Schmalzl ve ark., 2023; Gehrke ve ark., 2024).

Tam Ark Ve Implant Üstü Uygulamaların Sınırları

Scanbody sistemleri, implant üstü restorasyonlarda implantın üç boyutlu pozisyonunun dijital olarak aktarılmasını sağlayan arayüz elemanlarıdır. Literatür, scanbody geometrisinin dijital ölçünün doğruluğu üzerinde belirleyici olduğunu göstermektedir. Scanbody karakteristiklerinin tarama doğruluğu üzerindeki etkisini değerlendiren bir sistematik derlemede; scanbody tasarımı, scanbody materyali, implant tipi ve implant açılanması gibi parametrelerin doğruluk sonuçlarını etkilediği, konvansiyonel implant ölçü tekniğinin performans verileriyle yalnızca dolaylı karşılaştırma yapılabildiği belirtilmiştir. (Gehrke ve ark., 2024; Mohajerani ve ark., 2025).

Dijital iş akışlarının en belirgin sınırlılığı, tarama kapsamı büyüdükçe doğruluğun azalmasıdır. Kısa mesafeli restorasyonlarda intraoral tarayıcıların doğruluğunun konvansiyonel ölçüleri

aşabildiği, ancak tam ark ölçümlerde sapmanın artabileceği; uzun mesafelerde tarayıcıların tanı ve tarama açısından güvenilir olmakla birlikte tüm ark taramasında daha yüksek sapma gösterebileceği bildirilmektedir. Tam ark implant ölçülerinde doğrusal doğruluğun sistemler arasında tutarlı biçimde sıralanamaması ve açısal distorsiyonlar için hiçbir sonsuz sıralamanın kurulamaması, tam ark dijital ölçünün öngörülebilirliğinin sınırlı olduğunu göstermektedir. (Ma ve ark., 2023; Mohajerani ve ark., 2025).

İmplant taramalarındaki sınırlılıklar çok faktörlüdür. Scanbody geometrisindeki makro ve mikro varyasyonların hem doğrusal hem açısal trueness değerlerini etkilediği ve ideal tasarım parametrelerinin henüz tanımlanmadığı belirtilmektedir. İmplant açılanması, scanbody materyali ve implant tipi de doğruluk sonuçlarını etkileyen parametreler arasında sayılmaktadır. Klinik çalışmaların azlığı, farklı faktörlerin (tarama yolu veya scanbody) etkisinin belirlenmesini güçleştirmekte; bununla birlikte güncel intraoral tarayıcıların klinik olarak kabul edilebilir doğruluk gösterdiği, fakat transfer hatasının hâlen dikkate alınması gerektiği vurgulanmaktadır. Transfer hatası kavramı, dijital iş akışında da restorasyonun pasif uyumunu tehdit eden bir unsur olarak varlığını korumaktadır. (Gehrke ve ark., 2024; Mohajerani ve ark., 2025).

Doğruluğu etkileyen operatör ve çevre kaynaklı faktörler de göz ardı edilmemelidir. Tarama stratejisinin ve operatör deneyiminin doğruluğu belirgin biçimde etkilediği; tarama hızı ve açısı, materyallerin şeffaflık ve yansıtıcılık özellikleri ile ağız solunumundan kaynaklanan buğulanma, kan, tükürük ve yumuşak doku varlığı gibi klinik koşulların doğruluğu etkilediği bildirilmektedir. Bu değişkenler, tarayıcı performansının cihaz özelliklerinden bağımsız biçimde klinik koşullara bağlı olduğunu göstermektedir. (Gehrke ve ark., 2024).

Sanal Hasta Ve Klinik Karar

Dijital kayıtlar; ark yüzeyleri, çene ilişkileri, yüz fotoğrafları ve uygun olgularda radyolojik verilerle ilişkilendirilerek planlama yapılmasına olanak verir. Bununla birlikte sanal simülasyonlar klinik muayene ve fonksiyonel doğrulamanın yerine geçmez (Campobasso ve ark., 2022; Boukhris ve ark., 2024). Klinik karar desteği açısından dijital simülasyonların klinik araştırmalardaki kullanımına ilişkin kapsam derlemesi, sanal planlamanın özellikle sabit protetik tedavilerde iletişim ve tedavi öncesi değerlendirme amacıyla ele alındığını; ancak klinik kanıtın hâlen sınırlı olduğunu bildirmektedir (Joda ve ark., 2024).

Sanal hasta kavramı, dental ark verisi, yüz taraması, radyolojik görüntüleme ve çene hareketi kayıtlarının tek bir dijital ortamda birleştirilmesiyle oluşturulur. Bu bütünleşme, tedavi planlamasının hem estetik hem fonksiyonel boyutlarının önceden değerlendirilmesine olanak tanır. Tam dijital klinik iş akışı, bu verilerin CAD yazılımına aktarılması ve doğrudan üretim zincirine bağlanmasıyla tamamlanır. Bu ifade, tam dijital iş akışının yaygınlaşmasının önündeki en önemli bilgi boşluğunun uzun dönemli klinik kanıt ve ekonomik değerlendirme olduğunu ortaya koymaktadır. (Boukhris ve ark., 2024; Campobasso ve ark., 2022; Joda ve ark., 2024).

Dental Laboratuvarda Tasarim, Veri Ve Üretim

Dosya Biçimleri Ve Veri Aktarımı

STL ağırlıklı olarak yüzey geometrisini taşırken renk ve doku bilgisini saklamada diğer biçimler tercih edilebilir. DICOM ise farklı bir görüntüleme veri yapısıdır. Dosyanın açılması, tüm klinik bilgilerin eksiksiz aktarıldığını tek başına kanıtlamaz (Dalkiz ve ark., 2024).

Dental laboratuvarın dijital iş akışındaki temel girdisi, klinikten aktarılan veri dosyalarıdır. Bu dosyaların biçimi, laboratuvarın kullanabileceği tasarım ve üretim araçlarını doğrudan belirler.

Ağız içi tarayıcılar, kaydedilen bölgenin sayısal kopyasını renksiz .stl, .obj ve renkli .ply formatlarında veya geliştirici firmanın özel olarak tanımladığı format dilinde sağlar. Taranan modeller .stl ve .ply formatlarında herhangi bir CAD sisteminde tasarlanabilmekte; bu formatlar istenilen herhangi bir dental laboratuvar veya teknikerle paylaşılabilmektedir. Buna karşın DICOM, tıbbi görüntüleme verisi için kullanılan ve dental CAD ortamına ayrıca dönüştürülmesi gereken ayrı bir formattır. Taranan 3B veri; x, y, z düzlemlerini birleştiren çokgen bir yapı oluşturur ve çokgen yapısının miktarı arttıkça o yapının kalitesi artar; ancak yüksek çokgen yapısı hem tarama süresini uzatır hem de daha yüksek işlem gücüne sahip bilgisayar kullanımını gerektirir. (Bueno ve ark., 2022).

Açık ve kapalı sistem ayrımı, bu iletişimin temel belirleyicisidir. .stl ve .ply formatlarından birini kullanan sistemler "açık sistem", bu formatları kullanmayıp kendi dosya formatına sahip olan sistemler ise "kapalı sistem" olarak tanımlanmaktadır. Kapalı bir sistemde üretici, restoratif sürecin CAD ve CAM bileşenlerini sıkı biçimde sınırlandırır: sistemin tarayıcısıyla alınan optik ölçü veya tescilli CAD yazılımında yapılan tasarım, yalnızca aynı üreticinin CAM bileşenine aktarılabilir. Açık CAD yazılımı ise dijital taramaların ve tasarımların diğer üreticilere ait tarayıcılardan, frezeleme merkezlerinden veya 3B baskı sistemlerinden serbestçe dışa ve içe aktarılmasına izin verir; bu serbest değişim, diş hekimine tarayıcı, CAD yazılımı ve frezeleme makinesini tek bir üreticinin sistemine bağlı kalmaksızın bir arada kullanma esnekliği sağlar. Açık sistemlerin pratikteki avantajları arasında, klinisyenin üretim zincirinde çalışacağı partneri serbestçe seçebilmesi ve bulut tabanlı dosya paylaşımıyla klinik-laboratuvar arasındaki iletişimin iyileştirilebilmesi sayılmaktadır. (Bueno ve ark., 2022; Abduo ve Rasaie, 2025).

Bulut tabanlı aktarımın veri güvenilirliği üzerindeki etkisi de incelenmiştir. Ağız içi taramadan elde edilen .stl dosyalarının sıkıştırma, açma ve çevrimiçi iletim süreçlerinin boyutsal değişim üzerindeki etkisini değerlendiren bir çalışmada, WeTransfer, Dropbox, Google Drive ve OneDrive platformları üzerinden gönderilen dosyaların orijinal dosyalarıyla üst üste getirilmesiyle boyutsal sapma karşılaştırılmış ve altı grup arasında boyutsal değişim açısından fark bulunmamıştır. Çalışma, .stl formatındaki dosyaların 3B modelde boyutsal distorsiyona yol açmaksızın sıkıştırılabileceği, açılabileceği ve çevrimiçi olarak aktarılabileceği sonucuna varmıştır. Bu bulgu, bulut tabanlı veri aktarımının veri bütünlüğü açısından teknik olarak güvenilir olduğunu göstermekte; ancak hasta bilgilerinin korunmasına ilişkin hukuki ve etik boyutları kapsamamaktadır. (Bueno ve ark., 2022).

CAD Tasarımı Ve Teknikerin Denetimi

Dijital tasarımın kritik noktaları marjin belirleme, giriş yolu, kontak alanları, oklüzal anatomi ve üretim kısıtlarının birlikte ele alınmasıdır. Otomatik öneriler hız kazandırsa da tasarımın biyolojik ve fonksiyonel uygunluğu mesleki denetim gerektirir (Kong ve Kim, 2024; Kong ve Kim, 2025; Takaichi ve ark., 2021).

CAD yazılımları, dental laboratuvarın dijital iş akışındaki merkezi araçtır. Kron, köprü, inley, onley ve veneer tasarımı bu ortamda gerçekleştirilir; implant üstü restorasyonlar için scanbody verisi üzerinden implant pozisyonu tanımlanır ve abutment ile restorasyon tasarımı yapılır. Total ve parsiyel protezlerin dijital tasarımı ise daha karmaşıktır; zira protez tasarımı daha fazla faktör ve değişkenin eşzamanlı değerlendirilmesini gerektirir. Yapay zekânın diş hekimliğindeki uygulamalarını değerlendiren bir derlemede, hareketli protezlerin tasarımı için herhangi bir makine öğrenmesi algoritmasının mevcut olmadığı; mevcut makine öğrenmesi algoritmalarının hareketli protez tasarım sürecine yardımcı olmaya odaklandığı (örneğin dental arkların sınıflandırılması ve dişsiz hastalarda yüz görünümü tahmini) belirtilmektedir. Bu durum, protetik diş tedavisinde otomasyonun sabit restorasyonlarda görece ilerlediğini, hareketli protezlerde ise henüz başlangıç aşamasında olduğunu göstermektedir. (Kong ve Kim, 2025).

Tasarım aşamasında teknikerin rolü belirleyicidir. Yapay zekâ destekli CAD sistemlerinin kron tasarım süresini anlamlı biçimde azalttığı ve diş protez teknikerinin deneyimi ve becerisinden bağımsız olarak tek tip kron üretimini mümkün kıldığı bildirilmektedir. Morfolojik doğruluk en sık bildirilen sonuç ölçütü olmuş, bunu tasarım süresi ve oklüzal temas değerlendirmesi izlemiştir. Yapay zekâ ile üretilen kronların çoğu klinik olarak kabul edilebilir hassasiyet göstermekle birlikte, yalnızca dört çalışma fiziksel kron üretmiş ve hiçbir çalışma in vivo doğrulama yapmamıştır. Başka bir kapsam derlemesi de yapay zekâ uygulamalarının çoğunun küçük hasta sayılarıyla yürütüldüğünü ve algoritmaların her zaman raporlanmadığını; raporlama ve değerlendirme için standart protokollere ihtiyaç olduğunu belirtmektedir. Otomatik kron üretimine yönelik bütünleşik bir yapay zekâ çerçevesinin 71 test vakasında kron üretimini 2–4 dakika arasında gerçekleştirdiği bildirilmiştir. (Kong ve Kim, 2025).

Eksiltmeli Üretim

Frezeleme yöntemi, önceden üretilmiş endüstriyel blokları işlemesi nedeniyle belirli materyallerde avantaj sağlayabilir. Buna karşılık malzeme kaybı, alet aşınması ve erişilebilir geometri gibi sınırlılıkları vardır (Grande ve ark., 2022; Lüchtenborg ve ark., 2022; Mou ve ark., 2025).

Eksiltmeli üretim, önceden hazırlanmış blok veya disklerden bilgisayar kontrollü frezeleme ile restorasyonun şekillendirilmesine dayanır. Frezeleme, restorasyon türüne ve materyale göre kuru veya ıslak koşullarda yapılır; materyalin işlenebilirliği, ısı üretimi ve boyutsal stabilitesi bu seçimi belirler. Tam protez kaideleri için eksiltmeli işlem, önceden polimerize edilmiş PMMA bloğundan frezeleme esasına dayanır. Eksiltmeli üretimin avantajları arasında yüksek yüzey kalitesi ve materyal homojenliği bulunurken; büyük üretim makineleri gerektirmesi, düşük üretim verimliliği, yüksek maliyet, sınırlı blok boyutu ve belirgin materyal kaybı öne çıkan dezavantajlardır. (Grande ve ark., 2022).

Sık kullanılan eksiltmeli üretim materyalleri arasında zirkonya, lityum disilikat, feldspatik seramikler, hibrit seramikler ile PMMA ve kompozit bloklar sayılabilir. Zirkonya ve lityum disilikat restorasyonların uyum performansı, literatürde sıklıkla karşılaştırılmıştır. Dijital ölçü kullanılarak üretilen lityum disilikat ve zirkonya tam seramik CAD/CAM kronların marjinal ve internal uyumunu değerlendiren bir sistematik derlemede, klinik olarak kabul edilebilir marjinal ve internal uyum elde edilebildiği; lityum disilikat ve zirkonya seramiklerin benzer marjinal aralık değerleri sağladığı, ancak lityum disilikat materyalinin zirkonyaya kıyasla daha iyi internal uyum sunduğu bulunmuştur. (Mou ve ark., 2025).

Eklemeli Üretim Ve Uygulamaya Göre Seçim

Katmanlı üretimde baskı yönü, katman kalınlığı, destek tasarımı, temizleme ve son polimerizasyon, nihai restorasyonun özelliklerini etkiler. Üretim teknolojileri ancak aynı materyal ve endikasyon altında anlamlı biçimde karşılaştırılabilir (Ataei ve ark., 2024).

Eklemeli üretim, restorasyonun katman katman oluşturulduğu bir üretim yaklaşımıdır. Dental uygulamalarda stereolitografi, dijital ışık işleme ve LCD/MSLA sistemleri ile selektif lazer eritme öne çıkmaktadır. Bu teknolojiler dental model üretimi, geçici ve daimi restorasyonlar, total protez kaideleri ve parsiyel protez iskeletleri gibi geniş bir uygulama alanına yayılmıştır. (Grande ve ark., 2022).

Üretim doğruluğu açısından teknolojiler arasında belirgin farklar bildirilmektedir. Dört üniteli zirkonya sabit protezlerin stereolitografi, dijital ışık işleme ve materyal jetting ile üretilerek eksiltmeli üretimle karşılaştırıldığı bir çalışmada, iki eksiltmeli işlemin en düşük sapmayı

gösterdiği, bunu materyal jetting ve SLA işlemlerinin izlediği; DLP grubundaki numunelerin diğer grupların neredeyse iki katı sapma gösterdiği bulunmuştur. Yazarlar, doğruluk açısından sabit protezler için güncel eksiltmeli üretim işlemlerinin eklemeli üretime kıyasla hâlen üstün kabul edilebileceği sonucuna varmıştır. Bu veriler, aynı eklemeli üretim kategorisi içinde bile teknoloji seçiminin doğruluğu belirgin biçimde etkilediğini göstermektedir. (Mou ve ark., 2025).

Eklemeli ve eksiltmeli üretimin karşılaştırıldığı kanıtlar, genelleyici yargıların geçersizliğini ortaya koymaktadır. Kobalt-krom alaşımdan döküm, SLM ve CNC frezeleme yöntemleriyle üretilen 90 dental yapının karşılaştırıldığı bir çalışmada, çıkarma ve eklemeli teknoloji arasında istatistiksel olarak anlamlı fark doğrulanmış; kullanılan üretim teknolojileri, materyaller ve ekipman temelinde 3B baskı ile üretilen yapıların frezeleme veya döküm teknolojisiyle üretilenlerden daha doğru olduğu sonucuna varılmıştır. Bu bulgu, tam protez kaideleri üzerinde 3B baskının frezelenmiş kaidelere kıyasla anlamlı biçimde daha yüksek doğruluk gösterdiğini bildiren çalışmayla uyumludur. Materyal jetting'in eksiltmeli üretimle karşılaştırılabilir trueness sağladığı ve her iki yaklaşımın da klinik doğruluk gereksinimlerini karşıladığı belirtilmiştir. Bu tablo, "hangi yöntem daha doğru" sorusunun yalnızca restorasyon tipi, materyal ve teknoloji kombinasyonu bağlamında anlam kazandığını göstermektedir. (Grande ve ark., 2022; Mou ve ark., 2025).

Parsiyel protez iskeletlerinin oturma doğruluğunun farklı dijital iş akışlarıyla karşılaştırıldığı bir çalışmada, SLM iskeletlerin konvansiyonel iskeletlere kıyasla umut verici oturma doğruluğu gösterdiği ve ölçü tipinin (konvansiyonel veya dijital) SLM iskeletlerin doğruluğunu etkilemediği bildirilmiştir; gözlenen farkların klinik öneminin muhtemelen minimal olduğu ifade edilmiştir. Bu sonuç, doğruluk farklarının istatistiksel anlamlılığı ile klinik anlamlılığı arasındaki ayrımın dikkate alınması gerektiğini göstermektedir. (Grande ve ark., 2022).

Rezin, Seramik Ve Protez Kaide Materyalleri

Özellikle daimi restorasyon endikasyonunda, bir materyalin üretici tarafından tanımlanan kullanımı ile uzun dönemli klinik başarısının kanıtlanması farklı konulardır. Laboratuvar mekanik testleri yararlıdır; ancak aşınma, yaşlandırma ve klinik hizmet süresi bakımından tek başına yeterli değildir (Mandurino ve ark., 2025; Pot ve ark., 2024). Bu nedenle materyal seçimi, yalnızca laboratuvar test sonuçlarına değil, kullanım endikasyonuna ve klinik kanıtın kapsamına göre yapılmalıdır (Mandurino ve ark., 2025; Pot ve ark., 2024).

Eklemeli üretimle elde edilen daimi restorasyon materyallerinin mekanik özellikleri, literatürün en tartışmalı alanlarından biridir. Daimi restorasyonlar için tasarlanmış 3B baskı rezinlerinin mekanik özelliklerinin, eksiltmeli üretimle üretilen muadillerinden hâlen daha düşük olduğu; uzun vadede kaçınılmaz olarak ortaya çıkan degradasyon süreçlerinin başarısızlık olasılığını anlamlı biçimde artırabileceği bildirilmiştir. Tek diş kronlar için 3B baskı rezinlerin değerlendirildiği bir kapsam derlemesinde, bu materyallerin umut verici in vitro mekanik performans gösterdiği ve tipik çiğneme kuvvetlerine dayanabilen kırılma direnci değerlerine ulaşabildiği, bağlanma dayanımının genel olarak uygun ve internal ile marjinal adaptasyonun kabul edilebilir olduğu; ancak bu materyallerin frezelenmiş rezin muadillerine kıyasla daha düşük eğilme dayanımı, elastisite modülü ve sertlik sergileme eğiliminde olduğu belirtilmiştir. (Pot ve ark., 2024).

Bulgular, 3B baskı kompozitlerin yetersiz mekanik özellikleri nedeniyle indirekt restorasyonlar için henüz ilk seçenek olmadığını; sınırlı kanıt nedeniyle klinik çalışmalara ve uzun dönemli in vivo araştırmalara ihtiyaç duyulduğunu göstermektedir. Bu değerlendirme, üretici endikasyonları ile kanıt düzeyi arasında bir boşluk olduğunu ortaya koymaktadır. Posterior bölgede 3B baskı rezin-matris seramik kronların tam dijital iş akışıyla üretildiği iki yıllık prospektif klinik

çalışmada, biyomekanik açıdan 3B baskı rezin esaslı materyallerin elastik davranışının dentine daha yakın olması nedeniyle posterior rehabilitasyonlar için uygun olabileceği; son in vitro çalışmaların 3B baskı rezin-matris seramik ve rezin esaslı kronların eksiltmeli üretilen muadilleriyle karşılaştırılabilir mekanik performans ve marjinal doğruluk elde edebildiğini bildirdiği belirtilmiştir. (Pot ve ark., 2024).

Total protez kaide materyallerinde de benzer farklar bildirilmektedir. Bununla birlikte eğilme uzaması ve gerilme-uzama diyagramları, 3B baskı PMMA'nın ısı ile polimerize edilmiş veya frezelenmiş PMMA'ya kıyasla daha geniş plastik deformasyon gösterdiğini ortaya koymuştur. PMMA esaslı yeni bir 3B baskı akrilik protez kaide materyalinin fizikokimyasal ve mekanik değerlendirmesinde, baskı yönünün (katman oryantasyonu) dental restoratif materyallerin mekanik özelliklerini etkilediği; eklemeli üretim teknolojisindeki katmanların doğasının çatlak yayılımını başlatabileceği ve basılmış materyallerin yapısal başarısızlığına yol açabileceği vurgulanmaktadır. Bu bulgu, 3B baskı iş akışında teknikerin üretim yönelimi gibi parametreleri bilinçli olarak yönetmesi gerektiğini göstermektedir. (Grande ve ark., 2022; Pot ve ark., 2024).

Teknikerlik mesleğinde yetkinlik dönüşümü

Dijital laboratuvarlarda mesleki sorumluluk yalnızca cihaz kullanımıyla sınırlı değildir. Teknikerin anatomi, materyal bilimi ve oklüzyon bilgisi, yazılım parametrelerinin doğru yorumlanmasının temelini oluşturur (Lee, 2025).

Dijitalleşme, diş protez teknikerinin rolünü hem içerik hem yetkinlik düzeyinde dönüştürmektedir. Dijital laboratuvarda teknikerin temel görevi, tasarım yazılımı üzerinden restorasyonun sanal olarak kurgulanması, üretim parametrelerinin (materyal, işleme stratejisi, destek yapıları, bitirme) belirlenmesi ve klinikten gelen verinin teknik geçerliliğinin denetlenmesidir. Geleneksel laboratuvarda büyük ölçüde el becerisine dayanan mum modelaj ve bitirme işlemleri büyük oranda yazılım tabanlı işlemlerle yer değiştirirken, eklemeli üretimde destek yapılarının uzaklaştırılması ve bitirme gibi basamakların hâlen tekniker bağımlı olduğu bildirilmektedir. Bu durum, teknikerin el becerisi ile dijital yetkinlik arasında bir köprü rolü üstlendiğini göstermektedir. (Ohyama ve ark., 2025).

Mesleki rolün dönüşümü, estetik rehabilitasyon bağlamında da ele alınmaktadır. Diş protez teknikerinin klinik ve laboratuvar kararlarından oluşan zincirde merkezi bir konumda yer aldığı, diş hekiminin önerdiği tedavi planını fonksiyonel, dirençli ve estetik açıdan bütünleşmiş bir restorasyona dönüştürmekle sorumlu olduğu; laboratuvar-dental ofis iş birliği, sonuç öngörülebilirliğini destekleyen iletişim araçları ve dijital teknolojilerin laboratuvar rutini üzerindeki etkisinin bu bağlamda değerlendirilmesi gerektiği belirtilmektedir. Bu ifade, dijitalleşmenin teknikeri sürecin dışına itmediğini, aksine klinik karar ile üretim sonucu arasındaki bağlantının yönetimini teknikerin sorumluluğuna daha belirgin biçimde yerleştirdiğini göstermektedir. (Ohyama ve ark., 2025).

Sınırlılıklar Ve Uygulama Ilkeleri

Bulut üzerinden aktarılan verinin geometrik bütünlüğünün korunması, kişisel sağlık verilerinin gizliliği ve erişim güvenliğiyle aynı şey değildir. Veri minimizasyonu, yetkilendirme, saklama süresi ve izlenebilirlik kurum politikalarıyla yönetilmelidir; bu öneri, veri aktarımının boyutsal bütünlüğünü inceleyen araştırmanın kapsamı dışındadır (Bueno ve ark., 2022).

Dijital iş akışının ikinci temel sınırlılığı, sistemler arası uyumluluk ve veri sürekliliğidir. Kapalı sistemlerde ölçü veya tasarımın yalnızca aynı üreticinin CAM bileşenine aktarılabilmesi, laboratuvarın üretim seçeneklerini daraltmakta; açık sistemler ise serbest veri değişimi

sağlayarak bu kısıtı azaltmaktadır. Açık kaynaklı yazılımların maliyeti düşürdüğü ve ofis içi üretimle bütünleşebildiği veya klinik ile laboratuvar arasındaki iletişimi, aynı yazılım platformundaki bulut tabanlı dosyalar üzerinden çok sayıda projenin paylaşılabilmesi yoluyla iyileştirebildiği belirtilmektedir. Bununla birlikte açık sistemlerin de sınırlılıkları vardır; örneğin bazı açık yazılımlarda intraoral taramanın lateral sefalometrik radyografi ile kaydedilmesine izin verilmemesi, yazılımın yalnızca CBCT alımının gerekli olduğu vakalarla sınırlı kullanılabilirliğine yol açabilmekte; ayrıca minivida gibi bileşenlerin yerel dijital dosyasının kütüphanede bulunmaması tam dijital CAD-CAM iş akışının planlanmasını engelleyebilmektedir. (Abduo ve Rasaie, 2025; Dalkiz ve ark., 2024).

Veri kaybı ve dosya formatı uyumsuzluğu riskleri, aktarım zincirinin her halkasında ortaya çıkabilir. Veri iletişiminin her zaman bir arayüz üzerinden gerçekleşmesi ve verilerin internet üzerinden portallara veya bulut sistemlerine yüklenip indirilmesi, birden fazla partnerle çalışıldığında süreç komplikasyonlarına yol açabilmektedir. Buna karşın .stl dosyalarının sıkıştırma, açma ve çevrimiçi iletim süreçlerinin boyutsal değişime yol açmadığı gösterilmiştir; bu bulgu, veri kaybı riskinin teknik aktarım mekanizmasından çok format dönüşümleri, yazılım sürümleri ve sistem sınırlandırmalarından kaynaklandığını düşündürmektedir. Çokgen yoğunluğunun yüksek olmasının tarama süresini ve işlem gücü gereksinimini artırması, veri kalitesi ile iş akışı verimliliği arasında bir denge kurulmasını gerektirmektedir. Ayrıca DICOM gibi tıbbi görüntüleme formatları ile dental CAD ortamlarında kullanılan yüzey formatlarının ayrı yapılar olması, radyolojik verinin CAD iş akışına entegrasyonunda ek dönüşüm gerektirmektedir. (Bueno ve ark., 2022; Dalkiz ve ark., 2024; Bernauer ve ark., 2023).

Dijital iş akışlarının yaygınlaşması, hasta verilerinin korunmasına ilişkin yeni sorumluluklar doğurmaktadır. Bulut tabanlı platformlar üzerinden veri aktarımı, veri bütünlüğü açısından teknik olarak güvenilir bulunmakla birlikte, hasta bilgilerinin gizliliği ve mahremiyetine ilişkin kaygılar dijital teknolojilerin uygulanmasındaki zorluklar arasında sayılmaktadır. Dental eğitim kurumlarının dijital teknolojiyi uygularken standartlaştırma, kalibrasyon, hasta kabulü ve gizlilik kaygıları ile düzenleyici ve akreditasyon uyumu konularına titiz bir dikkat göstermesi gerektiği belirtilmektedir. Elektronik sağlık kayıtları ve dijital bilgi sistemlerinin dental pratiğe entegrasyonu, hizmet kalitesini ve hasta deneyimini iyileştirirken, aynı zamanda veri yönetimi ve mahremiyet sorumluluklarını da beraberinde getirmektedir (Alotaibi ve Mohd Kassim, 2023; Ohyama ve ark., 2025; Abduo ve Rasaie, 2025).

Standardizasyon sorunları iki düzeyde ortaya çıkmaktadır. Teknik düzeyde, dosya formatları (renksiz .stl, renkli .ply, .obj, DICOM) ve sistem mimarileri (açık/kapalı) arasındaki farklılıklar veri değişimini zorlaştırmaktadır. Bilimsel düzeyde ise doğruluk değerlendirmelerinde kullanılan yöntemlerin heterojenliği, çalışmalar arası karşılaştırmayı güçleştirmektedir. Sabit protezlerde dijital ve konvansiyonel yöntemlerin karşılaştırıldığı bir sistematik derlemede, çalışmalar arası heterojenliğin nedenleri arasında dahil edilen çalışma sayısının azlığı, seçilen çalışmaların çoğunda artmış yanlılık ve farklı tarayıcı modelleri, çalışma örneklem büyüklüğü, ölçü materyalleri, preparasyon tasarımı, ölçüm yöntemi, üretim makineleri ve teknikleri, frezeleme sistemi ve veri analiz testleri gibi deneysel farklılıklar sayılmaktadır. Aynı çalışmada internal uyum analizinde küçük etki büyüklüğü nedeniyle yayın yanlılığı gözlendiği belirtilmektedir (Saeed ve ark., 2023; Mahato ve ark., 2024).

Başlangıç yatırımı; bakım, sarf malzemesi, abonelik, yazılım güncellemeleri, eğitim ve yeniden üretim masraflarıyla birlikte ele alınmalıdır. Klinik verimlilik her kurumda aynı hızla ortaya çıkmayabilir (Alotaibi ve Mohd Kassim, 2023).

Dijitalleşmenin yaygınlaşmasının önündeki en belirgin engellerden biri ekonomik yüktür. Dijital teknolojilerin benimsenmesinde ilk uygulama maliyetleri, özelleşmiş eğitim gereksinimi ve

üretimin merkezîleşmesine bağlı olarak zaman verimliliğini etkileyebilecek bağımlılık önemli zorluklar olarak tanımlanmaktadır. Dental eğitim kurumlarının dijital teknolojileri uygulama sürecinde karşılaştığı zorluklar; eğitim, finansal, teknolojik, psikolojik, etik ve düzenleyici boyutları kapsamakta; dijital ekipmanın edinilmesi ve bakımıyla ilişkili finansal yükün titiz finansal planlama gerektirdiği belirtilmektedir. Aynı derlemede, öğretim üyeleri, personel ve öğrencilerden gelen değişime direncin etkili değişim yönetimi ve iletişim stratejileri gerektirdiği; standardizasyon, kalibrasyon, hasta kabulü, gizlilik kaygıları ile düzenleyici ve akreditasyon uyumunun titiz bir dikkat gerektirdiği ifade edilmektedir. Bu tablo, dijitalleşmenin teknik bir yatırım kararı olduğu kadar kurumsal bir dönüşüm süreci olduğunu göstermektedir (Alotaibi ve Mohd Kassim, 2023; Abdulkarim ve ark., 2024; Ohyama ve ark., 2025).

Dijital dental teknolojilerin benimsenmesini etkileyen faktörlere ilişkin bir literatür değerlendirmesinde, kullanılabilirlik ve pratik değerlendirmeler, iş verimliliği faktörleri, sosyoekonomik ve organizasyonel boyutlar, öğrenme eğrisi ile ilgili unsurlar ve sistem tasarımının benimseme üzerindeki en önemli faktörler olduğu belirtilmektedir. Öğrenme eğrisinin ayrı bir boyut olarak tanımlanması, dijital yetkinliğin cihaz edinimiyle otomatik olarak kazanılmadığını göstermektedir. Bu değerlendirmeyi destekleyen bir çalışmada, CAD yazılımı kullanımını adım adım destekleyen yapılandırılmış bir protokolün öğrencilerin dental restorasyon tasarımının ilkelerini kavramasına ve CAD/CAM ekipmanını verimli kullanmasına rehberlik ettiği; öğrenme sürecini optimize ettiği ve dijital diş hekimliğinde mükemmellik için gereken becerileri geliştirdiği belirtilmiştir. (Ohyama ve ark., 2025; Lee, 2025).

Tekniker eğitimi özelinde ayrı yapısal sorunlar tanımlanmaktadır. Diş laboratuvarı teknikerlerinin, lisans eğitimlerinin çoğunun diş hekimleri tarafından verildiğini ve bunun kendi rollerini ve teknik beceri gereksinimlerini anlamalarını zayıflattığını bildirdiği; çoğu teknikerin meslek içinden rol model ve mentor bulmakta güçlük çektiği, bunu akademideki tekniker sayısının sınırlı olmasına bağladığı belirtilmektedir. Laboratuvar teknolojisi programlarının genellikle farklı kolejlerde izole biçimde yürütüldüğü ve diğer diş programlarındaki muadilleriyle etkileşiminin bulunmadığı; bu nedenle iki programın eğitim gereksinimleri ve çıktılarının uyumlu görülmediği ifade edilmektedir. Teknikerler lisansüstü programların ve özelleşmiş kursların azlığını bildirmekte, öğrenmenin ana kaynağının materyal firmalarının düzenlediği atölye çalışmaları olduğunu belirtmektedir. (Ohyama ve ark., 2025; Lee, 2025).

Dijital veri paylaşımındaki hız, restorasyonun klinik hedeflerinin anlaşıldığı anlamına gelmez. Birlikte tanımlanmış dosya adlandırma kuralları, laboratuvar reçetesi, revizyon kayıtları ve kabul ölçütleri önemlidir (Ismail ve ark., 2023).

Klinik ile dental laboratuvar arasındaki iletişim, dijitalleşmeyle birlikte niceliksel olarak artmış ancak niteliksel olarak yeni sorunlar edinmiştir. Dijital sistemlerin sağladığı başlıca avantajlar arasında üç boyutlu görselleştirme yoluyla diş hekimi, diş protez teknikeri ve hasta arasında iletişimin iyileşmesi ve verimlilik artışı sayılmaktadır; dezavantajlar arasında ise özel yazılım, tarayıcı ve teknik bilgi-beceri gereksinimi ile bunların maliyet artışına yol açması bulunmaktadır. Bu ikili yapı, dijitalleşmenin iletişimi otomatik olarak iyileştirmediğini, aksine yeni bir teknik yetkinlik katmanı gerektirdiğini göstermektedir. (Ismail ve Al-Moghrabi, 2023; Abduo ve Rasaie, 2025).

İletişim sorunlarının bir kaynağı, verinin aktarımı ile verinin anlaşılması arasındaki ayrımdır. Açık sistemlerde diş hekiminin üretim zincirinde çalışacağı partneri serbestçe seçebilmesi bir avantaj olarak tanımlanırken, aynı iş akışında birden fazla partnerle çalışılmasının veri iletişiminin her zaman bir arayüz üzerinden gerçekleşmesi nedeniyle komplikasyonlara yol açabileceği belirtilmektedir. Bir diğer kaynak, tekniker ve klinisyen yetkinliklerinin karşılıklı algılanışıdır: klinisyenlerin deneyimli ve yetkin teknikerlerle çalışmaktan daha rahat olması ve

teknikerlerin el becerisi düzeyinin klinisyenlerin tekniker seçimini kısıtlaması, iletişimin teknik düzeyin ötesinde mesleki güven ilişkisine bağlı olduğunu göstermektedir. Her iki tarafın da güçlü bir iş birliği içinde eğitim ve bilgi paylaşımı gereksinimini vurgulaması, iletişim sorunlarının çözümünün ortak eğitim modellerinde aranması gerektiğine işaret etmektedir. (Ismail ve Al-Moghrabi, 2023; Abduo ve Rasaie, 2025).

Gelecek araştırmalarının yalnızca cihazların teknik doğruluğunu değil, hastaya ilişkin sonuçları, uzun süreli materyal performansını, yeniden işleme oranını ve toplam iş akışı maliyetini de değerlendirmesi gerekir (Schmidt ve ark., 2022).

Gelecekte tam dijital protetik iş akışlarının yaygınlaşması, sanal hasta modellerinin ve sanal artikülatörlerin klinik rutine girmesiyle ilişkilendirilmektedir. Sanal artikülatörlerin gelecekte dinamik simülasyonlarda dört boyutlu teknoloji ile güçlendirilmesi gerektiği belirtilmektedir. Dinamik çene hareketlerinin kaydedilmesine yönelik çalışmalar, çene hareketi analizörlerinin lateral ekskürsiyonlarda intraoral tarayıcı dinamik oklüzyon modülüne kıyasla daha yüksek presizyon göstermesini ve oklüzal düzenlemelerde ortalama değer artikülatöründen daha iyi performans sergilemesini, dinamik kayıt temelli sanal oklüzyonun gelecekteki yönelimi olarak göstermektedir. Hibrit dijital iş akışlarının protetik ve restoratif tedavilerin hassasiyetini artırabileceği, ancak klinik ortamlarda doğrulamanın hâlen gerekli olduğu vurgulanmaktadır. (Ohyama ve ark., 2025).

Otomatik tasarım sistemleri, geleceğin en hızlı gelişen alanlarından biridir. Yapay zekâ destekli CAD sistemlerinin tasarım süresini azalttığı ve tekniker deneyiminden bağımsız tek tip kron üretimini mümkün kıldığı gösterilmiştir; otomatik kron üretimine yönelik bir çerçevenin kron üretimini 2–4 dakikada tamamlayabildiği bildirilmiştir. Bununla birlikte mevcut kanıt düzeyi sınırlıdır: yalnızca dört çalışmanın fiziksel kron ürettiği ve hiçbir çalışmanın in vivo doğrulama yapmadığı; metodolojik heterojenliğin standart değerlendirme protokollerine ve ek in vivo çalışmalara duyulan gereksinimi öne çıkardığı belirtilmektedir. Ayrıca hareketli protez tasarımı için herhangi bir makine öğrenmesi algoritmasının mevcut olmadığı, mevcut algoritmaların tasarım sürecine yardımcı olmaya odaklandığı görülmektedir. Bu nedenle otomatik tasarımın kısa vadede sabit restorasyonlarda yoğunlaşması, hareketli protezlerde ise insan uzmanlığının merkezî konumunu sürdürmesi beklenebilir. (Kong ve Kim, 2025).

Yüksek hassasiyetli 3B baskı sistemleri ve yeni nesil dental materyaller alanında ilerleme, materyal özelliklerindeki sınırlılıkların aşılmasına bağlıdır. Daimi restorasyonlar için 3B baskı kompozitlerin yetersiz mekanik özellikler nedeniyle henüz ilk seçenek olmadığı ve klinik çalışmalar ile uzun dönemli in vivo araştırmalara ihtiyaç duyulduğu belirtilmektedir. Posterior 3B baskı rezin-matris seramik kronların daimi posterior restorasyon olarak kullanımını destekleyen uzun dönemli klinik kanıtların sınırlı olduğu, bu materyallerin uzun dönemli geçici veya yarı kalıcı restorasyon olarak önerilmesine yol açan sınırlılıklar bulunduğu ifade edilmektedir. Bu tablo, 3B baskı materyallerinin daimi restorasyon endikasyonu için yeni nesil materyal geliştirmenin ve klinik kanıtın öncelikli araştırma alanı olduğunu göstermektedir. (Pot ve ark., 2024).

Bulut tabanlı dental laboratuvarlar, açık sistemlerin sağladığı veri paylaşımı esnekliği ve bulut platformlarının veri bütünlüğünü koruyan aktarım kapasitesi üzerine kurulmaktadır. Bununla birlikte, dijital dönüşümün başarısının teknolojik yenilik ile kişiselleştirilmiş bakım arasında stratejik bir denge kurulmasına bağlı olduğu; üretimin merkezîleşmesinin zaman verimliliğini etkileyebildiği ve protetik laboratuvarların dental ofislere entegrasyonu ile hibrit modellerin bu sınırlılıkları azaltabileceği belirtilmektedir. Bu değerlendirme, gelecekteki klinik-laboratuvar entegrasyonunun yalnızca teknik değil, organizasyonel bir tasarım sorunu olduğunu ortaya koymaktadır. (Alotaibi ve Mohd Kassim, 2023; Abduo ve Rasaie, 2025).

Dijital iş akışlarının klinik avantajları restorasyonun türüne ve kapsamına bağlıdır. Sınırlı sayıda dişi kapsayan sabit restorasyonlarda dijital ölçü uygulamaları hasta deneyimi ve işlem verimliliği bakımından güçlü bir seçenek sunabilse de tam ark vakaları, implant sayısı ve dağılımı, yumuşak doku koşulları ve sistem altyapısı açısından ayrıca değerlendirilmelidir (Afrashtehfar ve ark., 2022; Hanozin ve ark., 2022). Üretim doğruluğu tartışmalarında gerçek değere yakınlık, tekrarlanabilirlik ve restorasyonun klinik uyumu birbirinden ayrılmalıdır. Özellikle zirkonya sabit restorasyonlarında eklemeli ve eksiltmeli yöntemler arasında raporlanan farklılıklar, materyal ve cihaz özgül koşullardan etkilenmektedir (Mou ve ark., 2025).

İn vitro sonuçlar, baskı parametresi ya da materyal seçimi için kontrollü karşılaştırmalar sağlar. Buna karşılık protezin uzun dönemde ağız ortamında göstereceği davranış; hasta alışkanlıkları, yükleme koşulları, bakım ve klinik uygulama gibi ek değişkenlere bağlıdır. Bu nedenle materyaller hakkında kesin üstünlük sıralamaları oluşturmak yerine endikasyona özgü sınırlılıkların açıklanması daha tutarlı bir bilimsel yaklaşımdır (Grande ve ark., 2022; Pot ve ark., 2024).

Dijital iş akışında klinisyen tarafından belirlenen restoratif hedeflerin laboratuvara eksiksiz iletilmesi ve laboratuvarda yapılan tasarımın bu hedeflerle tutarlı olması gerekir. Modelin dijital ortamda saklanabilmesi süreç izlenebilirliğini destekler; ancak dosya güvenliği ve hasta verisinin korunması ayrı bir yönetişim sorumluluğu olarak devam eder (Bueno ve ark., 2022; Abduo ve Rasaie, 2025). Eğitim programlarının klasik morfoloji ve oklüzyon bilgisini sayısal tasarım, veri işleme ve cihaz yönetimiyle birlikte öğretmesi önemlidir (Ohyama ve ark., 2025; Kong ve Kim, 2025).

Sonuç:

Protetik diş tedavisinde dijital iş akışları, klinik değerlendirme ile dental laboratuvar üretimini ortak veriler üzerinden ilişkilendiren önemli bir dönüşümü temsil etmektedir. Bu dönüşümün esas kazanımı, yalnızca geleneksel uygulamaların dijital ortamda yeniden üretilmesi değil; tarama, tasarım, üretim ve klinik kontrol aşamalarının birbiriyle daha izlenebilir biçimde ilişkilendirilmesidir. Bununla birlikte dijital veri elde edilmiş olması, restorasyonun otomatik olarak daha doğru, dayanıklı veya uzun ömürlü olacağı anlamına gelmemektedir. Nihai sonuç; klinik endikasyon, dokuların durumu, ölçü stratejisi, restorasyon geometrisi, materyal seçimi, üretim parametreleri ve uygulayıcıların yetkinliği ile birlikte değerlendirilmelidir.

Mevcut kanıtlar, sınırlı açıklıklı sabit protetik restorasyonlarda dijital ölçü yöntemlerinin klinik olarak uygulanabilir ve hasta açısından konforlu bir alternatif sunduğunu; geniş ark ve implant üstü restorasyonlarda ise ölçüm hatalarının daha karmaşık değişkenlerden etkilendiğini göstermektedir (Afrashtehfar ve ark., 2022; Schmidt ve ark., 2022; Gehrke ve ark., 2024; Bernauer ve ark., 2023). Özellikle tam ark ölçülerinde tarama yolunun sürekliliği, implantların yerleşimi ve scanbody geometrisi göz önünde tutulmalı; uygun görülmeyen veriler yalnızca yazılım ortamında düzeltilmeye çalışılmamalı, gerekirse ölçü yeniden alınmalıdır. Klinik kabul ölçütleri ile laboratuvarın teknik sınırlarının restorasyon tasarımından önce paylaşılması, düzeltme ve yeniden üretim ihtiyacını azaltmaya yönelik rasyonel bir yaklaşımdır.

Dental laboratuvar açısından frezeleme ve eklemeli üretim birbirinin koşulsuz alternatifi olarak değil, farklı endikasyonlara yanıt veren yöntemler olarak düşünülmelidir. Üretim doğruluğuna ilişkin bulguların materyal, cihaz, yazılım ve tasarım koşullarına göre değişmesi; in vitro sonuçların doğrudan uzun dönem klinik üstünlük şeklinde yorumlanmaması gerektiğini ortaya koymaktadır (Lüchtenborg ve ark., 2022; Mou ve ark., 2025). Özellikle kalıcı rezin esaslı restorasyonlarda mekanik ve yüzey özelliklerinin yaşlandırma ile değişebilmesi nedeniyle materyallerin kullanım alanı, üreticinin endikasyonları ve klinik kanıt birlikte değerlendirilmelidir (Gad ve ark., 2024; Mandurino ve ark., 2025).

Dijital sistemlerin başarısında diş hekiminin tedavi hedefleri ile diş protez teknikerinin üretim kararları arasındaki uyum belirleyici olmaya devam etmektedir. Teknikerin mesleki rolü ortadan kalkmamakta; dijital modelin değerlendirilmesi, restorasyon sınırlarının ve oklüzal ilişkilerin yorumlanması, üretim yöneliminin belirlenmesi, son işlem ve kalite kontrol gibi görevlerle yeniden şekillenmektedir (Takaichi ve ark., 2021; Ismail ve Al-Moghrabi, 2023). Kurumların eğitim, yazılım uyumluluğu, bakım maliyeti ve veri güvenliği gereksinimlerini teknik cihaz yatırımıyla eş zamanlı planlaması önemlidir. Verinin çevrimiçi iletiminde geometrik bütünlüğün korunması, hasta mahremiyeti ve erişim yetkisi konularının ayrıca yönetilmesi gereğini ortadan kaldırmaz (Bueno ve ark., 2022).

Sonuç olarak, dijitalleşmenin sunduğu olanaklardan güvenilir biçimde yararlanmak için protetik tedavi süreçleri vaka temelli planlanmalı, klinik ve laboratuvar arasında standart bir iletişim düzeni kurulmalı, her aşamada kontrol noktaları tanımlanmalı ve teknolojiye ilişkin iddialar ilgili çalışma tasarımının kanıt gücüyle sınırlı tutulmalıdır. Gelecekteki araştırmalarda yalnızca laboratuvar doğruluğunun değil, hasta bildirimli sonuçların, uzun dönem restorasyon başarısının, tekrar üretim gereksiniminin ve toplam tedavi maliyetinin birlikte değerlendirilmesi önem taşımaktadır. Bu yaklaşım, dijital iş akışlarını kendi başına bir amaç olmaktan çıkararak öngörülebilir, kişiselleştirilmiş ve sürdürülebilir protetik tedavinin bir aracı hâline getirecektir.

Kaynaklar:

Abdulkarim, L. I., Alharamlah, F. S. S., Abubshait, R. M., Alotaibi, D. A., & Abouonq, A. A. (2024). Impact of digital workflow integration on fixed prosthodontics: A review of advances and clinical outcomes. Cureus, 16(10), e72286. https://doi.org/10.7759/cureus.72286

Abduo, J., & Rasaie, V. (2025). Digital workflows in prosthodontics. Australian Dental Journal, 70(Suppl. 1), S146–S158. https://doi.org/10.1111/adj.70005

Afrashtehfar, K. I., Alnakeb, N. A., & Assery, M. K. M. (2022). Accuracy of Intraoral Scanners Versus Traditional Impressions: A Rapid Umbrella Review. https://doi.org/10.1016/j.jebdp.2022.101719

Alotaibi, K. F., & Mohd Kassim, A. (2023). Factors That Influence the Adoption of Digital Dental Technologies and Dental Informatics in Dental Practice. https://doi.org/10.3991/ijoe.v19i15.43015

Ataei, K., Ghaffari, T., Moslehifard, E., & Maleki Dizaj, S. (2024). Physico-chemical and Mechanical Assessments of a New 3D Printed PMMA-Based Acrylic Denture Base Material. https://doi.org/10.2174/0118742106278787240125061635

Bernauer, S. A., Zitzmann, N. U., & Joda, T. (2023). The complete digital workflow in fixed prosthodontics updated: A systematic review. Healthcare, 11(5), 679. https://doi.org/10.3390/healthcare11050679

Boukhris, H., Thabet, A., Ben Dalla, A., M'ghirbi, N., Hajjaji, S., Hajjemi, H., & Ben Youssef, S. (2024). 3D Virtual Patient in Dentistry: A Comprehensive Literature Review. http://dx.doi.org/10.9734/bpi/strufp/v3/343

Bueno, J. M., Gouveia, C. G., Mundim, M. B. V., Franco, A., Junqueira, J. L. C., & Nascimento, M. do C. C. (2022). Effect of decompression and online transmission on the dimensional changes of .stl files generated by intra-oral scanning. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0272989

Campobasso, A., Battista, G., Lo Muzio, E., & Lo Muzio, L. (2022). The Virtual Patient in Daily Orthodontics: Matching Intraoral and Facial Scans without Cone Beam Computed Tomography. https://doi.org/10.3390/app12199870

Dalkiz, M., Ozer, A., & Dalkiz, I. S. (2024). Systematic Literature Review of the Digital Dentistry. https://doi.org/10.36106/paripex/1603792

El Osta, N., Bessadet, M., Drancourt, N., & Batisse, C. (2025). Time efficiency and cost of fabricating removable complete dentures using digital, hybrid, and conventional workflows: A systematic review. The Journal of Prosthetic Dentistry, 133(5), 1194–1208. https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2024.10.008

Gad, M. M., Al Mahfoudh, H. A., Al Mahfuth, F. A., Hashim, K. A., Khan, S. Q., Al-Qarni, F. D., Baba, N. Z., & Al-Harbi, F. A. (2024). A comparative study of strength and surface properties of permanent 3D-printed resins with CAD-CAM milled fixed dental prostheses. https://doi.org/10.1111/jopr.13990

Gehrke, P., Rashidpour, M., Sader, R., & Weigl, P. (2024). A systematic review of factors impacting intraoral scanning accuracy in implant dentistry with emphasis on scan bodies. https://doi.org/10.1186/s40729-024-00543-0

Grande, F., Tesini, F., Pozzan, M. C., Mochi Zamperoli, E., Carossa, M., & Catapano, S. (2022). Comparison of the Accuracy between Denture Bases Produced by Subtractive and Additive Manufacturing Methods: A Pilot Study. https://doi.org/10.3390/prosthesis4020015

Hanozin, B., Li Manni, L., Lecloux, G., Bacevic, M., & Lambert, F. (2022). Digital vs. conventional workflow for one-abutment one-time immediate restoration in the esthetic zone: a randomized controlled trial. https://doi.org/10.1186/s40729-022-00406-6

Ismail, E. H., & Al-Moghrabi, D. (2023). Interrelationship between dental clinicians and laboratory technicians: a qualitative study. https://doi.org/10.1186/s12903-023-03395-z

Joda, T., Balmer, M., Jung, R. E., & Ioannidis, A. (2024). Clinical use of digital applications for diagnostic and treatment planning in prosthodontics: A scoping review. Clinical Oral Implants Research, 35(8), 782–792. https://doi.org/10.1111/clr.14230

Kong, H.-J., & Kim, Y.-L. (2025). Accuracy of Artificial Intelligence-Designed Dental Crowns: A Scoping Review of In-Vitro Studies. https://doi.org/10.3390/app15189866

Kong, H.-J., & Kim, Y.-L. (2024). Application of artificial intelligence in dental crown prosthesis: a scoping review. https://doi.org/10.1186/s12903-024-04657-0

Lee, Y. (2025). Perceptions and Needs Assessment of Digital Dentistry Interdisciplinary Education Among Dental Laboratory Technology Students. https://doi.org/10.3390/oral5040079

Lüchtenborg, J., Willems, E., Zhang, F., Wesemann, C., Weiss, F., Nold, J., Sun, J., Sandra, F., Bai, J., Reveron, H., Chevalier, J., & Spies, B. C. (2022). Accuracy of additively manufactured zirconia four-unit fixed dental prostheses fabricated by stereolithography, digital light processing and material jetting compared with subtractive manufacturing. https://doi.org/10.1016/j.dental.2022.06.026

Ma, J., Zhang, B., Song, H., Wu, D., & Song, T. (2023). Accuracy of digital implant impressions obtained using intraoral scanners: a systematic review and meta-analysis of in vivo studies. https://doi.org/10.1186/s40729-023-00517-8

Mahato, M., Hota, S., Jain, A., Dutta, D., Bhushan, P., & Raut, A. (2024). Comparison of conventional and digital workflows in the fabrication of fixed prostheses: A systematic review. Cureus, 16(6), e61764. https://doi.org/10.7759/cureus.61764

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. https://doi.org/10.3390/ma18050985

Mohajerani, R., Djalalinia, S., & Alikhasi, M. (2025). The Effects of Scan Body Geometry on the Precision and the Trueness of Implant Impressions Using Intraoral Scanners: A Systematic Review. https://doi.org/10.3390/dj13060252

Mou, Z., Huang, L., Alhotan, A., Li, P., & Huang, J. (2025). Do zirconia fixed dental prostheses fabricated by additive manufacturing offer comparable accuracy to subtractive manufacturing? A systematic review and meta-analysis. https://doi.org/10.2186/jpr.jpr_d_24_00324

Ohyama, H., Duong, M.-L., Yancoskie, A. E., Smiley, A. B., Syed, A. Z., Reddy, M. S., & Bencharit, S. (2025). Challenges and Opportunities in Implementing Digital Technology in Dental Curriculum: A Review and Perspective. https://doi.org/10.7759/cureus.83272

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. https://doi.org/10.3390/ma17163951

Saeed, E. A. M., Alaghbari, S. S., & Lin, N. (2023). The impact of digitization and conventional techniques on the fit of fixed partial dentures FPDs: systematic review and Meta-analysis. https://doi.org/10.1186/s12903-023-03628-1

Schmalzl, J., Róth, I., Borbély, J., Hermann, P., & Vecsei, B. (2023). The effect of generation change on the accuracy of full arch digital impressions. https://doi.org/10.1186/s12903-023-03476-z

Schmidt, A., Wöstmann, B., & Schlenz, M. A. (2022). Accuracy of digital implant impressions in clinical studies: A systematic review. https://doi.org/10.1111/clr.13951

Takaichi, A., Fueki, K., Murakami, N., Ueno, T., Inamochi, Y., Wada, J., Arai, Y., & Wakabayashi, N. (2021). A systematic review of digital removable partial dentures. Part II: CAD/CAM framework, artificial teeth, and denture base. https://doi.org/10.2186/jpr.jpr_d_20_00117

Turkyilmaz, I., Benli, M., & Yun, S. (2023). Evaluation of marginal and internal fit of lithium disilicate and zirconia all-ceramic CAD-CAM crowns using digital impressions: A systematic review. https://doi.org/10.1177/20501684231154323

BÖLÜM 2

CAD/CAM SİSTEMLERDE EKSİLTMELİ VE EKLEMELİ ÜRETİM TEKNİKLERİ

Berna BİŞKİN DİNÇER[1]
Seda Nur BOZKURT PEHLİVANLI[2]

Giriş

Dijital teknolojilerin gelişmesiyle beraber diş hekimliği alanında klinik uygulamalarda hızlı bir değişim olmuştur. Bilgisayar destekli tasarım ve bilgisayar destekli üretim (CAD/CAM) sistemlerinin diş hekimliğinde kullanılmaya başlanması 1980'li yıllara dayanmaktadır ve o tarihten bu yana önemli gelişmeler kaydedilmiştir (Beuer et al., 2008). Geleneksel yöntemlerle dental restorasyonların üretimi, manuel işçilik gerektiren, zaman alıcı ve genellikle daha az hassas süreçlerden oluşmaktaydı. CAD/CAM teknolojisinin ortaya çıkmasıyla birlikte, diş hekimleri dijital ölçüler ve otomatik üretim süreçlerinden yararlanarak bu sınırlamaları aşabilme imkanına kavuşmuştur (Maiti et al., 2024).

[1] Öğr. Gör. Dr., Kırıkkale Üniversitesi, Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu Dişçilik Hizmetleri Bölümü, Orcid: 0009-0000-1682-5718
[2] Öğr. Gör., Kırıkkale Üniversitesi, Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu Dişçilik Hizmetleri Bölümü, Orcid: 0009-0000-6121-4668

Dijital diş hekimliği temelde, üç aşamalı bir süreçtir. İlk aşamada, dental anatomi optik tarama yoluyla kaydedilerek dijital bir ölçü oluşturulmaktadır. İkinci aşamada, bu dijital veriler özel CAD yazılımları kullanılarak restorasyon tasarımı için işlenmekte ve üçüncü aşamada tasarlanan restorasyonlar çeşitli CAM teknikleriyle fiziksel forma dönüştürülmektedir (Maiti et al., 2024). Bu dijitalleşme süreci, teknik hassasiyeti artırmış, tedavi süreçlerini hızlandırmış ve hasta memnuniyetini önemli ölçüde iyileştirmiştir (Ahmed, 2018).

CAD yazılımları, elde edilen dijital verileri işleyerek klinisyen veya teknisyenin restorasyonu tasarlamasına olanak tanımaktadır. Modern CAD yazılımları, anatomik form kütüphaneleri, oklüzal kontakt optimizasyon araçları ve proksimal kontakt ayarlama fonksiyonları içermektedir (Miyazaki et al., 2009). Bazı gelişmiş sistemler, yapay zeka destekli tasarım önerileri sunarak tasarım süresini kısaltmaktadır.

CAM üniteleri ise, dijital tasarımı fiziksel bir restorasyona dönüştüren üretim cihazlarıdır. Bu cihazlar, eksiltmeli veya eklemeli üretim prensipleriyle çalışabilmektedir. Eksiltmeli sistemlerde, katı bir blok frezeleme yoluyla şekillendirilirken eklemeli sistemlerde materyal katman katman eklenerek istenen form oluşturulmaktadır (Stansbury & Idacavage, 2016). Her iki yöntemin de kendine özgü avantajları, dezavantajları ve endike olduğu alanlar bulunmaktadır.

Eksiltmeli üretim, malzeme azaltma prensibiyle çalışan geleneksel bir üretim metodudur. Bu yöntemde, katı bir blok materyal, döner kesici aletler kullanılarak istenmeyen kısımların uzaklaştırılmasıyla şekillendirilmektedir. Frezeleme işlemi sırasında materyal talaş formunda uzaklaştırılmakta ve nihai restorasyon ortaya çıkmaktadır (Rekow, 2020).

Eklemeli üretim, malzeme ekleme prensibiyle çalışan yeni nesil bir üretim teknolojisidir. Bu yöntemde, materyal katman

katman eklenerek restorasyon üretilmektedir (Dawood et al., 2015). Her katman, dijital tasarımın iki boyutlu kesitine karşılık gelmekte ve önceki katmanın üzerine hassas bir şekilde yerleştirilmektedir. Her iki yöntem de diş hekimliğinde farklı uygulama alanlarına sahiptir.

Eksiltmeli Üretim Teknolojileri

Eksiltmeli üretimin temelinde, döner kesici aletlerin yani frezlerin yüksek hızda rotasyon yaparak malzeme yüzeyinden mikro parçacıklar kaldırması yatmaktadır. Bu işlem sırasında, frez tipi, dönüş hızı, ilerleme hızı ve kesme derinliği gibi parametreler restorasyonun kalitesini doğrudan etkilemektedir (Rekow, 2020).

Frezeleme işlemi sırasında, kesici alet ile restoratif materyal arasında yüksek temas basınçları oluşmakta ve bu da önemli miktarda ısı üretimine neden olmaktadır. Özellikle seramik materyallerde, bu termal stres, mikro çatlak oluşumuna ve malzeme dayanımında azalmaya yol açabilmektedir (Alharbi et al., 2016). Bu nedenle, modern CAM sistemlerinde ısı yönetimi son derece önemlidir. Islak frezeleme sistemlerinde soğutucu sıvılar kullanılırken kuru frezeleme sistemlerinde hava soğutma veya aralıklı kesme stratejileri uygulanmaktadır. Zirkonyum oksit gibi sert seramikler için elmas kaplı frezler kullanılırken, polimetilmetakrilat (PMMA) gibi polimerler için tungsten karbid frezler yeterli olmaktadır (Beuer et al., 2008). Kesme kuvvetleri ve moment değerleri, malzeme özelliklerine göre optimize edilmelidir. Aksi takdirde frez kırılması, materyal hasarı veya boyutsal sapmalar meydana gelebilmektedir. Modern CAM yazılımları, bu parametreleri otomatik olarak optimize ederek operatör hatalarını en aza indirmektedir.

Bilgisayar sayısal kontrol (CNC) frezeleme sistemleri, dijital tasarımı hassas mekanik hareketlere çeviren üretim cihazlarıdır. 3 eksenli frezeleme sistemleri, X, Y ve Z eksenleri boyunca hareket

edebilmektedir. Bu sistemler, kron ve inley gibi basit restorasyonların üretiminde yeterli olmakla birlikte undercut bölgelere erişim kısıtlıdır (Beuer et al., 2008). Klinik pratikte, 3 eksenli sistemler geniş kullanım alanına sahip olup maliyet-etkinlik açısından avantajlıdır. Ancak, karmaşık anatomik formların üretiminde sınırlamalar bulunmaktadır. 4 eksenli sistemler, üç lineer eksene ek olarak bir rotasyon eksenine sahiptir. Bu ilave eksen sayesinde, restorasyonun üretileceği blok döndürülerek undercut bölgelere erişim sağlanabilmektedir. 4 eksenli sistemler, implant dayanağı ve köprü gibi daha karmaşık restorasyonların üretiminde tercih edilmektedir. Rotasyon ekseni, frezeleme stratejilerinin iyileştirilmesine ve üretim süresinin kısaltılmasına olanak tanımaktadır. 5 eksenli sistemler, en gelişmiş sistemlerdir ve iki rotasyon ekseni içermektedir. Bu sistemler, karmaşık anatomik formları ve undercut bölgeleri tek kurulumda işleyebilmektedir. 5 eksenli frezeleme, tam ark implant üstü restorasyonlar ve anatomik zirkonyum köprüler gibi büyük ve karmaşık yapıların üretiminde tercih edilmektedir. Bununla birlikte, yatırım maliyeti ve operatör eğitimi gereksinimleri 3 eksenli sistemlere göre daha yüksektir (Pilecco et al., 2024).

Kuru frezeleme, soğutucu sıvı kullanılmadan gerçekleştirilen bir işlem türüdür. Bu yöntemde, talaş uzaklaştırma vakum sistemi ile yapılmakta ve hava soğutması kullanılabilmektedir (Galante et al., 2019). Kuru frezeleme, özellikle yarı sinterlenmiş zirkonyum blokların işlenmesinde tercih edilmektedir. Bu bloklar, tam sinterleme öncesinde tebeşir kıvamında olduğundan daha kolay işlenebilmektedir. Sinterleme sonrası %20-25 oranında büzülme meydana geldiğinden CAM yazılımı bunu kompanse edecek şekilde tasarım yapmaktadır (Kwon & Park, 2023). Kuru frezeleme avantajları arasında daha hızlı işlem süresi, daha az ekipman gereksinimi ve kolay temizlik sayılabilir. Ancak, ısı birikimi ve toz oluşumu dezavantajlardır. Özellikle cam seramikler gibi ısıya

duyarlı materyallerde, kuru frezeleme işlemi, mikro çatlak oluşumuna neden olabilmektedir. Modern kuru frezeleme sistemleri, gelişmiş vakum ve filtrasyon sistemleri ile toz emisyonunu en aza indirmekte ve operatör güvenliğini artırmaktadır (Miyazaki et al., 2009).

Islak frezeleme, soğutucu sıvı kullanılarak gerçekleştirilen işlem türüdür. Soğutucu sıvı, kesme bölgesindeki ısıyı absorbe ederek termal hasarı önlemekte ve talaş uzaklaştırma işlevini görmektedir (Beuer et al., 2008). Bu yöntem, tam sinterlenmiş zirkonyum blokların ve cam seramiklerin işlenmesinde standart yöntemdir. Islak frezeleme, daha iyi yüzey kalitesi ve daha az frez aşınması sağlamaktadır. Islak frezeleme dezavantajları arasında daha yavaş işlem hızı, soğutucu sıvının düzenli değiştirilmesi gereksinimi ve daha karmaşık ekipman sayılabilir (Miyazaki et al., 2009). Soğutucu sıvının kontaminasyonu ve bakteri üremesi hijyen açısından risk unsurlarıdır. Bununla birlikte, estetik uygulamalarda ve yüksek dayanıklılık gerektiren restorasyonlarda ıslak frezeleme tercih edilmektedir.

Eksiltmeli Üretim Materyalleri

Diş hekimliğinde eksiltmeli üretim için çok çeşitli materyal blokları mevcuttur. Zirkonyum oksit (ZrO_2), yüksek mekanik dayanıklılığı, kırılma tokluğu ve biyouyumluluğu nedeniyle posterior bölge kronlarında ve köprülerde yaygın olarak kullanılmaktadır (Denry & Kelly, 2008). Ytriya ile stabilize edilmiş tetragonal zirkonyum polikristalin (Y-TZP), diş hekimliğinde en yaygın kullanılan zirkonyum formudur. Yeni nesil çok katmanlı zirkonyum bloklar, anterior bölge estetiğini geliştirmek için farklı translüsensi ve renk geçişleri içermektedir (Kolakarnprasert et al., 2019).

Cam seramikler, mükemmel estetik özellikleri nedeniyle anterior bölge restorasyonlarında sıklıkla tercih edilmektedir.

Lityum disilikat cam seramik, yüksek dayanıklılık ve translüsensi gibi avantajlar sunmaktadır (Alrashidy et al., 2025). Son yıllarda geliştirilen zirkonyum ile güçlendirilmiş lityum silikat seramikler, daha yüksek mekanik özellikler sağlamaktadır. Cam seramik bloklar, kristalize ve pre-kristalize formda mevcuttur; pre-kristalize bloklar daha kolay frezelenmekte ancak sonrasında kristalizasyon fırınlaması gerektirmektedir (Fasbinder, 2010).

Metal alaşımları, özellikle hareketli bölümlü protez iskeletlerinde ve bazı implant üstü restorasyonlarda kullanılmaktadır. Kobalt-krom (Co-Cr) ve titanyum (Ti) alaşımları, yüksek biyouyumluluk ve korozyon direnci göstermektedir (Asgar, 1988). Metal blokların frezelenmesi, elmas kaplı özel frezler ve düşük ilerleme hızları gerektirmektedir. Titanyum özellikle reaktif bir metal olduğundan, oksitlenmeyi önlemek için özel frezeleme stratejileri uygulanmalıdır (Kang et al., 2025).

Polimerler; geçici restorasyonlar, tanısal modeller ve cerrahi rehberler için kullanılmaktadır. PMMA, geçici kronlar ve köprüler için yaygın bir tercihtir (Alt et al., 2011). Polietereterketon (PEEK), son yıllarda implant dayanaklarında, sabit ve hareketli protezlerde metal alternatifi olarak değerlendirilmektedir (Najeeb et al., 2016). Polimer blokların frezelenmesi, düşük ısı üretimi ve keskin frezler gerektirmektedir, aksi takdirde erime ve deformasyon meydana gelebilmektedir.

Eksiltmeli Yöntemin Sınırlamaları

Eksiltmeli üretimin en önemli dezavantajlarından biri, önemli miktarda materyal israfıdır. Bir kron üretimi için kullanılan zirkonyum bloğun çok büyük bir kısmı talaş olarak uzaklaştırılmaktadır (Alharbi et al., 2016). Özellikle pahalı materyaller söz konusu olduğunda, bu israf ekonomik açıdan önemli bir yük oluşturmaktadır. Bazı üreticiler, talaş geri dönüşüm

sistemleri geliştirmekte olup, özellikle metal tozlar yeniden sinterlenerek kullanılabilmektedir.

Geometrik kısıtlamalar, eksiltmeli üretimin diğer önemli sınırlamasıdır. Frezeleme işlemi, frezin erişebildiği bölgelerle kısıtlıdır ve keskin iç köşeler veya derin undercutlar üretilemez (van Noort, 2012). Minimum duvar kalınlığı, malzeme kırılganlığına bağlı olarak 0.5-1.0 mm arasındadır, bundan daha ince yapılar frezeleme sırasında kırılma riskine sahiptir (Nakamura et al., 2015). 5 eksenli sistemler bile, tamamen kapalı iç geometrilerin üretiminde yetersiz kalmaktadır.

Frezeleme süresi, karmaşık geometrilerde önemli ölçüde artmaktadır. Basit bir kron 10-15 dakikada frezelenebilirken, tam ark implant üstü restorasyon 60-90 dakika gerektirebilmektedir (Zaruba & Mehl, 2017). Uzun frezeleme süreleri, üretim maliyetini artırmakta ve acil durumlarda dezavantaj oluşturmaktadır. Ayrıca, uzun süreli frezeleme termal stres birikimini artırarak malzeme özelliklerini olumsuz etkileyebilmektedir (Luthardt et al., 2002).

Frezeleme işlemi, doğası gereği frez izleri ve mikro pürüzlülük oluşturmaktadır. Özellikle zirkonyum gibi opak materyallerde, yüzey bitimi sonucu translüsensi etkilenmektedir. Cilalama ve glaze uygulamaları ile yüzey iyileştirilebilse de bu ek işlemler zaman ve maliyet artışına neden olmaktadır (Lawson et al., 2014).

Eklemeli Üretim Teknolojileri

Eklemeli üretim teknolojilerinin temelinde, üç boyutlu dijital modelin iki boyutlu horizontal kesitlere bölünmesi ve bu kesitlerin sırayla fiziksel katmanlara dönüştürülmesi yatmaktadır. Her katman, önceki katmanın üzerine hassas bir şekilde eklenmektedir. Katman kalınlığı, dikey çözünürlüğü belirlemektedir ve daha ince katmanlar daha iyi yüzey kalitesi sağlarken üretim süresini uzatmaktadır (Dawood et al., 2015).

Stereolitografi (SLA), rezin polimerizasyonuna dayalı ilk ticari eklemeli üretim teknolojisidir. SLA sistemlerinde, fotoaktif reçine havuzu içinde ultraviyole (UV) lazer ışını, her katmanın geometrisini tarayarak polimerizasyon başlatmaktadır (Stansbury & Idacavage, 2016). Lazer, galvanometre aynalarıyla yönlendirilerek yüksek hassasiyette geometrik formlar oluşturmaktadır. SLA, mükemmel yüzey kalitesi ve detay çözünürlüğü sunmakta olup cerrahi rehberler ve tanısal modellerde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Digital Light Processing (DLP), projeksiyon tabanlı bir polimerizasyon tekniğidir. Bu yaklaşım, özellikle büyük yüzey alanlarında çok daha hızlı üretim sağlamaktadır. DLP projeksiyon kaynağı olarak LED veya UV lambalar kullanmaktadır. DLP sistemleri, dental model üretiminde yüksek verimlilik nedeniyle tercih edilmektedir (Caussin et al., 2024).

Liquid Crystal Display (LCD) bazlı sistemler, DLP'ye benzer şekilde projeksiyon kullanmakta ancak LCD ekran maskeleme prensibiyle çalışmaktadır. LCD ekran, ışık kaynağı ve reçine havuzu arasında konumlanarak her katmanın geometrisini filtrelemektedir. LCD sistemler, DLP'ye göre daha ekonomiktir ve benzer yüzey kalitesi sunmaktadır. Bununla birlikte, LCD ekranların kullanım ömrü kısıtlıdır ve düzenli değişim gerektirmektedir (Caussin et al., 2024).

Toz Yataklı Füzyon Teknikleri (SLM, DMLS, EBM)

Selective Laser Melting (SLM), metal tozlarının lazer ile eritilerek katmanlaştırılması prensibiyle çalışan bir eklemeli üretim tekniğidir (Alammar et al., 2022). SLM sistemlerinde, ince bir metal tozu katmanı platform üzerine serilmekte ve yüksek güçlü fiber lazer seçici olarak tozu eritip katılaştırmaktadır. Eritme havuzu, mikron seviyesinde kontrol edilmekte ve hızlı soğuma ile yoğun metal yapı oluşmaktadır. SLM, Co-Cr ve titanyum alaşımlarından implant üstü

dayanak ve hareketli protez iskeletleri üretiminde kullanılmaktadır (Al Jabbari et al., 2024).

Direct Metal Laser Sintering (DMLS), SLM'ye benzer bir teknolojidir ancak tozların tam erimeden sinterlenmesine dayalıdır. DMLS, daha düşük güçte lazer kullanarak tozlar arasında difüzyon bağlarının oluşmasını sağlamaktadır (Mangano et al., 2014). Bu yöntem, termal stres ve distorsiyonu azaltmakta ancak SLM kadar yoğun yapılar üretememektedir.

Electron Beam Melting (EBM), elektron ışını kullanarak metal tozlarını eriten alternatif bir teknolojidir. EBM sistemleri, yüksek vakum ortamında çalışmakta ve elektron ışını elektromanyetik merceklerle yönlendirilmektedir. EBM, SLM'ye göre daha yüksek sıcaklıklarda çalışmakta olup rezidüel stres oluşumu en aza indirilmektedir. Titanyum alaşımları için EBM, mükemmel mekanik özellikler ve biyouyumluluk sunmaktadır (Yan et al., 2018).

Toz yataklı sistemlerin ortak zorlukları arasında destek yapı gerekliliği, yüzey pürüzlülüğü ve porözite kontrolü bulunmaktadır. Yüzey pürüzlülüğü, bağlanmamış toz partikülleri nedeniyle yüksektir ve kumlamaya veya frezelemeye ihtiyaç duyulmaktadır (Barazanchi et al., 2017).

Materyal Püskürtme (PolyJet) ve Ekstrüzyon (FDM) Yöntemleri

PolyJet teknolojisi, inkjet baskı prensibine dayanan yüksek çözünürlüklü bir eklemeli üretim yöntemidir. Bu sistemlerde, sıvı fotopolimer damlacıkları hassas bir şekilde substrat üzerine püskürtülmekte ve UV ışık ile anında polimerize edilmektedir (Stansbury & Idacavage, 2016). PolyJet, çok materyalli baskı kapasitesi sunmakta olup aynı üretim içinde farklı sertlik, renk ve translüsensiye sahip materyaller kullanılabilmektedir.

PolyJet sistemlerin dental uygulamaları arasında diagnostik modeller, oklüzal splintler ve geçici restorasyonlar bulunmaktadır. Çok materyalli özellik, farklı sertlikteki materyallerin kombinasyonuyla yumuşak doku simülasyonu ve anatomik modelleme için avantajlar sunmaktadır. Bununla birlikte, PolyJet materyallerin mekanik dayanıklılığı sınırlıdır ve uzun süreli intraoral kullanım için uygun değildir (Cazón et al., 2014).

Fused Deposition Modeling (FDM), termoplastik filamentlerin ekstrüzyonuna dayanan ekonomik bir eklemeli üretim yöntemidir. FDM sistemlerinde, termoplastik filament eriyik halde substrat üzerine yatırılmaktadır. Nozül, X-Y düzleminde hareket ederek her katmanın geometrisini oluştururken, üretim platformu Z ekseninde kademeli olarak alçalmaktadır (Dawood et al., 2015). Diş hekimliğinde FDM, dental modeller, alçı alternatifi modeller ve cerrahi rehberler için kullanılmaktadır.

Eklemeli Üretim Materyalleri

Dental eklemeli üretim için en yaygın kullanılan materyaller, fotopolimerik reçinelerdir. Bu reçineler, akrilik veya metakrilik monomerler, dolgu partikülleri ve katkı maddeleri içermektedir (Stansbury & Idacavage, 2016).

Biyouyumlu reçineler, direkt intraoral kullanım için spesifik testlerden geçmelidir. ISO 10993 standartları, sitotoksisite, hassasiyet ve irritasyon testlerini gerektirmektedir (Weżgowiec et al., 2024). Rezidüel monomer miktarı, yetersiz polimerizasyondan kaynaklanmaktadır ve toksik etkilere neden olabilmektedir. Yeni nesil dental reçineler, antimikrobiyal özellikler ve düşük polimerizasyon büzülmesi gibi gelişmiş fonksiyonlar içermektedir (Fugolin & Pfeifer, 2017).

Metal tozlar, eklemeli üretimde titanyum ve Co-Cr alaşımları olarak kullanılmaktadır. Toz kalitesi, oksijen içeriği ve

kontaminasyon kontrolü, nihai restorasyon özelliklerini doğrudan etkilemektedir (Jang et al., 2020).

Polimer filamentler, FDM sistemlerinde kullanılmakta olup polietilen tereftalat glikol (PETG), polilaktik asit (PLA) ve PEEK gibi çeşitler mevcuttur. Kompozit filamentler, karbon fiber veya cam fiber takviyeli versiyonlar olarak üretilmekte ve gelişmiş mekanik özellikler sunmaktadır (Jeong et al., 2023).

Karşılaştırmalı Analiz: Eksiltmeli ve Eklemeli Yöntemler

Doğruluk, üretilen parçanın dijital tasarıma ne kadar yakın olduğunu, hassasiyet ise tekrarlı üretimlerde tutarlılığı ifade etmektedir. Marjinal uyum, restorasyonun preparasyon kenarına uyumu olarak tanımlanmaktadır ve klinik başarı için büyük öneme sahiptir. Klinik olarak kabul edilebilir marjinal aralık 120 μm'nin altındadır. Daha büyük aralıklar, siman çözünmesi ve sekonder çürük riskini artırmaktadır (Contrepois et al., 2013). İnternal uyum, restorasyonun iç yüzeyinin preparasyona uyumunu ifade etmektedir. Yetersiz internal uyum, siman kalınlığının artmasına ve stres konsantrasyonuna neden olabilmektedir (Tuntiprawon & Wilson, 1995). Co-Cr üç üyeli sabit bölümlü protezlerin marjinal ve internal uyumunun değerlendirildiği bir çalışmada, en iyi uyumun DMLS grubunda bulunduğu bildirilmiştir (Örtorp et al., 2011).

Uyum değerlendirmesi için silikon replika tekniği yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemde, restorasyonun preparasyon üzerindeki boşlukları light-body silikon ile doldurularak replika elde edilmektedir. Replika kesilerek farklı noktalarda aralık ölçümleri yapılmaktadır. Mikro-CT veya stereomikroskop ile uyum değerlendirmesi yapılabilmekte, marjinal ve internal aralıklar analiz edilebilmektedir (Mansour et al., 2021).

Eksiltmeli üretimde kullanılan bloklar, endüstriyel olarak üretilmekte ve homojen mikroyapı göstermektedir. Zirkonyum bloklar, izostatik presleme ve sinterleme ile üretilmekte olup, tüm

yönlerde benzer mekanik özellikler sergilemektedir (Denry & Kelly, 2008). Cam seramik bloklar da benzer şekilde homojen kristal yapı içermektedir.

Eklemeli üretimde ise, katmanlı imalat süreci anizotropik özellikler oluşturabilmektedir. Z yönünde mekanik özellikler, XY yönüne göre değişkenlik gösterebilmektedir. Bu anizotropi, katmanlar arası bağlanmanın bulk materyalden daha zayıf olması nedeniyledir (Zohdi & Yang, 2021).

Eksiltmeli üretim blokları, yüksek yoğunlukta olup minimal porözite içermektedir. CAD/CAM frezeleme ile üretilen dental restorasyonlar, homojen ve yoğun yapı göstermektedir (Miyazaki & Hotta, 2011). Eklemeli metal parçalar ise, proses parametrelerine bağlı olarak porözite gösterebilmektedir . Yüksek kaliteli toz, optimize edilmiş proses parametreleri ve sıcak izostatik presleme işlemi, poröziteyi en aza indirmektedir (Sing et al., 2016).

Çeşitli son işlem ve parlatma teknikleri kullanılarak, klinik ortamda CAD/CAM ile üretilen esnek malzemeler için frezelenmiş seramiklere kıyasla eşit derecede pürüzsüz bir yüzey oluşturmanın mümkün olduğu bildirilmiştir (Fasbinder & Neiva, 2016).

Eklemeli üretim, minimal materyal israfına neden olmaktadır. Teorik olarak sadece parça hacmi kadar materyal kullanılmaktadır. Ancak, destek yapı kullanımı ve başarısız baskılar, gerçek israf oranını artırmaktadır. Reçine atıkları, kimyasal atık olarak sınıflandırılmakta ve özel olarak bertaraf gerektirmektedir.

Klinik Endikasyona Göre Yöntem Seçimi

Diş hekimliğinde dental restorasyonların üretim yönteminin seçimi, hastanın klinik durumu, restorasyon tipi, anatomik lokasyon, beklenen mekanik yükler, estetik gereksinimler, maliyet analizi ve tedavi süresi gibi çok sayıda faktörün dikkatli değerlendirilmesini gerektirmektedir. Eksiltmeli ve eklemeli üretim yöntemlerinin her

birinin kendine özgü avantajları, sınırlamaları ve endikasyonları bulunmaktadır.

Doğru yöntemin seçilmesi, restorasyonun uzun dönem başarısını, biyolojik dokularla uyumunu, hasta memnuniyetini ve tedavi maliyetlerini doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle, klinisyenlerin her iki üretim teknolojisinin klinik performans verilerini, güçlü ve zayıf yönlerini bilmeleri, bu doğrultuda bir karar vermeleri önem arz etmektedir.

Posterior bölgedeki tam seramik restorasyonlar için eksiltmeli üretim yöntemleri, özellikle CAD/CAM frezeleme ile üretilen monolitik zirkonyum ve lityum disilikat kronlar, klinik pratikte altın standart olarak kabul edilmektedir. Posterior bölgede oluşan yüksek oklüzal kuvvetler, restorasyonun mekanik dayanıklılığını önemli bir faktör haline getirmektedir. Frezelenmiş monolitik zirkonyum kronlar, yüksek fleksürel dayanıklılık değerleri ile bu kuvvetlere karşı üstün performans göstermektedir (Johansson et al., 2014).

Klinik bir çalışmada, CAD/CAM teknolojisi ile üretilen posterior zirkonyum kronların 3 yıl sonraki sağ kalım oranı, veneerli zirkonya restorasyonlarda %100, monolitik zirkonya restorasyonlarda ise %90 olarak bildirilmiştir (Pontevedra et al., 2022). Bu kronların marjinal uyumları da klinik olarak kabul edilebilir sınırlar içerisindedir. Çalışmalar, marjinal açıklığın 85-133 μm arasında değiştiğini ve bu değerlerin klinik başarı için kritik eşik olan 120 μm'nin altında veya çok az üzerinde kaldığını raporlamıştır (Meirowitz et al., 2019).

Anterior bölgede estetik gereksinimlerin ön planda olduğu vakalarda, eksiltmeli üretim yöntemleri ile elde edilen lityum disilikat restorasyonlar üstün optik özellikler sunmaktadır. CAD/CAM ile frezelenmiş lityum disilikat kronlar ve laminate veneerler, doğal diş dokusuna benzer translüsensi, opalensans ve

floresans özellikleri göstermektedir. Klinik çalışmalar, lityum disilikat restorasyonların yıllar boyunca genel kümülatif sağkalım oranının %85,08 olduğunu göstermiştir (Abdulrahman et al., 2021).

Anterior bölgede eklemeli üretim teknolojilerinin kullanımı, özellikle diagnostik wax-up uygulamaları ve mock-up'ların replikasyonunda avantaj sağlamaktadır. 3 boyutlu baskı ile üretilen geçici restorasyonlar, minimal invaziv tedavi protokollerinde estetik ve fonksiyonel değerlendirme için kullanılabilen araçlardır. 3 boyutlu yazıcı teknolojileri ile üretilen anterior geçici kronların daha kısa işlem süresi gösterdiği bildirilmiştir (de Souza et al., 2024).

İmplant cerrahisinde kullanılan cerrahi kılavuzların üretiminde eklemeli üretim yöntemleri, eksiltmeli yöntemlere belirgin avantajlar sunmaktadır. 3 boyutlu baskı teknolojileri, karmaşık anatomik yapıların hassas replikasyonunu, maliyet etkin üretimi ve hızlı teslim süreçlerini mümkün kılmaktadır (Jeong et al., 2023).

Eklemeli ve eksiltmeli yöntemlerle üretilen cerrahi kılavuzların implant pozisyon doğruluğu açısından karşılaştırıldığı çalışmalar, 3 boyutlu yazıcıyla üretilen cerrahi kılavuzların, yüksek doğruluk, kolay üretim, eksiltmeli üretim tekniklerine kıyasla daha az atık ve laboratuvar süresinin azalması gibi avantajlarıyla, yönlendirilmiş implant cerrahisinde frezeleme yöntemiyle üretilen kılavuzlar kadar doğru olduğunu ve böylece maliyet etkinliğini artırdığını göstermiştir (Henprasert et al., 2020).

Oklüzal splintler, bruksizm ve temporomandibular eklem rahatsızlıklarının tedavisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu apareyler için hem eksiltmeli hem de eklemeli üretim yöntemleri klinik pratikte yer almaktadır. Karşılaştırmalı çalışmalar, 3 boyutlu basılmış, frezelenmiş ve konvansiyonel yöntemlerle üretilen splint materyallerinin mekanik ve fiziksel özelliklerinin değişkenlik gösterdiğini ve yaşlanma süreçlerinden etkilendiğini bildirmiştir.

Klinik uygulamalar için malzemelerin, belirli endikasyonlara göre seçilmesi önerilmiştir (Maleki et al., 2024).

Hibrit İş Akışları

Modern dental laboratuvarlar, giderek artan bir şekilde hibrit iş akışları benimsemektedir. Bu yaklaşımda, her iki teknolojinin güçlü yönlerinden faydalanılmaktadır. Örneğin, diagnostik wax-up ve geçici restorasyonlar eklemeli üretim ile üretilirken nihai restorasyonlar eksiltmeli üretim ile imal edilmektedir. İmplant destekli restorasyonlarda, cerrahi kılavuzlar ve geçici restorasyonlar 3 boyutlu baskı ile üretilirken nihai metal alt yapılar ve seramik üst yapılar frezeleme ile şekillendirilmektedir.

Sonuç

Diş hekimliğinde dijital üretim teknolojileri, geleneksel yöntemlere göre birçok avantaj sunmakta ve sürekli evrim geçirmektedir. Eksiltmeli üretim, yüksek mekanik özellikleri ve mükemmel marjinal uyumu ile sabit protetik restorasyonlarda altın standart olmaya devam etmektedir. Posterior bölgede yüksek mekanik dayanıklılık gerektiren restorasyonlar için eksiltmeli üretim tercih edilmektedir. Zirkonyum ve cam seramik restorasyonlar, frezeleme ile üretildiğinde uzun dönem klinik başarı göstermektedir. Bununla birlikte, materyal israfı, geometrik kısıtlamalar ve ekipman maliyeti gibi dezavantajları mevcuttur.

Eklemeli üretim, geometrik esneklik ve minimal materyal israfı avantajları sunmaktadır. Cerrahi rehberler, tanısal modeller, hareketli parsiyel protez metal iskeletleri ve geçici restorasyonlarda başarıyla uygulanmaktadır. Metal eklemeli üretim (SLM/DMLS), tam ark implant üstü restorasyonlarda köklü bir değişim oluşturmuştur.

Kaynakça

Abdulrahman, S., Von See Mahm, C., Talabani, R., & Abdulateef, D. (2021). Evaluation of the clinical success of four different types of lithium disilicate ceramic restorations: A retrospective study. *BMC Oral Health*, *21*(1), 625. https://doi.org/10.1186/s12903-021-01987-1

Ahmed, K. E. (2018). We're Going Digital: The Current State of CAD/CAM Dentistry in Prosthodontics. *Primary Dental Journal*, *7*(2), 30–35. https://doi.org/10.1177/205016841800700205

Al Jabbari, Y. S., Dimitriadis, K., Sufyan, A., & Zinelis, S. (2024). Microstructural and mechanical characterization of six Co-Cr alloys made by conventional casting and selective laser melting. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, *132*(3), 646.e1-646.e10. https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2024.06.015

Alammar, A., Kois, J. C., Revilla-León, M., & Att, W. (2022). Additive Manufacturing Technologies: Current Status and Future Perspectives. *Journal of Prosthodontics: Official Journal of the American College of Prosthodontists*, *31*(S1), 4–12. https://doi.org/10.1111/jopr.13477

Alharbi, N., Osman, R., & Wismeijer, D. (2016). Effects of build direction on the mechanical properties of 3D-printed complete coverage interim dental restorations. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, *115*(6), 760–767. https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2015.12.002

Alrashidy, M., Al Thubaiti, R. A., Alqahtani, N. H., Habash, A. K., & Alkhalil, R. A. (2025). Impact of Zirconia Coping Overlapped by Lithium Disilicate on Esthetic Outcome: A Systematic Review. *Cureus*, *17*(12), e100509. https://doi.org/10.7759/cureus.100509

Alt, V., Hannig, M., Wöstmann, B., & Balkenhol, M. (2011). Fracture strength of temporary fixed partial dentures: CAD/CAM versus directly fabricated restorations. *Dental Materials: Official*

Publication of the Academy of Dental Materials, *27*(4), 339–347. https://doi.org/10.1016/j.dental.2010.11.012

Asgar, K. (1988). Casting metals in dentistry: Past--present--future. *Advances in Dental Research*, *2*(1), 33–43. https://doi.org/10.1177/08959374880020011701

Barazanchi, A., Li, K. C., Al-Amleh, B., Lyons, K., & Waddell, J. N. (2017). Additive Technology: Update on Current Materials and Applications in Dentistry. *Journal of Prosthodontics: Official Journal of the American College of Prosthodontists*, *26*(2), 156–163. https://doi.org/10.1111/jopr.12510

Beuer, F., Schweiger, J., & Edelhoff, D. (2008). Digital dentistry: An overview of recent developments for CAD/CAM generated restorations. *British Dental Journal*, *204*(9), 505–511. https://doi.org/10.1038/sj.bdj.2008.350

Caussin, E., Moussally, C., Le Goff, S., Fasham, T., Troizier-Cheyne, M., Tapie, L., Dursun, E., Attal, J.-P., & François, P. (2024). Vat Photopolymerization 3D Printing in Dentistry: A Comprehensive Review of Actual Popular Technologies. *Materials*, *17*(4), 950. https://doi.org/10.3390/ma17040950

Cazón, A., Morer, P., & Matey, L. (2014). PolyJet technology for product prototyping: Tensile strength and surface roughness properties. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, *228*(12), 1664–1675. https://doi.org/10.1177/0954405413518515

Contrepois, M., Soenen, A., Bartala, M., & Laviole, O. (2013). Marginal adaptation of ceramic crowns: A systematic review. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, *110*(6), 447-454.e10. https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2013.08.003

Dawood, A., Marti Marti, B., Sauret-Jackson, V., & Darwood, A. (2015). 3D printing in dentistry. *British Dental Journal*, *219*(11), 521–529. https://doi.org/10.1038/sj.bdj.2015.914

de Souza, F. A., Blois, M. C., Collares, K., & Dos Santos, M. B. F. (2024). 3D-printed and conventional provisional single crown fabrication on anterior implants: A randomized clinical trial. *Dental Materials: Official Publication of the Academy of Dental Materials*, *40*(2), 340–347. https://doi.org/10.1016/j.dental.2023.12.004

Denry, I., & Kelly, J. R. (2008). State of the art of zirconia for dental applications. *Dental Materials: Official Publication of the Academy of Dental Materials*, *24*(3), 299–307. https://doi.org/10.1016/j.dental.2007.05.007

Fasbinder, D. J. (2010). Materials for chairside CAD/CAM restorations. *Compendium of Continuing Education in Dentistry*, *31*(9), 702–704, 706, 708–709.

Fasbinder, D. J., & Neiva, G. F. (2016). Surface Evaluation of Polishing Techniques for New Resilient CAD/CAM Restorative Materials. *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry: Official Publication of the American Academy of Esthetic Dentistry ... [et Al.]*, *28*(1), 56–66. https://doi.org/10.1111/jerd.12174

Fugolin, A. P. P., & Pfeifer, C. S. (2017). New Resins for Dental Composites. *Journal of Dental Research*, *96*(10), 1085–1091. https://doi.org/10.1177/0022034517720658

Galante, R., Figueiredo-Pina, C. G., & Serro, A. P. (2019). Additive manufacturing of ceramics for dental applications: A review. *Dental Materials*, *35*(6), 825–846. https://doi.org/10.1016/j.dental.2019.02.026

Henprasert, P., Dawson, D. V., El-Kerdani, T., Song, X., Couso-Queiruga, E., & Holloway, J. A. (2020). Comparison of the

Accuracy of Implant Position Using Surgical Guides Fabricated by Additive and Subtractive Techniques. *Journal of Prosthodontics: Official Journal of the American College of Prosthodontists*, *29*(6), 534–541. https://doi.org/10.1111/jopr.13161

Jang, T.-S., Kim, D., Han, G., Yoon, C.-B., & Jung, H.-D. (2020). Powder based additive manufacturing for biomedical application of titanium and its alloys: A review. *Biomedical Engineering Letters*, *10*(4), 505–516. https://doi.org/10.1007/s13534-020-00177-2

Jeong, M., Radomski, K., Lopez, D., Liu, J. T., Lee, J. D., & Lee, S. J. (2023). Materials and Applications of 3D Printing Technology in Dentistry: An Overview. *Dentistry Journal*, *12*(1), 1. https://doi.org/10.3390/dj12010001

Johansson, C., Kmet, G., Rivera, J., Larsson, C., & Vult Von Steyern, P. (2014). Fracture strength of monolithic all-ceramic crowns made of high translucent yttrium oxide-stabilized zirconium dioxide compared to porcelain-veneered crowns and lithium disilicate crowns. *Acta Odontologica Scandinavica*, *72*(2), 145–153. https://doi.org/10.3109/00016357.2013.822098

Kang, S., Zhuo, X., Kong, L., Li, Y., & He, Y. (2025). Machining characteristics and process parameter optimization of Near-dry electrical discharge milling of titanium alloy. *Scientific Reports*, *15*(1), 8139. https://doi.org/10.1038/s41598-025-92830-y

Kolakarnprasert, N., Kaizer, M. R., Kim, D. K., & Zhang, Y. (2019). New multi-layered zirconias: Composition, microstructure and translucency. *Dental Materials: Official Publication of the Academy of Dental Materials*, *35*(5), 797–806. https://doi.org/10.1016/j.dental.2019.02.017

Kwon, W.-C., & Park, M.-G. (2023). Evaluation of mechanical properties of dental zirconia in different milling conditions and

sintering temperatures. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, *130*(6), 909–916. https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2021.12.006

Lawson, N. C., Janyavula, S., Syklawer, S., McLaren, E. A., & Burgess, J. O. (2014). Wear of enamel opposing zirconia and lithium disilicate after adjustment, polishing and glazing. *Journal of Dentistry*, *42*(12), 1586–1591. https://doi.org/10.1016/j.jdent.2014.09.008

Luthardt, R. G., Holzhüter, M., Sandkuhl, O., Herold, V., Schnapp, J. D., Kuhlisch, E., & Walter, M. (2002). Reliability and properties of ground Y-TZP-zirconia ceramics. *Journal of Dental Research*, *81*(7), 487–491. https://doi.org/10.1177/154405910208100711

Maiti, N., Mahapatra, N., Patel, D., Chanchad, J., Saurabhbhai Shah, A., Mahboob Rahaman, S. K., & Surana, P. (2024). Application of CAD-CAM in Dentistry. *Bioinformation*, *20*(5), 547–550. https://doi.org/10.6026/973206300200547

Maleki, T., Meinen, J., Coldea, A., Reymus, M., Edelhoff, D., & Stawarczyk, B. (2024). Mechanical and physical properties of splint materials for oral appliances produced by additive, subtractive and conventional manufacturing. *Dental Materials: Official Publication of the Academy of Dental Materials*, *40*(8), 1171–1183. https://doi.org/10.1016/j.dental.2024.05.030

Mangano, F., Chambrone, L., van Noort, R., Miller, C., Hatton, P., & Mangano, C. (2014). Direct metal laser sintering titanium dental implants: A review of the current literature. *International Journal of Biomaterials*, *2014*, 461534. https://doi.org/10.1155/2014/461534

Mansour, F. K., Ibrahim, R. M., Mansour, H., & Hamdy, A. M. (2021). Assessment of internal fit and micro leakage of conventionally fabricated ceramometallic restoration versus CAD wax and press veneering (in-vitro study). *BDJ Open*, *7*(1), 17. https://doi.org/10.1038/s41405-021-00072-7

Meirowitz, A., Bitterman, Y., Levy, S., Mijiritsky, E., & Dolev, E. (2019). An in vitro evaluation of marginal fit zirconia crowns fabricated by a CAD-CAM dental laboratory and a milling center. *BMC Oral Health*, *19*(1), 103. https://doi.org/10.1186/s12903-019-0810-9

Miyazaki, T., & Hotta, Y. (2011). CAD/CAM systems available for the fabrication of crown and bridge restorations. *Australian Dental Journal*, *56 Suppl 1*, 97–106. https://doi.org/10.1111/j.1834-7819.2010.01300.x

Miyazaki, T., Hotta, Y., Kunii, J., Kuriyama, S., & Tamaki, Y. (2009). A review of dental CAD/CAM: Current status and future perspectives from 20 years of experience. *Dental Materials Journal*, *28*(1), 44–56. https://doi.org/10.4012/dmj.28.44

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. https://doi.org/10.1016/j.jpor.2015.10.001

Nakamura, K., Harada, A., Inagaki, R., Kanno, T., Niwano, Y., Milleding, P., & Örtengren, U. (2015). Fracture resistance of monolithic zirconia molar crowns with reduced thickness. *Acta Odontologica Scandinavica*, *73*(8), 602–608. https://doi.org/10.3109/00016357.2015.1007479

Örtorp, A., Jönsson, D., Mouhsen, A., & Vult von Steyern, P. (2011). The fit of cobalt-chromium three-unit fixed dental prostheses fabricated with four different techniques: A comparative in vitro study. *Dental Materials: Official Publication of the Academy of Dental Materials*, *27*(4), 356–363. https://doi.org/10.1016/j.dental.2010.11.015

Pilecco, R. O., Machry, R. V., Baldi, A., Tribst, J. P. M., Sarkis-Onofre, R., Valandro, L. F., Kleverlaan, C. J., Scotti, N., & Pereira,

G. K. R. (2024). Influence of CAD-CAM milling strategies on the outcome of indirect restorations: A scoping review. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, *131*(5), 811.e1-811.e10. https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2024.02.021

Pontevedra, P., Lopez-Suarez, C., Rodriguez, V., Pelaez, J., & Suarez, M. J. (2022). Randomized clinical trial comparing monolithic and veneered zirconia three-unit posterior fixed partial dentures in a complete digital flow: Three-year follow-up. *Clinical Oral Investigations*, *26*(6), 4327–4335. https://doi.org/10.1007/s00784-022-04396-y

Rekow, E. D. (2020). Digital dentistry: The new state of the art - Is it disruptive or destructive? *Dental Materials: Official Publication of the Academy of Dental Materials*, *36*(1), 9–24. https://doi.org/10.1016/j.dental.2019.08.103

Sing, S. L., An, J., Yeong, W. Y., & Wiria, F. E. (2016). Laser and electron-beam powder-bed additive manufacturing of metallic implants: A review on processes, materials and designs. *Journal of Orthopaedic Research: Official Publication of the Orthopaedic Research Society*, *34*(3), 369–385. https://doi.org/10.1002/jor.23075

Stansbury, J. W., & Idacavage, M. J. (2016). 3D printing with polymers: Challenges among expanding options and opportunities. *Dental Materials: Official Publication of the Academy of Dental Materials*, *32*(1), 54–64. https://doi.org/10.1016/j.dental.2015.09.018

Tuntiprawon, M., & Wilson, P. R. (1995). The effect of cement thickness on the fracture strength of all-ceramic crowns. *Australian Dental Journal*, *40*(1), 17–21. https://doi.org/10.1111/j.1834-7819.1995.tb05607.x

van Noort, R. (2012). The future of dental devices is digital. *Dental Materials: Official Publication of the Academy of Dental Materials*, *28*(1), 3–12. https://doi.org/10.1016/j.dental.2011.10.014

Weżgowiec, J., Małysa, A., Szlasa, W., Kulbacka, J., Chwiłkowska, A., Ziętek, M., & Więckiewicz, M. (2024). Biocompatibility of 3D-printed vs. Thermoformed and heat-cured intraoral appliances. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, *12*, 1453888. https://doi.org/10.3389/fbioe.2024.1453888

Yan, R., Luo, D., Huang, H., Li, R., Yu, N., Liu, C., Hu, M., & Rong, Q. (2018). Electron beam melting in the fabrication of three-dimensional mesh titanium mandibular prosthesis scaffold. *Scientific Reports*, *8*(1), 750. https://doi.org/10.1038/s41598-017-15564-6

Zaruba, M., & Mehl, A. (2017). Chairside systems: A current review. *International Journal of Computerized Dentistry*, *20*(2), 123–149.

Zohdi, N., & Yang, R. C. (2021). Material Anisotropy in Additively Manufactured Polymers and Polymer Composites: A Review. *Polymers*, *13*(19), 3368. https://doi.org/10.3390/polym13193368

BÖLÜM 3

DİŞ HEKİMLİĞİNDE CAD/CAM SİSTEMLERİ VE EKLEMELİ ÜRETİM

CANSU ERKAN[1]

Giriş

Bilgisayar destekli tasarım ve bilgisayar destekli üretim (computer-aided design/computer-aided manufacturing, CAD/CAM) sistemleri, diş hekimliğinde ölçü alma, restorasyon tasarımı ve üretim aşamalarını dijital bir iş akışı içinde birleştirmektedir (Spitznagel et al., 2018). Bu iş akışının etkinliği, elde edilen verilerin niteliğine ve aşamalar arasındaki uyuma bağlıdır.

CAD/CAM teknolojisinin temel prensipleri 1970'li yılların başlarında ortaya konmuş; Werner Mörmann ve Marco Brandestini'nin çalışmalarıyla diş hekimliğinde klinik uygulamaya aktarılmıştır. İlk CEREC restorasyonunun 1985 yılında üretilmesi, seramik restorasyonların tek seansta hazırlanabilmesi açısından önemli bir gelişme olmuştur (Mörmann, 2006). Dijital tasarım yazılımları ve üç boyutlu (3B) baskı teknolojileri ise restoratif ve

[1]Araştırma Görevlisi, Uşak Üniversitesi, Diş Hekimliği Fakültesi, Protetik Diş Tedavisi Bölümü, ORCID: 0009-0005-3377-6395

protetik tedavilerdeki üretim seçeneklerini genişletmiştir (Mangano, 2021).

Bu bölümde, diş hekimliğinde CAD/CAM iş akışı ve üretim yöntemleri ele alınmaktadır. Fotopolimerizasyon temelli 3B baskı teknolojileri, üretim sonrası işlemler ve üretim kalitesini etkileyen parametreler bu çerçevede değerlendirilmektedir.

CAD/CAM Sistemlerinin Avantajları ve Sınırlılıkları

CAD/CAM sistemleri, uygun endikasyonlarda tedavi süresini ve seans sayısını azaltarak restorasyonların tek seansta tamamlanmasına olanak tanıyabilmektedir. Dijital ölçü yöntemleri, konvansiyonel ölçülerin taşınması ve işlenmesi sırasında ortaya çıkabilecek çapraz kontaminasyon riskini de azaltabilmektedir (Davidowitz & Kotick, 2011). Bununla birlikte, dijital iş akışında da enfeksiyon kontrolü ilkelerine uyulması gerekmektedir.

Dijital tasarım ve üretim süreçleri, hastaya özgü restorasyonların standartlaştırılmış bir iş akışı içinde hazırlanmasını desteklemektedir (Spitznagel et al., 2018).

Cihaz, yazılım, bakım ve eğitim giderleri ile sistemlerin kullanımına ilişkin teknik bilgi ve deneyim gereksinimi, CAD/CAM uygulamalarının başlıca sınırlılıklarını oluşturmaktadır (Joda & Brägger, 2015).

CAD/CAM Sistemlerinde Dijital İş Akışı

Verilerin Elde Edilmesi

Dijital veriler, ağız içi yapıların intraoral tarayıcılarla doğrudan taranması ya da konvansiyonel ölçü ve modellerin ekstraoral tarayıcılarla sayısallaştırılması yoluyla elde edilmektedir (Samra et al., 2016).

Optik taramayla elde edilen yüzey verileri, kullanılan cihaz ve yazılımın özelliklerine bağlı olarak STL, OBJ veya PLY gibi dosya formatlarında aktarılabilmektedir (Richert et al., 2017).

İntraoral ve Ekstraoral Tarayıcılar

İntraoral tarayıcılar, dişler ve çevre dokulardan elde edilen optik verileri yazılım algoritmaları aracılığıyla işleyerek üç boyutlu yüzey modelleri oluşturmaktadır (Mangano, 2021; Richert et al., 2017). Tarama görüntülerinin birleştirilmesi ve hizalanması süreci, uygulanan tarama stratejisinden ve operatörün deneyiminden etkilenmektedir (Giménez et al., 2015).

Dijital ölçü yöntemleri, ölçü materyali ve fiziksel model gereksinimini azaltmaktadır. Bununla birlikte subgingival marjinlerin ve uzun dişsiz alanların taranmasındaki güçlükler, yüksek maliyet ve operatör deneyimine bağımlılık bu yöntemlerin kullanımını sınırlandırabilmektedir (Richert et al., 2017).

Ağız içinden doğrudan veri elde eden intraoral tarayıcılardan farklı olarak ekstraoral tarayıcılar, konvansiyonel ölçülerin veya bu ölçülerden elde edilen modellerin laboratuvar ortamında dijitalleştirilmesini sağlamaktadır. Veri elde etme prensibine göre kontakt sistemlerde mekanik temastan, nonkontakt sistemlerde ise optik yöntemlerden yararlanılmaktadır (Ural & Kaleli, 2021).

Bilgisayar Destekli Tasarım

Bilgisayar destekli tasarım aşamasında, tarama verileri kullanılarak restorasyonun geometrisi oluşturulmaktadır. Yazılımdaki hazır tasarımlar hastaya özgü olarak düzenlenebilmekte ve restorasyon farklı açılardan incelenebilmektedir (Samra et al., 2016).

Tamamlanan tasarım, üretim yazılımıyla uyumlu bir dosya formatında kaydedilmektedir. Yaygın olarak kullanılan STL formatı, yüzey geometrisini üçgenlerden oluşan bir ağ yapısıyla temsil

etmektedir. Verilerin üretim aşamasına aktarılmasında dosya bütünlüğünün ve yazılım uyumluluğunun korunması önem taşımaktadır (Samra et al., 2016).

Bilgisayar Destekli Üretim

Bilgisayar destekli üretim, dijital ortamda hazırlanan tasarımın fiziksel bir yapıya dönüştürülmesi aşamasıdır. Diş hekimliğinde kullanılan CAM yöntemleri, materyalin işlenme biçimine göre eksiltmeli ve eklemeli üretim olmak üzere iki temel grupta incelenmektedir (Miyazaki et al., 2009).

Eksiltmeli Üretim

Eksiltmeli üretimde prefabrik blok veya diskler, bilgisayar sayısal kontrol (computer numerical control, CNC) prensibiyle çalışan üç, dört ya da beş eksenli frezeleme sistemlerinde işlenmektedir (Shenoy & Prabhu, 2015). Frezeleme, materyal ve cihaz özelliklerine göre kuru veya ıslak olarak gerçekleştirilebilmektedir. Islak frezelemede işlem sırasında oluşan ısı soğutma yoluyla kontrol edilmektedir (Beuer et al., 2008).

Eksiltmeli yöntemler yüksek doğrulukta üretime olanak tanımakla birlikte, bloktan materyal uzaklaştırılması malzeme kaybına neden olmaktadır. Frezlerin aşınması ve düzenli olarak değiştirilme gereksinimi de üretim maliyetini artırabilmektedir (Alghazzawi, 2016; Reymus et al., 2020). Bu sınırlılıklar, diş hekimliğinde eklemeli üretim yöntemlerine yönelik ilginin artmasında etkili olmuştur (Van Noort, 2012).

Eklemeli Üretim

Eklemeli üretim veya 3B baskı, dijital tasarımın materyalin katmanlar hâlinde biriktirilmesi yoluyla fiziksel bir yapıya dönüştürüldüğü üretim yöntemidir (Van Noort, 2012). Katmanlı üretim prensibi, karmaşık geometrilere sahip yapıların hazırlanmasını kolaylaştırmaktadır (Revilla-León & Özcan, 2019).

Eklemeli üretim, stereolitografinin geliştirilmesiyle yaygınlaşmış ve farklı baskı teknikleriyle daha geniş kullanım alanına ulaşmıştır. Bu yöntemler diş hekimliğinde modellerin ve cerrahi rehberlerin yanı sıra ortodontik apareyler, geçici restorasyonlar ve çeşitli protetik yapıların üretiminde kullanılmaktadır (Dawood et al., 2015).

Eklemeli üretim süreci, dijital tasarımın baskıya hazırlanmasıyla başlamaktadır. Bu aşamada baskı yönü belirlenmekte, gerekli destek yapıları oluşturulmakta ve tasarım dilimleme yazılımıyla katmanlara ayrılmaktadır. Baskının ardından kullanılan yöntem ve materyale uygun üretim sonrası işlemler uygulanmaktadır (Chaudhary et al., 2023).

Materyal kaybının azaltılması ve geometrik tasarım özgürlüğü, eklemeli üretimin başlıca avantajları arasında yer almaktadır. Farklı yazıcı seçeneklerinin ve üretim olanaklarının bulunması, yöntemin kullanım alanının genişlemesini desteklemektedir (Berman, 2012).

Eklemeli üretimde, destek yapılarının uzaklaştırılması ve bu yapıların temas ettiği yüzeylerin düzeltilmesi ilave işlemler gerektirebilmektedir (Jiang et al., 2018). Bu nedenle baskı parametreleri ve üretim sonrası işlemler birlikte değerlendirilmelidir (Revilla-León & Özcan, 2019).

Eklemeli Üretim Yöntemlerinin Sınıflandırılması

Eklemeli üretim teknolojileri; hazne fotopolimerizasyonu, malzeme püskürtme, bağlayıcı püskürtme, malzeme ekstrüzyonu, toz yatağı füzyonu, levha laminasyonu ve yönlendirilmiş enerji biriktirme olmak üzere yedi temel kategori altında ele alınmaktadır (ASTM International, 2012). Bu sınıflandırma, kullanılan cihaz adlarından çok materyalin biriktirilme ve birleştirilme prensibini esas almaktadır.

SLA, DLP ve LCD hazne fotopolimerizasyonu; PolyJet ve MultiJet malzeme püskürtme; FDM ve doğrudan mürekkep yazımı (direct ink writing, DIW) ise malzeme ekstrüzyonu grubunda yer almaktadır. SLS, SLM ve elektron ışınıyla eritme yöntemleri, toz yatağı füzyonu prensibine dayanmaktadır. Uygun yöntemin seçiminde, üretilecek yapının kullanım amacı ve materyalin özellikleri dikkate alınmalıdır (Dawood et al., 2015; Revilla-León & Özcan, 2019). Bu sınıflandırma doğrultusunda, aşağıda farklı üretim prensiplerine sahip yöntemlerin temel özellikleri açıklanmaktadır.

Erimiş Biriktirme Modelleme

Erimiş biriktirme modelleme (fused deposition modeling, FDM) yönteminde, termoplastik filament ısıtılmış bir uçtan ekstrüde edilerek katmanlar hâlinde biriktirilmektedir. Ardışık katmanların birbirine bağlanmasıyla üç boyutlu yapı elde edilmektedir (Sürmen, 2019). Cihaz ve üretim maliyetlerinin görece düşük olması, yöntemin başlıca avantajlarından biridir (Sürmen, 2019).

FDM ile üretilen yapılarda yüzey basamaklanması nedeniyle ek bitim işlemlerine ihtiyaç duyulabilmektedir. Ayrıca büyük veya karmaşık geometrilere sahip yapıların üretim süresi uzayabilmektedir (Sürmen, 2019).

Seçici Lazer Sinterleme ve Seçici Lazer Eritme

Seçici lazer sinterleme (selective laser sintering, SLS), katmanlar hâlinde serilen toz materyalin dijital kesite karşılık gelen bölgelerinde lazer enerjisiyle birleştirilmesi prensibine dayanmaktadır (Prabhakar et al., 2021).

Seçici lazer eritme (selective laser melting, SLM) yönteminde, toz materyal lazer enerjisiyle tamamen eritilerek yoğun metal yapılar elde edilmektedir. Üretilen yapının nihai özellikleri, kullanılan alaşıma ve işlem parametrelerine bağlı olarak değişmektedir (Goguta et al., 2021).

Stereolitografi

Charles Hull'un çalışmalarıyla geliştirilen stereolitografi (stereolithography, SLA), sıvı fotopolimer reçinenin lazer ışınıyla seçici olarak polimerize edilmesine dayanmaktadır. Bu işlem ardışık katmanlar boyunca tekrarlanarak üç boyutlu yapı oluşturulmaktadır (Abduo et al., 2014).

SLA'nın üretim hızı, maliyeti ve kapasitesi değerlendirilirken kullanılan cihazın ve materyalin özellikleri göz önünde bulundurulmalıdır (Methani et al., 2020).

Sıvı Kristal Ekran Tabanlı Baskı

Sıvı kristal ekran (liquid crystal display, LCD) tabanlı sistemlerde ekran, ışığın reçineye geçişini kontrol ederek ilgili katmanın seçici olarak polimerize edilmesini sağlamaktadır. Bu sistemlerin üretim performansı, optik sistemin ve kullanılan reçinenin özelliklerine bağlıdır (Quan et al., 2020).

Dijital Işık İşleme

Dijital ışık işleme (digital light processing, DLP) sistemlerinde katman görüntüsü, dijital mikroayna cihazı (digital micromirror device, DMD) aracılığıyla reçine yüzeyine yansıtılmaktadır. Mikroaynaların hızlı hareketi ve tüm katmanın aynı anda ışıklandırılması, üretim süresinin kısalmasına katkı sağlamaktadır (Chaudhary et al., 2023).

Fotopolimerizasyon Temelli Üretimde Üretim Sonrası İşlemler

Üretim sonrası işlemler, basılan yapıların hedeflenen fiziksel, mekanik ve estetik özelliklere ulaşmasında önemli rol oynamaktadır. Uygulanacak işlemler, baskı teknolojisine ve kullanılan materyale göre değişmektedir (Reymus et al., 2020). Fotopolimerizasyon temelli üretimde bu süreç; yıkama, kurutma, son kürleme, destek yapılarının uzaklaştırılması, bitim ve polisaj aşamalarını

kapsamaktadır. İşlemlerin sırası, materyale özgü üretici protokolüne göre belirlenmelidir (Luo et al., 2024).

Yıkama ve Yüzey Temizliği

Yıkama, baskı sonrasında yüzeyde kalan polimerize olmamış reçinenin uygun bir çözücüyle uzaklaştırılması amacıyla uygulanmaktadır. Gerektiğinde ultrasonik aktivasyondan da yararlanılmaktadır. Bu işlem, yüzey özelliklerinin yanı sıra artık monomerlerle ilişkili olası sitotoksik ve alerjik etkiler açısından önem taşımaktadır (Finck et al., 2024).

Yıkama protokolü, üretilen yapının doğruluğunu ve fiziksel özelliklerini etkileyebilmektedir (Lambart et al., 2022). Literatürde izopropil alkol (IPA) ve ultrasonik yıkamadan yararlanılan farklı protokoller bildirilmiştir (Lambart et al., 2022). Ancak çözücü türü ve işlem süresi tüm reçinelere genellenmemeli; yıkama ve kurutma aşamalarında materyale özgü üretici talimatları izlenmelidir.

Son Kürleme

Son kürleme, baskı sırasında polimerizasyonu tamamlanmamış monomerlerin dönüşümünü artırmak amacıyla uygulanmaktadır. Yıkama ve kurutmayı izleyen bu işlem, uygun koşullarda materyalin mekanik ve optik özelliklerini iyileştirebilmektedir (Luo et al., 2024; Reymus & Stawarczyk, 2021).

Son kürlemenin etkinliği; ışığın dalga boyu ve yoğunluğu, uygulama süresi, sıcaklık, cihaz özellikleri ve işlem ortamına bağlı olarak değişmektedir (Luo et al., 2024).

Son kürleme, mekanik özelliklerin geliştirilmesine katkı sağlamakla birlikte boyutsal değişimlere de neden olabilmektedir. Bu nedenle işlem koşulları, üretim doğruluğu açısından da değerlendirilmelidir (Kim et al., 2020). Işığa maruz kalma süresinin veya ışık yoğunluğunun artırılması, her durumda daha iyi sonuç

alınacağı anlamına gelmemektedir. Reçine ile kürleme cihazının uyumlu olması ve materyale özgü protokolün uygulanması önem taşımaktadır (Reymus & Stawarczyk, 2021).

Üç Boyutlu Baskıda Üretim Kalitesini Etkileyen Faktörler

Üretim kalitesi; dijital tasarımın, baskı açısının, katman kalınlığının, çözünürlüğün ve üretim sonrası işlemlerin birlikte etkisiyle şekillenmektedir (Rubayo et al., 2021; Scherer et al., 2023). Bu nedenle üretim protokolü, yapının geometrisine ve kullanım amacına uygun olarak düzenlenmelidir.

Baskı Açısı

Baskı açısı, üretilecek yapının baskı platformuna göre yönelimini ifade etmektedir. Bu yönelim, katmanların ve destek yapılarının yerleşimini değiştirerek üretim doğruluğunu, yüzey özelliklerini ve baskı süresini etkileyebilmektedir (Jang et al., 2024).

Baskı açısı, destek yapılarının sayısını ve konumunu da belirlemektedir. Özellikle marjinlerde veya iç yüzeylerde bulunan desteklerin uzaklaştırılması, bu bölgelerin bütünlüğünü etkileyebilmektedir. Uygun yönelimin seçilmesi, destek gereksiniminin ve üretim süresinin azaltılmasına katkı sağlayabilmektedir (Rubayo et al., 2021). Bununla birlikte, tüm restorasyon türleri için geçerli tek bir ideal baskı açısı bulunmadığından sonuçlar, kullanılan yazıcı, materyal ve restorasyon geometrisiyle birlikte değerlendirilmelidir.

Katman Kalınlığı

Katman kalınlığı, her katmanın Z eksenindeki yüksekliğini ifade etmektedir. Ayarlanabilir bir üretim parametresi olan katman kalınlığı, dental yapıların yüzey kalitesini, boyutsal doğruluğunu, uyumunu ve mekanik özelliklerini etkileyebilmektedir (Scherer et al., 2023).

Katman kalınlığının azaltılması, özellikle eğimli yüzeylerde basamaklanmanın azalmasına yardımcı olabilmektedir. Ancak aynı yapının daha fazla katmanla oluşturulması, toplam üretim süresini uzatmaktadır (You et al., 2021). Daha ince katmanların kullanılması, tek başına daha yüksek doğruluk sağlandığı anlamına gelmemektedir. Uygun katman kalınlığı, cihazın özellikleri, reçinenin davranışı ve parçanın geometrisi dikkate alınarak belirlenmelidir (You et al., 2021).

Baskı Çözünürlüğü

Baskı çözünürlüğü, yazıcının üretebildiği detay düzeyini tanımlamaktadır. X–Y düzlemindeki çözünürlük DLP ve LCD sistemlerinde piksel boyutuna, lazer tabanlı sistemlerde ise lazer noktasının boyutuna ve tarama özelliklerine bağlıdır. Z eksenindeki çözünürlük, katman kalınlığıyla ilişkilidir (Nulty, 2022).

Çözünürlük ve doğruluk, birbiriyle ilişkili ancak farklı kavramlardır. Küçük piksel boyutu ve ince katmanlar daha ayrıntılı üretim sağlayabilse de ışık dağılımı, materyalin polimerizasyon özellikleri ve üretim koşulları boyutsal uyumu etkileyebilmektedir. Kalın katmanlar, özellikle kavisli yüzeylerde merdiven basamağı etkisini artırırken ince katmanlar daha fazla üretim döngüsü gerektirmektedir (You et al., 2021). Bu nedenle yazıcının çözünürlük değeri, restorasyonun üretim doğruluğunu tek başına belirlememektedir.

Sonuç

CAD/CAM sistemleri dijital ölçü, tasarım ve üretim aşamalarını bütünleştirerek diş hekimliğinde restorasyonların hazırlanmasına katkı sağlamaktadır. Eksiltmeli yöntemler hassas işlemeye, eklemeli yöntemler ise karmaşık geometrilerin daha az materyal kaybıyla üretilmesine olanak tanımaktadır. Bu yöntemlerden elde edilen sonuçlar, iş akışının uygun biçimde planlanmasına bağlıdır.

Fotopolimerizasyon temelli baskıda üretim kalitesi, baskı parametreleri ile üretim sonrası işlemlerin birlikte değerlendirilmesini gerektirmektedir. Yapının geometrisine, materyaline ve kullanım amacına uygun, doğrulanmış protokollerin uygulanması; boyutsal doğruluğun ve mekanik özelliklerin korunması açısından önem taşımaktadır.

Kaynakça/References

Abduo, J., Lyons, K., & Bennamoun, M. (2014). Trends in computer -aided manufacturing in prosthodontics: A review of the available streams. *International Journal of Dentistry*, *2014*(1), 783948. https://doi.org/10.1155/2014/783948

Alghazzawi, T. F. (2016). Advancements in CAD/CAM technology: Options for practical implementation. *Journal of Prosthodontic Research*, *60*(2), 72-84. https://doi.org/10.1016/j.jpor.2016.01.003

ASTM International. (2012). *Standard terminology for additive manufacturing technologies (ASTM Standard No. F2792-12a)*. https://doi.org/10.1520/F2792-12A

Berman, B. (2012). 3-D printing: The new industrial revolution. *Business Horizons*, *55*(2), 155-162. https://doi.org/10.1016/j.bushor.2011.11.003

Beuer, F., Schweiger, J., & Edelhoff, D. (2008). Digital dentistry: An overview of recent developments for CAD/CAM generated restorations. *British Dental Journal*, *204*(9), 505-511. https://doi.org/10.1038/sj.bdj.2008.350

Chaudhary, R., Fabbri, P., Leoni, E., Mazzanti, F., Akbari, R., & Antonini, C. (2023). Additive manufacturing by digital light processing: A review. *Progress in Additive Manufacturing*, *8*(2), 331-351. https://doi.org/10.1007/s40964-022-00336-0

Davidowitz, G., & Kotick, P. G. (2011). The use of CAD/CAM in dentistry. *Dental Clinics of North America*, *55*(3), 559-570. https://doi.org/10.1016/j.cden.2011.02.011

Dawood, A., Marti Marti, B., Sauret-Jackson, V., & Darwood, A. (2015). 3D printing in dentistry. *British Dental Journal*, *219*(11), 521-529. https://doi.org/10.1038/sj.bdj.2015.914

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

Giménez, B., Özcan, M., Martínez-Rus, F., & Pradíes, G. (2015). Accuracy of a digital impression system based on active wavefront sampling technology for implants considering operator experience, implant angulation, and depth. *Clinical Implant Dentistry and Related Research*, *17*, e54-e64. https://doi.org/10.1111/cid.12124

Goguta, L., Lungeanu, D., Negru, R., Birdeanu, M., Jivanescu, A., & Sinescu, C. (2021). Selective laser sintering versus selective laser melting and computer aided design–computer aided manufacturing in double crowns retention. *Journal of Prosthodontic Research*, *65*(3), 371-378. https://doi.org/10.2186/jpr.jpor_2019_556

Jang, G., Kim, S.-K., Heo, S.-J., & Koak, J.-Y. (2024). Fit analysis of stereolithography-manufactured three-unit resin prosthesis with different 3D-printing build orientations and layer thicknesses. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, *131*(2), 301-312. https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2021.11.031

Jiang, J., Xu, X., & Stringer, J. (2018). Support structures for additive manufacturing: A review. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, *2*(4), 64. https://doi.org/10.3390/jmmp2040064

Joda, T., & Brägger, U. (2015). Digital vs. conventional implant prosthetic workflows: A cost/time analysis. *Clinical Oral Implants Research*, *26*(12), 1430-1435. https://doi.org/10.1111/clr.12476

Kim, D., Shim, J.-S., Lee, D., Shin, S.-H., Nam, N.-E., Park, K.-H., Shim, J.-S., & Kim, J.-E. (2020). Effects of post-curing time on the mechanical and color properties of three-dimensional printed crown and bridge materials. *Polymers*, *12*(11), 2762. https://doi.org/10.3390/polym12112762

Lambart, A.-L., Xepapadeas, A. B., Koos, B., Li, P., & Spintzyk, S. (2022). Rinsing postprocessing procedure of a 3D-printed orthodontic appliance material: Impact of alternative post-rinsing solutions on the roughness, flexural strength and cytotoxicity. *Dental Materials*, *38*(8), 1344-1353. https://doi.org/10.1016/j.dental.2022.06.010

Luo, K., Liu, Q., Alhotan, A., Dai, J., Li, A., Xu, S., & Li, P. (2024). Effect of post-curing conditions on surface characteristics, physico–mechanical properties, and cytotoxicity of a 3D-printed denture base polymer. *Dental Materials*, *40*(3), 500-507. https://doi.org/10.1016/j.dental.2023.12.017

Mangano, F. (2021). Digital dentistry. *Journal of Dentistry*, *109*, 103693. https://doi.org/10.1016/j.jdent.2021.103693

Methani, M. M., Revilla-León, M., & Zandinejad, A. (2020). The potential of additive manufacturing technologies and their processing parameters for the fabrication of all-ceramic crowns: A review. *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry*, *32*(2), 182-192. https://doi.org/10.1111/jerd.12535

Miyazaki, T., Hotta, Y., Kunii, J., Kuriyama, S., & Tamaki, Y. (2009). A review of dental CAD/CAM: Current status and future perspectives from 20 years of experience. *Dental Materials Journal*, *28*(1), 44-56. https://doi.org/10.4012/dmj.28.44

Mörmann, W. H. (2006). The evolution of the CEREC system. *The Journal of the American Dental Association*, *137*, 7S-13S. https://doi.org/10.14219/jada.archive.2006.0398

Nulty, A. (2022). A comparison of trueness and precision of 12 3D printers used in dentistry. *BDJ Open*, *8*(1), 14. https://doi.org/10.1038/s41405-022-00108-6

Prabhakar, M. M., Saravanan, A. K., Lenin, A. H., Leno, I. J., Mayandi, K., & Ramalingam, P. S. (2021). A short review on 3D printing methods, process parameters and materials. *Materials Today: Proceedings*, *45*, 6108-6114. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.225

Quan, H., Zhang, T., Xu, H., Luo, S., Nie, J., & Zhu, X. (2020). Photo-curing 3D printing technique and its challenges. *Bioactive Materials*, *5*(1), 110-115. https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2019.12.003

Revilla-León, M., & Özcan, M. (2019). Additive manufacturing technologies used for processing polymers: Current status and potential application in prosthetic dentistry. *Journal of Prosthodontics*, *28*(2), 146-158. https://doi.org/10.1111/jopr.12801

Reymus, M., Fabritius, R., Keßler, A., Hickel, R., Edelhoff, D., & Stawarczyk, B. (2020). Fracture load of 3D-printed fixed dental prostheses compared with milled and conventionally fabricated ones: The impact of resin material, build direction, post-curing, and artificial aging—an in vitro study. *Clinical Oral Investigations*, *24*(2), 701-710. https://doi.org/10.1007/s00784-019-02952-7

Reymus, M., & Stawarczyk, B. (2021). In vitro study on the influence of postpolymerization and aging on the Martens parameters of 3D-printed occlusal devices. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, *125*(5), 817-823. https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2019.12.026

Richert, R., Goujat, A., Venet, L., Viguie, G., Viennot, S., Robinson, P., Farges, J.-C., Fages, M., & Ducret, M. (2017). Intraoral scanner technologies: A review to make a successful impression. *Journal of Healthcare Engineering*, *2017*(1), 8427595. https://doi.org/10.1155/2017/8427595

Rubayo, D. D., Phasuk, K., Vickery, J. M., Morton, D., & Lin, W.-S. (2021). Influences of build angle on the accuracy, printing time, and material consumption of additively manufactured surgical templates. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, *126*(5), 658-663. https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2020.09.012

Samra, A. P. B., Morais, E., Mazur, R. F., Vieira, S. R., & Rached, R. N. (2016). CAD/CAM in dentistry–a critical review. *Revista Odonto Ciência*, *31*(3), 140-144. https://doi.org/10.15448/1980-6523.2016.3.21002

Scherer, M., Al-Haj Husain, N., Barmak, A. B., Kois, J. C., Özcan, M., & Revilla-León, M. (2023). Influence of the layer thickness on the flexural strength of aged and nonaged additively manufactured interim dental material. *Journal of Prosthodontics*, *32*(S1), 68-73. https://doi.org/10.1111/jopr.13582

Shenoy, V. K., & Prabhu, M. B. (2015). Computer-aided design/computer-aided manufacturing in dentistry–Future is present. *Journal of Interdisciplinary Dentistry, 5*(2), 60-64. https://doi.org/10.4103/2229-5194.173229

Spitznagel, F. A., Boldt, J., & Gierthmuehlen, P. C. (2018). CAD/CAM ceramic restorative materials for natural teeth. *Journal of Dental Research*, *97*(10), 1082-1091. https://doi.org/10.1177/0022034518779759

Sürmen, H. K. (2019). Eklemeli imalat (3B baskı): Teknolojiler ve uygulamalar. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, *24*(2), 373-392. https://doi.org/10.17482/uumfd.519147

Ural, Ç., & Kaleli, N. (2021). Direct digitalization devices in today's dental practice: Lab scanners. *Journal of Experimental and Clinical Medicine*, *38*(3s), 143-147. https://doi.org/10.52142/omujecm.38.si.dent.11

Van Noort, R. (2012). The future of dental devices is digital. *Dental Materials*, *28*(1), 3-12. https://doi.org/10.1016/j.dental.2011.10.014

You, S.-M., You, S.-G., Kang, S.-Y., Bae, S.-Y., & Kim, J.-H. (2021). Evaluation of the accuracy (trueness and precision) of a maxillary trial denture according to the layer thickness: An in vitro study. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, *125*(1), 139-145. https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2019.12.014

BÖLÜM 4

3 BOYUTLU YAZICI İLE ÜRETİLEN REZİNLERDE OKSİJEN İNHİBİSYONU VE AZOT DESTEKLİ KÜRLEME

Merve SOYDAN[1]

Giriş

Eklemeli üretim, elde edilen 3 boyutlu (3B) model üzerinde STL formatında oluşturulan tasarımın, baskı hazırlıkları sonrası üretiminin gerçekleştirilmesinin ardından, son kürleme (postpolimerizasyon) işlemlerine tabii tutulup üretilen protezin kullanıma hazır hale gelmesi ile tamamlanır (Revilla-León et al., 2019). Üç boyutlu yazıcı ile üretilen restoratif materyaller genellikle 385 nm dalga boyuna sahip bir ışık kaynağı ile polimerize edilerek üretilir. Fakat elde edilen ürünlerin yeterli biyouyumluluğa ve klinik dayanıklılığa ulaşabilmesi, baskı sonrası ek bir polimerizasyon süreci ile sağlanır (Stansbury et al., 2016).

Üretimin ardından uygulanan postpolimerizasyon, materyalin nihai özelliklerine ulaşmasına katkı sağlar. Postpolimerizasyon işlemi, üretimi yapılan materyallerin kimyasal stabilitesini ve mekanik özelliklerini artırırken, renk değişimini ve biyouyumluluğu da etkilediği gösterilmiştir (Zguris et al., 2025; Bayarsaikhan et al., 2021).

[1] Uzm. Dt., Hatay Mustafa Kemal Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi, Protetik Diş Tedavisi, Orcid: 0009-0008-1783-6214

Son polimerizasyonun etkinliği, uygulama süresi yanında ışık kaynağına, sıcaklığa ve rezin formülasyonuna bağlıdır. Aynı materyalin farklı cihazlarla işlenmesi, dönüşüm derecesi, sertlik ve renklenme bakımından farklı sonuçlar verebilir (Aktug Karademir et al., 2025). Son yıllarda geliştirilen kürleme cihazları, ortamın oksijen konsantrasyonunu düşürme amacıyla kürleme odasını azot gazı ile doldurarak son kürleme işlemini gerçekleştirmektedir. Azot bakımından zengin bir ortamda yapılan son kürleme işleminin, materyalin mekanik özelliklerinde ve yüzey özelliklerinde iyileşmelere yol açtığı bildirilmektedir (Lim et al., 2024).

Bu konudaki kanıtların büyük bölümü, farklı materyal ve deney koşullarını içeren in vitro çalışmalara dayanmaktadır (Rajasekaran et al., 2025). Bölümde bu bulguların protetik uygulamalar açısından taşıdığı anlam ve klinik yorumlarının sınırları değerlendirilmektedir.

Son Kürleme Protokolü

Eklemeli imalat süreci, geleneksel yöntemle elde edilen modelin 3 boyutlu olarak taranması veya direkt olarak dijital yöntemlerle model elde edilmesiyle başlar. Daha sonra elde edilen model üzerinde üretilecek nesne CAD yazılımında tasarlanır. Tasarlanan modelin destek yapıları hazırlanır ve model katmanları oluşturmak için dilimlenir. Dilimlenmiş veriler 3 boyutlu yazıcıya gönderilir ve baskı materyali katman üzerine katman gelecek şekilde üretimi gerçekleştirilir. Son olarak destek yapılar uzaklaştırılıp yıkama ve kurutma aşamaları tamamlandıktan sonra Polimerizasyon sürecini tamamlamak amacıyla ek ışık uygulanması gerçekleştirilir (Kessler et al., 2020).

Son kürleme, artık monomerlerin dönüşümünü ve polimer ağındaki çapraz bağlanmayı artırmak amacıyla ultraviyole ışık sağlayan bir polimerizasyon cihazında uygulanır (Taormina et al., 2018). Işıkla polimerizasyonun temelini oluşturan serbest radikal reaksiyonları, visköz materyalin katı bir polimer yapıya dönüşmesini sağlar. Bu süreçte metakrilat monomerlerindeki alifatik C=C çift bağları açılır ve monomerler arasında C–C kovalent bağları oluşarak polimer zincirleri

gelişir (Pianelli et al., 1999). Reaksiyona katılan çift bağların oranı, dönüşüm derecesi (DC) ile ifade edilir. Dönüşüm derecesinin yükselmesi, genellikle artık monomer miktarının azalması ve materyalin mekanik özellikleri ile biyouyumluluğunun iyileşmesiyle ilişkilidir (Bayarsaikhan et al., 2021).

Polimerizasyonun derinliği kürleme cihazının sahip olduğu ışık çıkışına, ışığın dalga boyu aralığına, polimerizasyon süresine ve kullanılan reçinenin içeriğine bağlı olarak değişebilmektedir (Alrahlah et al., 2014). Üç boyutlu yazıcıyla üretilen materyallerin fiziksel ve mekanik özellikleri, polimerizasyon sıcaklığının uygun düzeyde artırılması, polimerizasyon süresinin uzatılması ve daha yüksek dalga boylarında ultraviyole spektrumu kullanılmasıyla önemli ölçüde iyileştirilebilir (Luo et al., 2024; Peskersoy, C, & Oguzhan, A., 2024). Aati ve arkadaşlarının (Aati et al., 2022) incelediği üç boyutlu yazıcı ile üretilen protez kaide rezininde, son polimerizasyon süresinin 20 dakikaya kadar artırılması mekanik özelliklerde iyileşme sağlamıştır. Yirmi dakika işlem uygulanan örnekler ile ısıyla polimerize edilen kontrol materyali arasında eğilme dayanımı, eğilme modülü, yüzey sertliği ve dönüşüm derecesi bakımından anlamlı fark saptanmamıştır.

Bununla birlikte, işlem süresinin uzatılması her özellikte sürekli bir iyileşme sağlamamaktadır. Bayarsaikhan ve arkadaşlarının (Bayarsaikhan et al., 2021) çalışmasında, süreye ilişkin genel analizde 60 dakikadan sonraki uygulamalar eğilme dayanımında anlamlı bir ek artış oluşturmamıştır. Katheng ve arkadaşları (Katheng et al., 2021) ise 15 ve 30 dakikalık son polimerizasyon uygulamalarını farklı sıcaklıklarda karşılaştırmış; boyutsal doğruluk ve doku yüzeyi uyumu üzerinde sıcaklığın süreden daha belirleyici olduğunu bildirmiştir. Bu farklı sonuçlar, son polimerizasyon protokolünün materyale özgü değerlendirilmesi gerektiğini düşündürmektedir. Monomer ve başlatıcı sistemlerindeki farklılıklar, rezinlerin aynı işlem koşullarına farklı yanıtlar vermesine sebep olabilir (Finck et al., 2024).

Son polimerizasyon işlemi, estetik restorasyonların uzun dönem performansı açısından önem taşıyan renk stabilitesi ve translusensi gibi optik özelliklerin geliştirilmesine katkı sağlayabilir. (Celikel, P., & Sengul,

F., 2024; Lee et al., 2022). Tüm bunlara karşılık, uygun şekilde gerçekleştirilmeyen postpolimerizasyon işlemi materyalin mekanik özelliklerinde bozulmaya ve boyutsal doğruluğunda azalmaya yol açabilir. (Rajasekaran et al., 2025).

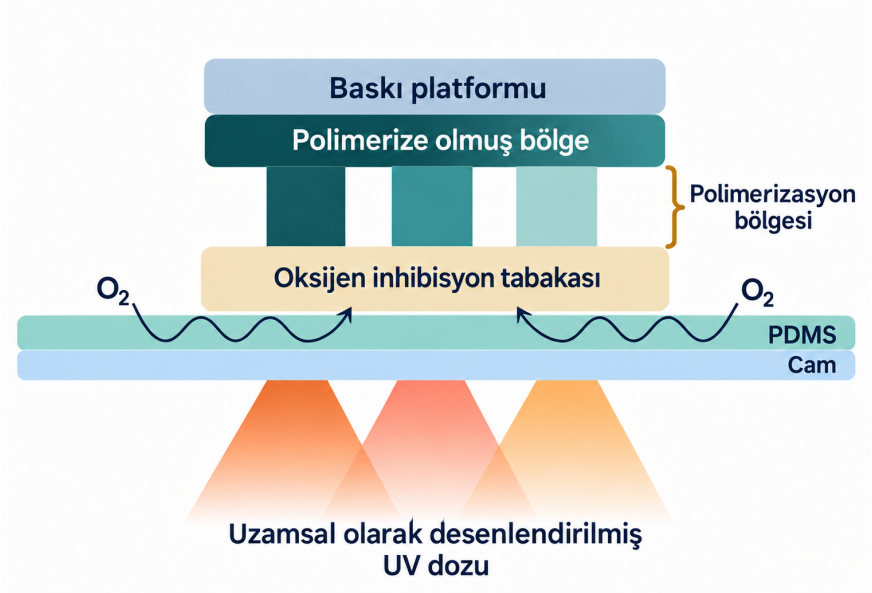
Postpolimerizasyonda Oksijen İnhibisyonunun Etkisi

Rezin materyallerin stabilite ve dayanıklılık kazanması polimerizasyon reaksiyonuna bağlıdır. Bu nedenle, üç boyutlu baskıyla şekillendirilen protezlerde monomerlerin mümkün olan en yüksek düzeyde polimerizasyonunu sağlamak amacıyla baskı sonrasında ek ışıkla sertleştirme işlemi uygulanır (Lim et al., 2024). Ancak bu aşamada, havayla temas eden yüzeylerde oksijenin etkisiyle oksijen inhibisyon tabakası gelişebilir (Carrillo-Marcos et al., 2022; Lim et al., 2024). Ortamdaki oksijen, ışıkla başlatılan polimerizasyon reaksiyonunu belirgin biçimde yavaşlatabilir veya yüzeyde durmasına neden olabilir. Polimerizasyonun baskılandığı bu bölgede, rezin içeriği yüksek, yapışkan ve yeterince kürlenmemiş bir yüzey tabakası oluşur (Carrillo-Marcos et al., 2022; Gaviria-Martinez et al., 2022; Lim et al., 2022; Rohr et al., 2022)

Polimerize olmamış rezine benzer bir bileşim gösteren oksijen inhibisyon tabakası, potansiyel sitotoksik etkilerle ilişkilendirilmektedir. Ayrıca tabakanın kalınlığı, rezin materyalin yüzey özelliklerini etkileyen etmenlerden biridir (Lim et al., 2024; Rohr et al., 2022). Bu tabakanın varlığı, rezin kompozitlerin yüzey sertliğini azaltabilir. Yüzeydeki yetersiz polimerizasyon, renklenme ve aşınmaya karşı daha duyarlı bir yapı oluşmasına da yol açabilir (Gaviria-Martinez et al., 2022).

El aletleri veya döner aletlerle ulaşılması güç olan intrasulkuler ve interdental bölgelerde, oksijen inhibisyon tabakasının uzaklaştırılması özellikle güçleşmektedir (Rohr et al., 2022). Bu nedenle, restorasyonun yüzey kalitesini korumak ve estetik ile fonksiyonel özelliklerini desteklemek amacıyla, ışıkla polimerizasyon sırasında bu tabakanın oluşumunun sınırlandırılması önem taşımaktadır (Gaviria-Martinez et al., 2022).

Resim 1. Kürleme bölgesi ile oksijen inhibisyon tabakasının şematik gösterimi



Kaynak: (Gang et al., 2021)

Azot Gazı Atmosferinde Kürlemenin Etkileri

Literatürde azot gazı atmosferi altında gerçekleştirilen postpolimerizasyon işleminin, materyalin bazı yüzey özelliklerini ve mekanik özelliklerini iyileştirebileceği üzerine çalışmalar mevcuttur.

Dönüşüm derecesi, polimerizasyon sırasında reaksiyona giren çift bağların oranını ifade eder. Manoukakis ve arkadaşları (Manoukakis et al., 2024), aynı cihazda hava ve azot gazı ortamında polimerize edilen bir ortodontik plak rezininde atmosferler arasındaki anlamlı dönüşüm farkını yalnızca ilk bir dakikalık uygulamada saptamıştır; daha uzun sürelerde anlamlı fark bulunmamıştır. Bulgular kullanılan ortodontik plak rezini ve cihazla sınırlıdır; protetik materyaller için uygun son polimerizasyon süresini belirlemez.

Abdulai ve arkadaşları (Abdulai et al., 2026), bir oklüzal splint rezininde 5, 10 ve 20 dakikalık uygulamaları karşılaştırmıştır. Azot destekli gruplarda yüzey dönüşüm derecesi her üç sürede daha yüksek bulunurken, Vickers sertliğindeki fark yalnızca ilk 20 dakikada anlamlıdır. Süre, her iki ölçüm üzerinde de en büyük etkiye sahip değişken olarak bildirilmiştir. Her deney koşulu için tek bir baskı partisi ve tek bir kürleme döngüsü kullanılmış olması, parti ve döngü etkilerinin işlem koşullarından ayrılmasını sınırlar. Sonuçlar, yüzey dönüşümü ile sertliğin işlem değişikliklerine aynı biçimde yanıt vermeyebileceğini göstermektedir.

Wada ve arkadaşları (Wada et al., 2022) yaptıkları çalışmada azotça zengin ortamda yapılan kürlemenin 3B yazıcı ile üretilen okluzal splint materyalinin dönüşüm derecesini artırdığı ve mekanik özelliklerini iyileştirdiği sonucuna varmışlardır. Daha yüksek bir dönüşüm derecesi, daha fazla çapraz bağ ve azalmış artık monomer seviyeleri ile ilgilidir. Bu da daha iyi mukavemet, aşınma direnci ve biyouyumluluğu beraberinde getirir. Benzer şekilde Lim ve arkadaşları (Lim et al., 2024), çalışmalarında azota doymuş koşullarda yapılan kürlemenin azotsuz ortamda yapılan kürlemeye kıyasla dönüşüm derecesinin 3B yazıcı ile üretilen kronların yüzeyinde daha hızlı bir şekilde tam seviyeye ulaştığını ve renk stabilitesinde iyileşmeler görüldüğünü belirtmişlerdir.

Gladrow ve arkadaşları (Gladrow et al., 2026), bir protez kaide rezininde azot ortamında son polimerizasyonla daha yüksek dönüşüm derecesi ve bazı hücre kültürü karşılaştırmalarında daha yüksek hücre canlılığı bildirmiştir. Eğilme dayanımında anlamlı fark bulunmamıştır. Yaşlandırma uygulanmamış hava ve azot grupları arasında Vickers sertliği farkı anlamlı değilken, yapay tükürükte 24 saat bekletilen gruplarda azot lehine fark saptanmıştır. Çalışmanın L929 fare fibroblastlarıyla yapılması ve kısa süreli bekletme koşulları, bulguların klinik biyouyumluluk ve uzun dönem dayanıklılık açısından yorumlanmasını sınırlar. Kullanılan model fare kökenli L929 hücrelerine dayandığından, insanlarda mukozal irritasyon veya alerji riskinin azaldığı sonucu çıkarılamaz.

Lim ve arkadaşları (Lim et al., 2024), aynı cihazda hava veya azot ortamında son polimerizasyon uygulanan rezin kronları distile su, kahve, şarap ve köri içinde bekletmiştir. Yazarların zamana bağlı genel

değerlendirmesinde azot lehine farklılık şarap ve köri gruplarında bildirilmiştir. Bununla birlikte, zaman noktalarına ait karşılaştırmalarda kahve grubunun dördüncü hafta ölçümünde de azot grubunda daha az renk değişimi saptanmıştır, distile suda ise anlamlı fark bulunmamıştır. Bu nedenle renk stabilitesine ilişkin sonuçlar, boyayıcı ortam ve ölçüm zamanı belirtilerek aktarılmalıdır. İstatistiksel olarak daha az renklenme, bütün koşullarda renk değişiminin klinik açıdan kabul edilebilir sınırlar içinde kaldığını göstermez.

Wada ve arkadaşları (Wada et al., 2022), yaptıkları başka bir çalışmada eklemeli yöntemle üretilen sert ve yumuşak okluzal splintlerin mikro ve nano aşınma direnci üzerine kürleme atmosferinin etkisini incelemişlerdir. Azot atmosferi altında kürlenen örneklerin mikro aşınma direnci, azotsuz ortamda kürlenen örneklere göre daha yüksek bulunmuştur. Soydan ve arkadaşları (Soydan et al., 2026), farklı kürleme cihazı ve kürleme atmosferi protokolleri uygulanan Saremco Crowntec daimi kron rezininden üretilmiş diskler ile frezelenmiş Vita Enamic örnekleri aşınma davranışı bakımından karşılaştırmıştır. Çalışmada, frezelenmiş hibrit-seramik örnekler ile azot gazı atmosferi altında kürlenen 3B yazıcı ile üretilen daimi kron rezin örnekler arasında aşınma hacmi bakımından anlamlı bir farklılık bulunmamıştır. Azot gazı atmosferi altında ve kürleme süresi artırılmış örneklerin aşınma direncinde, standart kürleme prosedürü uygulanan örneklere göre anlamlı bir iyileşme gözlenmiştir. Bu çalışma, daimi kuron rezinlerinde son kürleme protokolünün aşınma açısından taşıdığı önemi göstermektedir. Bununla birlikte hibrit seramikle anlamlı fark saptanmaması klinik eşdeğerlik kanıtı sayılmaz; disklerde ölçülen aşınma, kuronların ağız içindeki uzun dönem sağkalımını doğrudan temsil etmez.

Azot kullanılan bir haznenin tamamen oksijensiz olduğu da varsayılmamalıdır. Han ve arkadaşları (Han at al., 2024), kuron ve köprü rezininde yaklaşık %20, %10 ve %5 oksijen içeren ortamları karşılaştırmış; daha düşük oksijen düzeylerinde dönüşüm derecesi, eğilme dayanımı ve parlaklık açısından olumlu sonuçlar bildirirken elastik modülde anlamlı fark saptamamıştır. Deneysel protokolde yalnızca gazın adının verilmesi yerine, ölçülebiliyorsa haznedeki oksijen düzeyinin de belirtilmesi karşılaştırmayı güçlendirir.

Rajasekaran ve arkadaşlarının (Rajasekaran et al., 2025) 2025 tarihli sistematik derlemesi 14 in vitro çalışmayı kapsamış; bunların sekizi meta-analize alınmıştır. Birleştirilmiş analizlerde eğilme dayanımı, eğilme modülü, sertlik, kırılma tokluğu, su emilimi, çözünürlük ve boyutsal doğruluk bakımından azotlu ve azotsuz son polimerizasyon arasında anlamlı fark bulunmamıştır. Azot lehine fark, polisaj uygulanmamış oklüzal aygıtların yüzey polimerizasyonunda bildirilmiştir. Kanıt kesinliği düşük veya çok düşük olarak değerlendirilmiştir. Bu sonuçlar bütün özelliklerde etkisizliği kanıtlamaz; ancak genel bir klinik üstünlük iddiasını da desteklemez. Literatür taramasının Şubat 2024'te sonlanması nedeniyle sonraki yayınlar bu sentezde yer almamaktadır.

Sonuç olarak azot atmosferi, 3B yazıcı ile üretilen protetik rezinlerde son polimerizasyon sırasında yüzeydeki oksijen inhibisyonunu azaltmaya yönelik bir yaklaşımdır. Bazı materyal ve işlem koşullarında dönüşüm derecesi, yüzey sertliği, renk stabilitesi veya hücresel yanıt bakımından yarar sağlayabilir. Ancak bu sonuçlar, bütün mekanik özelliklerde iyileşme ya da daha uzun restorasyon ömrü anlamına gelmez. Azotun klinik kullanımına ilişkin değerlendirme, materyale özgü üretim koşulları ve endikasyonla ilişkili sonuçlar üzerinden yapılmalıdır. Uzun dönem klinik üstünlük, mevcut in vitro verilerle henüz ortaya konmuş değildir.

Kaynakça

Aati, S., Akram, Z., Shrestha, B., Patel, J., Shih, B., Shearston, K., Ngo, H., & Fawzy, A. (2022). Effect of post-curing light exposure time on the physico–mechanical properties and cytotoxicity of 3D-printed denture base material. Dental Materials, 38(1), 57–67. https://doi.org/10.1016/j.dental.2021.10.011

Abdulai, D., Suradi, R., Moghbel, M., Qamheya, M., & Sasany, R. (2026). Effect of nitrogen-assisted and ambient-air post-curing protocols on surface hardness and degree of conversion of a 3D-printed occlusal splint material. BMC Oral Health. Advance online publication. https://doi.org/10.1186/s12903-026-09525-7

Aktug Karademir, S., Atasoy, S., Akarsu, S., & Karaaslan, E. (2025). Effects of post-curing conditions on degree of conversion, microhardness, and stainability of 3D printed permanent resins. BMC Oral Health, 25(1), Article 304. https://doi.org/10.1186/s12903-025-05664-5

Alharbi, N., & Osman, R. B. (2024). Additive manufacturing technologies: Where did we start and where have we landed? A narrative review. The International Journal of Prosthodontics, 37(Suppl.), s243–s252. https://doi.org/10.11607/ijp.8828

Alrahlah, A., Silikas, N., & Watts, D. C. (2014). Post-cure depth of cure of bulk fill dental resin-composites. Dental Materials, 30(2), 149–154. https://doi.org/10.1016/j.dental.2013.10.011

Bayarsaikhan, E., Lim, J.-H., Shin, S.-H., Park, K.-H., Park, Y.-B., Lee, J.-H., & Kim, J.-E. (2021). Effects of postcuring temperature on the mechanical properties and biocompatibility of three-dimensional printed dental resin material. Polymers, 13(8), Article 1180. https://doi.org/10.3390/polym13081180

Carrillo-Marcos, A., Salazar-Correa, G., Castro-Ramirez, L., Ladera-Castañeda, M., López-Gurreonero, C., Cachay-Criado, H., Aliaga-Mariñas, A., Cornejo-Pinto, A., Cervantes-Ganoza, L., & Cayo-Rojas, C. F. (2022). The microhardness and surface roughness assessment of bulk-fill resin composites treated with and without the application of an oxygen-inhibited layer and a polishing system: An in vitro study. Polymers, 14(15), Article 3053. https://doi.org/10.3390/polym14153053

Celikel, P., & Sengul, F. (2025). Investigating the impact of post-curing cycles on surface hardness and color stability in 3D printed resin crowns. Odontology, 113(1), 156–162. https://doi.org/10.1007/s10266-024-00956-8

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

Gaviria-Martinez, A., Castro-Ramirez, L., Ladera-Castañeda, M., Cervantes-Ganoza, L., Cachay-Criado, H., Alvino-Vales, M., Garcia-Luna, G., López-Gurreonero, C., Cornejo-Pinto, A., & Cayo-Rojas, C. F. (2022). Surface roughness and oxygen inhibited layer control in bulk-fill and conventional nanohybrid resin composites with and without polishing: In vitro study. BMC Oral Health, 22(1), Article 258. https://doi.org/10.1186/s12903-022-02297-w

Gladrow, K., Unkovskiy, A., Yassine, J., Gaertner, N., Topolniak, I., Henning, N., & Schmidt, F. (2026). The effect of nitrogen atmosphere during post-curing on cytotoxicity, polishability, flexural strength, and surface hardness of 3D-printed denture bases: An in vitro study. Journal of Materials Science: Materials in Medicine, 37(1), Article 25. https://doi.org/10.1007/s10856-026-07006-5

Han, D. S., Kim, R., Hyun, H.-K., Yoon, H.-I., Jeong, H. R., Jeon, S. H., & Park, C. (2024). The impact of oxygen concentration on the postcuring of 3D-printed dental resin. The International Journal of Prosthodontics, 37(Suppl.), s151–s158. https://doi.org/10.11607/ijp.8919

Katheng, A., Kanazawa, M., Iwaki, M., & Minakuchi, S. (2021). Evaluation of dimensional accuracy and degree of polymerization of stereolithography photopolymer resin under different postpolymerization conditions: An in vitro study. The Journal of Prosthetic Dentistry, 125(4), 695–702. https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2020.02.023

Kessler, A., Hickel, R., & Reymus, M. (2020). 3D printing in dentistry—State of the art. Operative Dentistry, 45(1), 30–40. https://doi.org/10.2341/18-229-L

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, Article 104993. https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2021.104993

Lim, B., Kim, D., Song, J. S., Kim, S., Kim, H., & Shin, Y. (2024). Influence of post-curing in nitrogen-saturated condition on the degree of conversion and color stability of 3D-printed resin crowns. Dentistry Journal, 12(3), Article 68. https://doi.org/10.3390/dj12030068

Luo, K., Liu, Q., Alhotan, A., Dai, J., Li, A., Xu, S., & Li, P. (2024). Effect of post-curing conditions on surface characteristics, physico–mechanical properties, and cytotoxicity of a 3D-printed denture base polymer. Dental Materials, 40(3), 500–507. https://doi.org/10.1016/j.dental.2023.12.017

Manoukakis, T., Nikolaidis, A. K., & Koulaouzidou, E. A. (2024). Polymerization kinetics of 3D-printed orthodontic aligners under different UV post-curing conditions. Progress in Orthodontics, 25(1), Article 42. https://doi.org/10.1186/s40510-024-00540-4

Peskersoy, C., & Oguzhan, A. (2024). Evaluation of the mechanical and adhesion characteristics of indirect restorations manufactured with three-dimensional printing. Polymers, 16(5), Article 613. https://doi.org/10.3390/polym16050613

Pianelli, C., Devaux, J., Bebelman, S., & Leloup, G. (1999). The micro-Raman spectroscopy, a useful tool to determine the degree of conversion of light-activated composite resins. Journal of Biomedical Materials Research, 48(5), 675–681. https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-4636(1999)48:5%3C675::AID-JBM11%3E3.0.CO;2-P

Rajasekaran, A., Chaudhari, P. K., Haldar, P., Vaiid, N., & Ludwig, B. (2025). Are the properties of 3D printed dental materials affected by nitrogen-rich postpolymerization? A systematic review and meta-analysis. The Journal of Prosthetic Dentistry, 133(4), 981.e1–981.e13. https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2025.01.016

Revilla-León, M., & Özcan, M. (2019). Additive manufacturing technologies used for processing polymers: Current status and potential application in prosthetic dentistry. Journal of Prosthodontics, 28(2), 146–158. https://doi.org/10.1111/jopr.12801

Rohr, N., Baumann, C., Märtin, S., & Zitzmann, N. U. (2022). Influence of surface treatment and curing mode of resin composite cements on fibroblast behavior. Head & Face Medicine, 18(1), Article 18. https://doi.org/10.1186/s13005-022-00323-4

Soydan, M., & Manav, T. Y. (2026). Effect of postpolymerization on the wear behavior of additively manufactured definitive crown resins. The Journal of Prosthetic Dentistry, 136(4), e125–e132. https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2026.07.007

Stansbury, J. W., & Idacavage, M. J. (2016). 3D printing with polymers: Challenges among expanding options and opportunities. Dental Materials, 32(1), 54–64. https://doi.org/10.1016/j.dental.2015.09.018

Taormina, G., Sciancalepore, C., Messori, M., & Bondioli, F. (2018). 3D printing processes for photocurable polymeric materials: Technologies, materials, and future trends. Journal of Applied Biomaterials & Functional Materials, 16(3), 151–160. https://doi.org/10.1177/2280800018764770

Wada, J., Wada, K., Garoushi, S., Shinya, A., Wakabayashi, N., Iwamoto, T., Vallittu, P. K., & Lassila, L. (2023). Effect of 3D printing system and post-curing atmosphere on micro- and nano-wear of additive-manufactured occlusal splint materials. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 142, Article 105799. https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2023.105799

Wada, J., Wada, K., Gibreel, M., Wakabayashi, N., Iwamoto, T., Vallittu, P. K., & Lassila, L. (2022). Effect of nitrogen gas post-curing and printer type on the mechanical properties of 3D-printed hard occlusal splint material. Polymers, 14(19), Article 3971. https://doi.org/10.3390/polym14193971

Zguris, Z. (n.d.). How mechanical properties of stereolithography 3D prints are affected by UV curing [White paper]. Formlabs. https://www.dynamism.com/download/2016/UV%20Postcure%20white%20paper.pdf

BÖLÜM 5

İNTRAORAL FOTOGRAMETRİ İLE TAM ARK İMPLANT ÖLÇÜSÜ

Simay BOZKURT[1]
Berfu ERHAN GÜRESER[2]
Süheyla ESEN[3]

Giriş

Tam ark implant destekli sabit protezlerin başarısı, büyük ölçüde implant konumlarının doğru şekilde ölçüye aktarılmasına ve protezin implantlar üzerindeki pasif uyumuna bağlıdır. Çok sayıda implantı birleştiren uzun boşluklu protezlerdeki küçük bir uyumsuzluk bile mekanik ve biyolojik komplikasyonlara sebep olabilir. Bu nedenle ölçü aşamasında hedeflenen, implantların birbirine göre konumunun mümkün olduğunca az sapmayla kaydedilmesidir (Zhang et al., 2023; Eldabe et al., 2026).

[1] Arş. Gör. Uzm. Dt. Simay BOZKURT, Sağlık Bilimleri Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi Protetik Diş Tedavisi Anabilim Dalı, Ankara, Türkiye, (ORCID: 0009-0005-8391-9876)
[2] Arş. Gör. Uzm. Dt. Berfu ERHAN GÜRESER, Sağlık Bilimleri Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi Protetik Diş Tedavisi Anabilim Dalı, Ankara, Türkiye, (ORCID: 0009-0008-1330-8000)
[3] Arş. Gör. Uzm. Dt. Süheyla ESEN, Sağlık Bilimleri Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi Protetik Diş Tedavisi Anabilim Dalı, Ankara, Türkiye, (ORCID: 0009-0009-8969-6086)

Bu amaçla açık ölçü postları kullanılarak alınan konvansiyonel ölçü uzun süre referans yöntem olmuştur. Dijital ölçü sistemleri hasta konforu ve iş akışı açısından kolaylık sağlasa da bu sistemlerin tam ark implant vakalarında konvansiyonel ölçünün yerini tamamen alması kolay değildir. Ağız içi tarayıcılar (AİT) ardışık görüntüleri alır ve yazılım aracılığıyla birleştirir (stitching); bu işlem için sabit ve belirli anatomik referans noktalarının bulunması ölçü alınmasını kolaylaştırır. Dişsiz bir arkta kret uzunluğu ve şekli, sabit mukoza miktarı ve tarama bayrakları arasındaki mesafe bu birleştirmeyi güçleştirebilir ve tarama aralığı uzadıkça hata oranı artabilir (Pozzi et al., 2022). Kısa aralıklı, dişli arklarda yapılan in vivo bir çalışmada bazı tarayıcılar konvansiyonel ölçüyle benzer büyüklükte sapmalar göstermiş, ancak sonuçların uzun dişsiz boşluklar için geçerli olmayabileceği belirtilmiştir (Nedelcu et al., 2018).

Dijital ölçüm sonuçlarını yorumlarken doğruluk (accuracy) kavramının iki bileşenini ayırmak gerekir. ISO 5725-1'e göre gerçeklik (trueness) ölçümün gerçek değere uygunluğunu, kesinlik (precision) ise tekrarlanan ölçümlerin birbirine uygunluğunu gösterir (Pozzi et al., 2022). Tam ark implant taramalarında ağız içi tarayıcılarla bildirilen gerçeklik değerleri 41–303 µm, kesinlik değerleri ise 25–181 µm arasında değişmekte ve bu değerler implant tarama tekniğine göre farklılık göstermektedir (Revilla-León et al., 2026a). Bu sorunu aşmak için basınç patı, yapay işaret noktaları, yardımcı geometri parçaları, yatay uzantılı tarama bayrakları ve tarama bayraklarının birbirine splintlenmesi gibi pek çok yöntem denenmiştir. İn vitro bir çalışmada splintlemenin, özellikle posterior implant bölgelerinde sapmayı azalttığı, ancak etkisinin implant konumuna göre değiştiği bildirilmiştir (Pozzi et al., 2022).

Fotogrametri ise farklı bir yaklaşım sunar. İmplantlara bağlanan tarama bayraklarında bulunan kalibre işaretler görüntülenir ve implantların konum ve yönü bu işaretleyicilerden hesaplanır.

Yüzey görüntülerinin birbirine eklenmesi yöntemine dayanmadığı için ağız içi tarayıcılardaki birleştirme kaynaklı hataların sınırlanması hedeflenir (Negreiros et al., 2025; Selvi et al., 2026). Diş hekimliğinde ilk kez 1990'larda uygulanan bu teknoloji, implant konumlarının kaydında bir araç olarak değerlendirilmiştir (Hussein, 2023). Ağız dışı (ekstraoral) sistemler yalnızca implant konumlarını kaydeder; yumuşak doku için ayrı bir ağız içi tarayıcı veya konvansiyonel kayıt gerekir ve bu veriler bilgisayar destekli tasarım (computer-aided design, CAD) yazılımında birleştirilir (Gómez-Polo et al., 2023; Hussein, 2023). Son yıllarda implant konumunu ve yumuşak dokuyu tek cihazda kaydetmeyi hedefleyen ağız içi (intraoral) sistemler de geliştirilmiştir (Eldabe et al., 2026). Bu teknoloji başlangıçta yalnızca tek bir tarayıcı sistemine (Aoralscan Elite) özgüyken, yakın zamanda ikinci bir sisteme (Freedom Air) de uyarlanmıştır (Revilla-León et al., 2026b).

Fotogrametriye ilişkin klinik çalışmaların önemli bir bölümü hâlâ olgu sunumları ve küçük örneklemli çalışmalardan oluşur; karşılaştırmalı çalışmalarda ise sonuçlar sisteme, ölçüm yöntemine ve çalışma tasarımına göre değişir (Gómez-Polo et al., 2023). Bu bölümde intraoral fotogrametrinin çalışma prensibi, mevcut sistemler, literatürdeki kanıtlar, klinik iş akışı ve sınırlılıkları genel hatlarıyla ele alınmaktadır.

Fotogrametrinin Çalışma Prensibi

Fotogrametri, bir noktanın üç boyutlu konumunun, o noktayı farklı açılardan gören görüntülerden üçgenleme ile hesaplanması ilkesine dayanır. Kamera aynı noktayı iki ya da daha fazla açıdan kaydettiğinde, bu görüntüler arasındaki geometrik ilişki noktanın uzaydaki koordinatlarını verir (Negreiros et al., 2025; Selvi et al., 2026).

Fotogrametride dişsiz arkın yüzeyi değil, implantlara bağlanan tarama bayraklarının kalibre işaretleri aracılığıyla implant

konumları ölçülür. Bu tarama bayrakları, sistemin yazılımı tarafından tanınan optik bir işaret taşır. Yazılım kalibre bayrakların konum ve yönünü hesaplar ve implantların birbirine göre konumunu içeren bir dosya (standard tessellation language, STL) üretir (Negreiros et al., 2025; Zhang et al., 2023). Kalibre tarama bayrakları sisteme özgüdür; bir sistemin bayrağı başka bir sistemde kullanılamaz (Gómez-Polo et al., 2023) ve bu bayraklar ağız içi tarayıcılarda kullanılan tarama bayraklarından da farklıdır (Revilla-León et al., 2023).

Ağız içi tarayıcılar yüzey bilgisini ardışık görüntüleri birleştirerek oluştururken fotogrametrinin hedefi yüzeyi değil, belirli noktaları ölçmektir. Bu nedenle fotogrametrinin örtüşen yüzey görüntülerine ihtiyaç duymadığı ve stitching gerektirmediği kabul edilir (Gómez-Polo et al., 2023). Dişsiz arkta sabit anatomik referans noktasının bulunmaması, stitching yapan ağız içi tarayıcılar için sınırlayıcı bir faktördür (Pozzi et al., 2022). Fotogrametride bu durum daha az önem taşır, ancak bu fotogrametrinin hatasız olduğu anlamına gelmez. Ekstraoral fotogrametri ile yapılan in vivo bir çalışmada tarama bayrakları arasındaki mesafe artışının sapma miktarını da artırdığı gözlenmiştir (Zhang et al., 2023). Dolayısıyla fotogrametride hata kaynağı ortadan kalkmaz, yalnızca farklılaşır. Örneğin implant konum taraması ile yumuşak doku taramasının hizalanması ayrı bir sapma kaynağıdır (Revilla-León et al., 2025).

Güncel İntraoral ve Ekstraoral Fotogrametri Sistemleri

Literatürde adı geçen fotogrametri sistemleri, kameranın ağız dışında kullanılması ya da ağız içi tarayıcıyla bütünleşik olarak ağız içinde kullanılabilmesi ve yumuşak doku bilgisinin aynı cihazla alınıp alınamaması bakımından ayrılır (Tablo 1).

Piyasadaki fotogrametri sistemlerinin çoğu ekstraoral kamera kullanır (Revilla-León et al., 2023; Gómez-Polo et al., 2023; Selvi et al., 2026). Bu sistemlerde kamera ağız dışında tutulur ve her

implanta sistemin kendi tarama bayrağı vidalanır. Sistem yalnızca bayrakların konumunu kaydeder; yumuşak doku ve komşu dişler için ek bir ağız içi tarama ya da konvansiyonel kayıt gerekir ve iki veri seti CAD yazılımında birleştirilir (Gómez-Polo et al., 2023; Revilla-León et al., 2023; Selvi et al., 2026). Tarama bayraklarının sisteme özgü olması klinik pratikliği sınırlayabilir (Selvi et al., 2026). Son dönemde iyileşme başlıklarının üzerine oturan (snap-on) tarama bayrakları geliştirilmiştir. Bu bayraklar, iyileşme başlığının tarama bayrağı ile değiştirilmesi gerekliliğini ortadan kaldırarak zaman kazandırır. Snap-on bayrakların doğruluğuna ilişkin veriler ise sınırlıdır; tek hastada yapılan bir klinik çalışmada snap-on bayraklı ekstraoral sistemin doğrusal sapması düşük, açısal sapması ise intraoral fotogrametriden sayısal olarak yüksek bulunmuş ve bu konuda daha fazla çalışma gerektiği vurgulanmıştır (Revilla-León et al., 2026a).

Aoralscan Elite (Shining 3D) ise fotogrametriyi ağız içi tarayıcı ile bütünleştiren bir sistem olarak tanımlanır. İmplant konumları kalibre tarama bayrakları (scan flag) ile, çevre dokular da aynı cihazla kaydedilir ve veriler üçüncü bir yazılıma gerek kalmadan cihazın kendi yazılımında birleştirilir (Eldabe et al., 2026). Cihazın yüzey taraması için yapılandırılmış ışık, kalibre bayrakların okunması için ise beyaz ışıkla çalışan ayrı bir fotogrametri modu bulunduğu bildirilmiştir (Fu et al., 2025). Sistemin kalibre iyileşme başlıkları (coded healing abutment) da vardır; bunlar yumuşak doku ve implant konum taramalarının ek bir kayıt gerektirmeden otomatik hizalanmasını sağlar, kullanılmadığında ise bu hizalama için sağ ve sol oklüzal kayıtlar gerekir (Revilla-León et al., 2025). Doğru kayıt için önerilen bayrak yerleşimi ve tarama adımları "Klinik İş Akışı ve Protokol" başlığı altında verilmiştir.

Aoralscan Elite dışında, Freedom Air (DOF) adlı ikinci bir intraoral fotogrametri sistemi de bulunmaktadır. Bu sistemde kısa (SQ tipi) ve uzun (L tipi) olmak üzere farklı boyutlarda kalibre

tarama bayrakları kullanılır. Üretici, uzun bayrakların her kadranın en posteriorundaki implanta yerleştirilmesini önerir. Sistem, tarama mesafesini standartlaştırmak için çeneye yerleştirilen özel bir tarama ucuna sahiptir ve implant taraması şu an yalnızca abutment düzeyinde yapılabilmektedir (Revilla-León et al., 2026b).

Tablo 1. Bölümde ele alınan fotogrametri sistemlerinin özellikleri

Sistem	**Tip**	**Yumuşak doku kaydı**	**Tarama bayrağı / not**
Aoralscan Elite (Shining 3D)	İntraoral (AİT ile bütünleşik)	Aynı cihazla	Sisteme özgü kalibre bayraklar; kalibre iyileşme başlıkları
Freedom Air (DOF)	İntraoral	Aynı cihazla	Kısa (SQ) ve uzun (L) kalibre bayraklar; yalnızca abutment düzeyinde
iCam4D	Ekstraoral	Ek AİT veya konvansiyonel kayıt	Vidalı, sisteme özgü bayraklar
PIC	Ekstraoral	Ek AİT veya konvansiyonel kayıt	Sisteme özgü bayraklar
OxoFit	Ekstraoral	Ek AİT veya konvansiyonel kayıt	Sisteme özgü bayraklar
MicronMapper	Ekstraoral	Ek AİT veya konvansiyonel kayıt	Snap-on bayraklar

Kaynak: Eldabe et al. (2026), Fu et al. (2025), Gómez-Polo et al. (2023), Revilla-León et al. (2021, 2023, 2025, 2026a, 2026b), Selvi et al. (2026) ve Zhang et al. (2023) verilerinden yazar tarafından derlenmiştir. AİT: ağız içi tarayıcı.

Literatür Sentezi

Fotogrametrinin doğruluğuna ilişkin veriler büyük ölçüde in vitro çalışmalara dayanır. Çalışmalar referans yöntem, ölçüm teknolojisi ve implant sayısı açısından birbirinden farklı olduğu için sayısal değerler doğrudan birbiriyle kıyaslanmamalıdır. Yorumlamada sıklıkla kullanılan bir ölçüt, 150 μm'ye kadar olan

sapmanın klinik olarak kabul edilebilir sayılmasıdır (Zhang et al., 2023). Bir sistematik derlemede, ağırlıklı olarak in vitro ve hayvan çalışmalarına dayanılarak, dikeyde 160 µm ve yatayda 150 µm'ye kadar uyumsuzluğun mekanik komplikasyona yol açmadığı, biyolojik açıdan ise dikeyde 1 mm'ye ve yatayda 345 µm'ye kadar uyumsuzluğun tolere edilebildiği bildirilmiştir. Ancak mevcut verilerin kabul edilebilir uyumsuzluk için bir klinik eşik belirlemeye yetmediği ve mekanik yanıtın biyolojik yanıttan daha kritik olduğu vurgulanmıştır (Abdelrehim et al., 2024).

İn Vitro Çalışmalar

Altı implantlı bir maksiller modelde konvansiyonel splintli ölçü (11,7 µm) ve iki AİT (iTero Element 18,4 µm; TRIOS 3 21,1 µm), iCam4D ile alınan fotogrametri kaydından (77,6 µm) daha az sapma göstermiştir. AİT'ler ile konvansiyonel yöntem arasında doğrusal sapma açısından anlamlı fark bulunmamış, tüm gruplarda kesinlik görece düşük kalmıştır (Revilla-León et al., 2021). Bu sonuç, her fotogrametri sisteminin AİT'lerden daha doğru olmadığını ve sistem farklılıklarının önemini gösterir. Benzer bir modelde PIC sistemi ile konvansiyonel ölçü arasındaki gerçeklik farkı yaklaşık 1,8 µm, kesinlik farkı ise konvansiyonel yöntem lehine 18,6 µm bulunmuştur (Revilla-León et al., 2023). Altı implantlı mandibular bir modelde ise intraoral (Aoralscan Elite) ve ekstraoral (iCam4D, OxoFit) fotogrametri sistemleri ile konvansiyonel polivinil siloksan (PVS) ölçüsü karşılaştırılmış; sapmalar küçük ve klinik olarak kabul edilebilir bulunmuş, doğrusal gerçeklikte en düşük sapmayı konvansiyonel ölçü vermiştir (Selvi et al., 2026).

Altı paralel abutment analoglu maksiller bir modelde yapılan bir çalışmada, karekök ortalama kare (root mean square, RMS) hatası bakımından en düşük sapmayı, yani en iyi gerçekliği Aoralscan Elite ile yapılan intraoral fotogrametri vermiştir (26,4

µm); bunu ekstraoral fotogrametri (iCam4D; 31,7 µm), TRIOS 5 ile AİT (39,9 µm) ve önceden üretilmiş yardımcı parçalı AİT (50,6 µm) izlemiştir. Kesinlik bakımından ise en iyi sonucu ekstraoral fotogrametri vermiştir (2,3 µm; intraoral fotogrametri 4,1 µm). Açısal sapmada gruplar arasında anlamlı fark bulunmamıştır. Tarama süresi intraoral fotogrametride 50,3 saniye, ekstraoral fotogrametride 57,4 saniye, AİT'de 91,1 saniye ve yardımcı parçalı AİT'de 125 saniyedir. Bu çalışmada iCam4D ağız içi tarayıcılardan daha az sapma göstermiş, Revilla-León et al. (2021) ise iCam4D'yi ağız içi tarayıcılardan daha az doğru bulmuştur. Fu et al. (2025) bu farkı Revilla-León et al. (2021) çalışmasında açılı abutmentların kullanılmasına bağlamıştır.

Hasta modelleriyle yapılan başka bir çalışmada, arşivden seçilen 30 tam ark implant modeli (4–6 implant, toplam 146 implant konumu) Aoralscan Elite ile taranmış ve laboratuvar tarayıcısıyla elde edilen referansla karşılaştırılmıştır. Ortalama üç boyutlu sapma 57,2 ± 27,4 µm, açısal sapma 0,26° ± 0,19° bulunmuş; en büyük sapma dikey (Z) eksende görülmüştür (−33,3 ± 34,8 µm). İmplant sayısı (4, 5 veya 6) yalnızca Z ekseni sapmasını etkilemiştir. En uç değerlerin bile 150 µm ve 1° eşiklerini aşmadığı bildirilmiştir, çalışmada yalnızca gerçeklik değerlendirilmiştir (Pozzi et al., 2025).

İkinci intraoral fotogrametri sistemi olan Freedom Air için yapılan çalışmada (altı implantlı maksiller model, grup başına 30 tarama) doğrusal gerçeklik standart tarama bayraklarıyla 156 ± 46 µm, kısa kalibre bayraklarla 50 ± 16 µm, uzun kalibre bayraklarla 40 ± 6 µm bulunmuştur; açısal gerçeklik sırasıyla 0,375°, 0,265° ve 0,203°'dir. Kesinlik değerleri de aynı sırayı izlemiş, uzun bayrakların en posteriordaki iki implanta yerleştirilmesi sistemin doğruluğunu artırmıştır (Revilla-León et al., 2026b).

Yumuşak doku ve implant konum taramalarının hizalama doğruluğunu inceleyen bir çalışmada (altı implantlı maksiller model, grup başına 15 tarama) dört AİT ve bir intraoral fotogrametri sistemi

karşılaştırılmıştır. Hizalama sapması ortalama 98 ± 28 ile 127 ± 29 µm arasında bulunmuştur. Kalibre iyileşme başlıklı Aoralscan Elite ile i700 arasındaki fark anlamlıyken (P = 0,046), başlıklı ve başlıksız Aoralscan Elite arasında anlamlı fark saptanmamıştır (P = 0,921). Kalibre iyileşme başlıklarının ek kayıt gerektirmediği için klinik avantaj sağlayabileceği belirtilmiş, bu aşamanın klinik etkisinin ek çalışmalarla incelenmesi gerektiği vurgulanmıştır (Revilla-León et al., 2025).

Özetle in vitro veriler, intraoral fotogrametrinin bildirilen çalışmalarda 150 µm eşiğinin altında sapma verdiğini ve karşılaştırıldığı AİT taramasından daha düşük sapma gösterebildiğini düşündürmektedir (Fu et al., 2025; Pozzi et al., 2025; Revilla-León et al., 2026b). Bununla birlikte konvansiyonel ölçü bazı çalışmalarda en düşük doğrusal sapmayı vermiş, ekstraoral sistemlerin sonuçları ise sisteme ve çalışma koşullarına göre belirgin biçimde değişmiştir (Revilla-León et al., 2021; Selvi et al., 2026). Ayrıca yaklaşık 100–130 µm'lik hizalama sapması, implant konum taramasının doğruluğunun tek başına yeterli olmadığını göstermektedir (Revilla-León et al., 2025).

İn Vivo Çalışmalar

İn vivo veriler hâlâ sınırlıdır. Dişsiz çenelerde iCam4D ile alınan fotogrametrik kayıtların doğrulanmış konvansiyonel splintli ölçülerle karşılaştırıldığı bir klinik çalışmada ortalama mesafe sapması 70 ± 57 µm bulunmuş, bazı çenelerde sapma 150 µm'yi aşmıştır. Sapma implantlar arası mesafe arttıkça artmış; implantlar arası açılanma ve çene tipi (maksilla veya mandibula) anlamlı bir etki göstermemiştir (Zhang et al., 2023).

İntraoral fotogrametriyi geleneksel ağız içi tarayıcılarla doğrudan karşılaştıran klinik veriler sınırlıdır. Dört implantlı 13 dişsiz çenede (11 hasta, 52 implant) yapılan bir klinik çalışmada Aoralscan Elite (intraoral fotogrametri) ile Aoralscan 3 (geleneksel

AİT) kayıtları konvansiyonel splintli açık kaşık ölçüsüne göre değerlendirilmiştir. Ortalama üç boyutlu sapma intraoral fotogrametride 30,7 µm, AİT'de 59,8 µm; ortalama açısal sapma ise sırasıyla 0,78° ve 1,4° bulunmuştur. Tarama fotogrametri ile daha kısa sürede tamamlanmıştır (ortalama 14,1 ve 18,2 dakika). AİT'de açısal sapma çene tipiyle ilişkili bulunmuştur. Yazarlar yöntemin bazı hastalarda tam ark implant kaydı için kullanılabileceğini belirtmiştir. Bununla birlikte çalışmada yalnızca gerçeklik değerlendirilmiş, kesinlik ölçülmemiş ve yalnızca bir AİT ile dört implantlı olgular incelenmiştir (Eldabe et al., 2026).

Dört implantlı dişsiz mandibulası olan tek bir hastada yapılan klinik çalışmada intraoral fotogrametri (Aoralscan Elite), snap-on bayraklı ekstraoral fotogrametri (MicronMapper) ve splintleme tekniği (IOConnect, TRIOS 5) karşılaştırılmış, her yöntemle 10 ardışık tarama alınmıştır. Referans olarak konvansiyonel ölçü değil, vidalı işaretleyicilerle alınan 10 fotogrametri taramasının ortalaması kullanılmıştır. Ortalama doğrusal sapma intraoral fotogrametride 37 ± 12 µm (0,44°), ekstraoral fotogrametride 25 ± 17 µm (0,71°), splintleme tekniğinde 39 ± 6 µm (0,76°) bulunmuş ve doğrusal gerçeklik bakımından gruplar arasında anlamlı fark saptanmamıştır. En iyi doğrusal kesinlik splintleme grubunda, en iyi açısal gerçeklik intraoral fotogrametri grubunda görülmüştür (Revilla-León et al., 2026a).

Klinik sonuçların izlendiği çok merkezli bir retrospektif çalışmada, Aoralscan Elite ile intraoral fotogrametri kaydı alınarak üretilen 52 tam ark sabit protez (35 hasta, 221 implant) değerlendirilmiştir. Protez teslimi sırasında pasif uyum Sheffield testi, manuel oturtma basıncı ve periapikal radyografi ile değerlendirilmiş; 52 protezin tamamında pasif uyumun sağlandığı, bunların 49'unda (%94,2) herhangi bir düzeltme gerekmediği bildirilmiştir (Stefanović et al., 2026). Retrospektif tasarım, kısa izlem süresi ve karşılaştırma grubunun olmaması çalışmanın

sınırlılıklarıdır. Klinik doğruluk üç boyutlu sapma yerine pasif uyumla değerlendirildiği için bulguların yukarıdaki sayısal değerlerle doğrudan kıyaslanması uygun olmaz.

İntraoral fotogrametri çalışmalarının büyük bölümü in vitro yürütüldüğü için bu çalışmalar gerçek klinik koşulları yansıtmaz. Ağız içinde tükürük ve tarayıcı ucunda oluşan buğulanmanın ölçü doğruluğunu etkileyebileceği belirtilmiştir (Fu et al., 2025; Pozzi et al., 2025). Bu etkinin fotogrametri sistemlerini ne ölçüde etkilediği bilinmemektedir. Öte yandan fotogrametrinin yumuşak doku, kan ve tükürükten yüzey tarayan sistemlere göre daha az etkilenebileceği ve bunun özellikle cerrahi sonrası erken dönemde bir avantaj olabileceği ileri sürülmüştür (Hussein, 2023; Eldabe et al., 2026). Ancak bunun için kalibre tarama bayraklarının üzerindeki beyaz referans noktalarının tamamen temiz olması gerekir (Revilla-León et al., 2026b).

Klinik veriler in vitro bulgularla genel olarak uyumludur. İntraoral fotogrametri bir klinik çalışmada geleneksel AİT'den daha düşük sapma vermiş (Eldabe et al., 2026), tek hastalı bir çalışmada splintleme tekniğiyle anlamlı fark göstermemiş (Revilla-León et al., 2026a) ve retrospektif bir seride tüm protezlerde pasif uyum bildirilmiştir (Stefanović et al., 2026). Ancak bu sonuçlar az sayıda hasta, ağırlıklı olarak dört implantlı olgular ve farklı referans yöntemlerle elde edildiği için klinik üstünlüğün kanıtı olarak yorumlanmamalıdır.

Derlemeler ve İkincil Veriler

İmplant diş hekimliğinde fotogrametriyi ele alan bir sistematik derleme, erken dönem raporların yöntemi geçerli ve güvenilir bir klinik araç olarak gördüğünü, ancak daha fazla çalışmaya gereksinim bulunduğunu bildirmiştir (Hussein, 2023). Stereofotogrametri sistemlerini inceleyen daha sonraki bir derlemede dişsiz ve çok implantlı olgulara ait çalışmalar

değerlendirilmiş; PIC için gerçeklik yaklaşık 10–49 µm, kesinlik 5–65 µm, iCam4D için gerçeklik 24–77 µm, kesinlik 2–203 µm aralığında bildirilmiştir (Gómez-Polo et al., 2023).

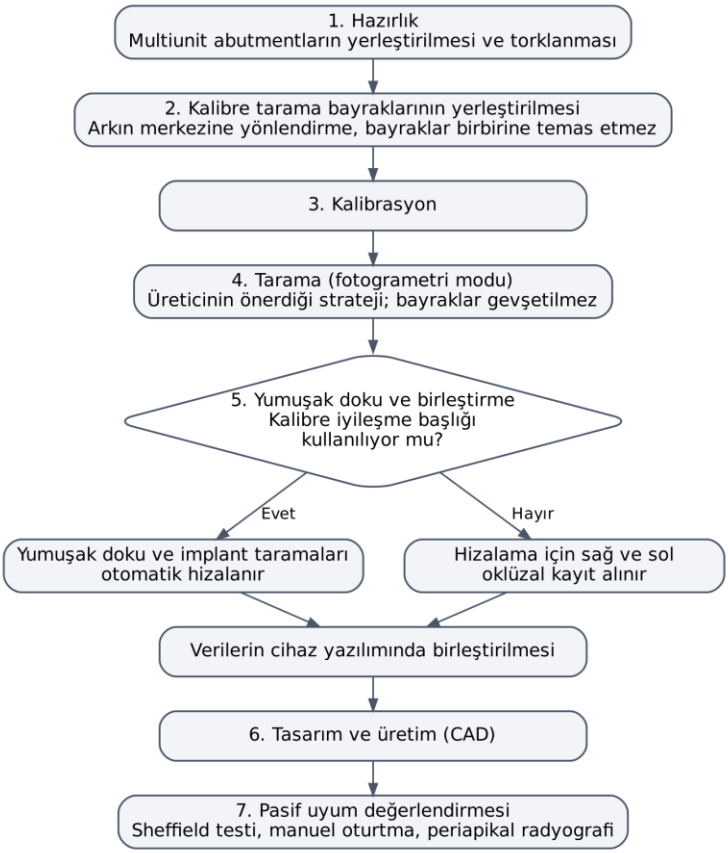
İntraoral fotogrametriye ilişkin ikincil veriler de benzer bir eğilim göstermektedir. Selvi et al. (2026), intraoral fotogrametriyi çeşitli ağız içi tarayıcılar ve ekstraoral sistemlerle karşılaştıran çalışmaların çoğunun tam ark kayıtlarında kabul edilebilir sınırlar içinde sonuç bildirdiğini aktarmıştır. Stefanović et al. (2026) ise in vitro çalışmalarda intraoral fotogrametrinin AİT'ye göre daha düşük sapma gösterdiğini ve bu farkın implant sayısı arttıkça belirginleştiğini aktarmıştır. Kalibre tarama tekniklerini inceleyen bir sistematik derleme ve meta-analizde intraoral fotogrametri için ortalama doğrusal sapma 36 µm, açısal sapma 0,23° bulunmuş; tek tek çalışmalarda ise doğrusal sapma 26 ± 1 ile 57 ± 27 µm, açısal sapma 0,11° ile 0,78° arasında değişmiştir (Revilla-León et al., 2026c).

Derlemeler ve meta-analiz fotogrametrinin klinik olarak kabul edilebilir doğrulukta olduğunu desteklemekle birlikte, kanıtın büyük bölümünün in vitro ve kısa dönemli olduğuna dikkat çekmektedir.

Klinik İş Akışı ve Protokol

Fotogrametri destekli implant kaydının adımları kullanılan sisteme göre değişir. Aşağıdaki akış (Şekil 1), Aoralscan Elite ile yapılmış in vitro (Selvi et al., 2026; Pozzi et al., 2025; Revilla-León et al., 2025) ve klinik (Eldabe et al., 2026; Stefanović et al., 2026; Revilla-León et al., 2026a) çalışmalarda bildirilen protokollere dayanır.

Şekil 1. Aoralscan Elite ile bildirilen klinik iş akışının şematik özeti



Kaynak: Selvi et al. (2026), Pozzi et al. (2025), Revilla-León et al. (2025), Eldabe et al. (2026), Stefanović et al. (2026) ve Revilla-León et al. (2026a) çalışmalarında bildirilen protokollere dayanılarak yazar tarafından hazırlanmıştır.

1. Hazırlık: Multiunit abutmentlar yerleştirilir ve üretici talimatlarına uygun şekilde torklanır (Selvi et al., 2026).
2. Kalibre tarama bayraklarının yerleştirilmesi: Tarama bayrakları (scan flag) üretici talimatına göre sıkılır ve lingual yönde, arkın merkezine doğru yönlendirilir (Eldabe et al., 2026; Selvi et al., 2026). Bir in vitro protokolde farklı boylarda (uzun, orta, kısa) bayraklar

arkın merkezine doğru radyal biçimde dizilmiş, böylece tarama başlangıcında birden fazla bayrak aynı görüş alanına girmiştir (Pozzi et al., 2025). Klinik duruma göre farklı boyutlarda bayraklar seçilebilmektedir (Stefanović et al., 2026). Bitişik bayrakların birbirine temas etmemesine dikkat edilir (Selvi et al., 2026).

3. Kalibrasyon: Cihaz kayıttan önce kalibre edilir (Eldabe et al., 2026).
4. Tarama: Üreticinin önerdiği tarama stratejisi izlenir ve tüm kayıtlar tamamlanana kadar bayraklar gevşetilmez (Selvi et al., 2026). Bir in vitro protokolde tarama, tüm bayrak uçlarının birleştiği merkezden başlatılmış, tarayıcı ucu her bayrağın üzerinden radyal olarak geçerek merkeze dönmüş ve yazılım bayrağı tanıdığında üzerindeki noktalar yeşile dönmüştür (Pozzi et al., 2025).
5. Yumuşak doku ve birleştirme: Sistem hem yumuşak dokuyu hem işaretleyicileri tarar ve veriler cihazın kendi yazılımında birleştirilir (Eldabe et al., 2026). Bazı protokollerde yumuşak doku önce bayraklar olmadan taranır, ardından bayraklar yerleştirilerek fotogrametri modunda taranır (Pozzi et al., 2025; Stefanović et al., 2026). Kalibre iyileşme başlıkları kullanıldığında yumuşak doku ve implant taramaları ek kayıt gerekmeden otomatik hizalanır, kullanılmadığında sağ ve sol oklüzal kayıtlar gerekir (Revilla-León et al., 2025).
6. Tasarım ve üretim: Veriler CAD yazılımına aktarılır ve tarama bayraklarına karşılık gelen kütüphane dosyaları kullanılarak üretim yapılır (Eldabe et al., 2026).
7. Pasif uyum değerlendirmesi: Protezin teslimi sırasında pasif uyum Sheffield testi, manuel oturtma basıncı ve

periapikal radyografi ile değerlendirilebilir (Stefanović et al., 2026).

Pratik açıdan literatürden çıkarılabilecek birkaç nokta vardır. Ekstraoral fotogrametri ile yapılan bir klinik çalışmada implantlar arası mesafe arttıkça sapma artmıştır (Zhang et al., 2023); Aoralscan Elite için ise bir in vitro çalışmada implantlar arası tarama bayrağı mesafesinin doğruluğu etkilemediği bildirilmiştir (aktaran Revilla-León et al., 2026a). Aoralscan Elite'in farklı bayrak mesafelerinde kullanım esnekliği de bildirilmiştir (aktaran Selvi et al., 2026); ancak bu sistemi AİT ile karşılaştıran klinik veri dört implantlı olgularla sınırlıdır (Eldabe et al., 2026). Bu adımların her biri için standart bir klinik kılavuz henüz yoktur ve yukarıdaki protokoller araştırma koşullarında uygulanmıştır. Bildirilen tarama sürelerine bakıldığında, in vitro bir modelde intraoral fotogrametri taraması yaklaşık 50 saniye sürmüş (Fu et al., 2025), retrospektif klinik çalışmada ise tüm tarama 5 dakikayı aşmamıştır (Stefanović et al., 2026). Hemen yükleme gereken olgularda intraoral fotogrametri kaydından sonraki 48 saat içinde geçici tam ark protezin üretildiği de bildirilmiştir (Stefanović et al., 2026).

Avantajlar ve Sınırlılıklar

Literatürde intraoral fotogrametrinin olası avantajları olarak daha kısa tarama süresi (Fu et al., 2025; Eldabe et al., 2026), kan ve tükürükten görece daha az etkilenme (Hussein, 2023; Eldabe et al., 2026), kalibre iyileşme başlıklarıyla ek kayıt gerektirmeyen hizalama (Revilla-León et al., 2025) ve hemen yükleme olgularında kısa sürede geçici protez üretimi (Stefanović et al., 2026) bildirilmiştir.

Bununla birlikte fotogrametri ile ilgili çalışmaların büyük bir bölümü in vitro çalışmalardan oluşur. Klinik çalışmalar küçük örneklemlidir ya da farklı değerlendirme yöntemleri kullanır.

İn vitro çalışmalar tükürük, buğu oluşumu, sınırlı ark arası mesafe, ağız açıklığı, dil ve yanak hareketi gibi klinik faktörleri yansıtmaz (Fu et al., 2025; Pozzi et al., 2025). Fu et al. (2025), alt çenede tarama bayraklarının görünür olması için dilin geri çekilmesi gerektiğini ve oklüzyon kaydının tüm dijital yöntemlerde hâlâ zor olduğunu belirtmiştir. Ayrıca implant konum taraması ile yumuşak doku taramasının hizalanması ayrı bir hata kaynağıdır ve bu aşamanın klinik etkisi henüz yeterince çalışılmamıştır (Revilla-León et al., 2025). Sisteme özgü kalibre tarama bayraklarının gerekmesi (Gómez-Polo et al., 2023; Selvi et al., 2026) ve Freedom Air sisteminde implant taramasının yalnızca abutment düzeyinde yapılabilmesi (Revilla-León et al., 2026b) klinik kullanımı sınırlayabilecek diğer etkenlerdir. Fotogrametri sistemlerinin ekipman maliyeti yöntemin yaygınlaşmasını sınırlayabilecek bir etken olarak gösterilmektedir (Ucer et al., 2025); ancak fotogrametri iş akışlarını konvansiyonel ölçü ve AİT ile karşılaştıran maliyet-etkinlik analizleri henüz bulunmamaktadır (Hina et al., 2026).

İleri çalışmalarda daha büyük örneklemli ve standart referans yöntemli in vivo çalışmalar, kesinliğin de değerlendirildiği tasarımlar, farklı implant sayıları ve ark tipleriyle yapılan çalışmalar ve intraoral fotogrametrinin farklı AİT ve ekstraoral sistemlerle doğrudan karşılaştırılması gereklidir (Eldabe et al., 2026; Selvi et al., 2026). Protez sağkalımı, mekanik ve biyolojik komplikasyonlar gibi klinik sonuçları izleyen uzun dönem veriler de gereklidir.

Sonuç

İntraoral fotogrametri, tam ark implant kayıtlarında konvansiyonel ölçüye ve ağız içi tarayıcılara alternatif olabilecek bir yöntem olarak görülmektedir. Mevcut in vitro ve sınırlı klinik veriler, sapmaların çoğu çalışmada kabul edilebilir sınırlar içinde kaldığını göstermektedir. Ancak sonuçlar sisteme ve referans yöntemine, bazı sistemlerde de implantlar arası mesafeye göre

değişmekte; konvansiyonel ölçü bazı çalışmalarda daha düşük sapma vermektedir. İntraoral sistemlere ilişkin bulgular hâlâ sınırlıdır; bu nedenle daha büyük örneklemli ve uzun dönem klinik çalışmalar gereklidir.

Kaynakça/References

Abdelrehim, A., Etajuri, E. A., Sulaiman, E., Sofian, H., & Salleh, N. M. (2024). Magnitude of misfit threshold in implant-supported restorations: A systematic review. *The Journal of Prosthetic Dentistry, 132*(3), 528–535. https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2022.09.010

Eldabe, A. K., Adel-Khattab, D., & Botros, K. H. (2026). Accuracy of intraoral photogrammetry in complete arch digital implant scanning: An in vivo prospective comparative study. *The Journal of Prosthetic Dentistry, 135*(2), 342–351. https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2025.03.041

Fu, X. J., Cai, Z. Z., Shi, J. Y., Qiao, S. C., Tonetti, M. S., Lai, H. C., & Liu, B. L. (2025). Accuracy of a novel intraoral photogrammetry technique for complete-arch implant impressions: An in vitro study. *Clinical Oral Implants Research, 36*, 991–999. https://doi.org/10.1111/clr.14445

Gómez-Polo, M., Barmak, A. B., Ortega, R., Rutkunas, V., Kois, J. C., & Revilla-León, M. (2023). Accuracy, scanning time, and patient satisfaction of stereophotogrammetry systems for acquiring 3D dental implant positions: A systematic review. *Journal of Prosthodontics, 32*(S2), 208–224. https://doi.org/10.1111/jopr.13751

Hina, M., Leemani, M. J., Abdussalam, A., Shabbir, T., Devanagavi, V. S., Rana, S., Waris, N., Nazeer, R. M. A. P., Adnan, M. U., & Qureshi, A. A. M. S. (2026). Photogrammetry in full-arch implant rehabilitation: Accuracy, workflows, and clinical outcomes. *Saudi Journal of Oral and Dental Research, 11*(6). https://doi.org/10.36348/sjodr.2026.v11i06.005

Hussein, M. O. (2023). Photogrammetry technology in implant dentistry: A systematic review. *The Journal of Prosthetic Dentistry, 130*(3), 318–326. https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2021.09.015

Nedelcu, R., Olsson, P., Nyström, I., Rydén, J., & Thor, A. (2018). Accuracy and precision of 3 intraoral scanners and accuracy of conventional impressions: A novel in vivo analysis method. *Journal of Dentistry, 69*, 110–118. https://doi.org/10.1016/j.jdent.2017.12.006

Negreiros, W. M., Akhondi, S., Quiles, H. K., & Hamilton, A. (2025). Photogrammetry in implant dentistry. *Australian Dental Journal, 70*(S1). https://doi.org/10.1111/adj.70028

Pozzi, A., Arcuri, L., Lio, F., Papa, A., Nardi, A., & Londono, J. (2022). Accuracy of complete-arch digital implant impression with or without scanbody splinting: An in vitro study. *Journal of Dentistry, 119*, Article 104072. https://doi.org/10.1016/j.jdent.2022.104072

Pozzi, A., Laureti, A., Tawil, I., Chow, J., Azevedo, L., Fehmer, V., & Sailer, I. (2025). Intra oral photogrammetry: Trueness evaluation of novel technology for implant complete-arch digital impression in vitro. *Clinical Implant Dentistry and Related Research, 27*, Article e70049. https://doi.org/10.1111/cid.70049

Revilla-León, M., Att, W., Özcan, M., & Rubenstein, J. (2021). Comparison of conventional, photogrammetry, and intraoral scanning accuracy of complete-arch implant impression procedures evaluated with a coordinate measuring machine. *The Journal of Prosthetic Dentistry, 125*, 470–478.

Revilla-León, M., Cascos, R., Barmak, A. B., Drone, M., Kois, J. C., & Gómez-Polo, M. (2026a). Clinical accuracy of

complete arch implant scans recorded by using a noncalibrated splinting technique, intraoral photogrammetry, and extraoral photogrammetry with snap-on markers. *The Journal of Prosthetic Dentistry, 135*, 108.e1–108.e7. https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2025.09.012

Revilla-León, M., Cascos, R., Barmak, A. B., Kois, J. C., Alonso Pérez-Barquero, J., & Gómez-Polo, M. (2026b). Accuracy of intraoral photogrammetry and influence of calibrated implant scan body dimensions. *The Journal of Prosthetic Dentistry, 136*(2), 577–583. https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2026.05.006

Revilla-León, M., Cascos, R., Barmak, A. B., Kois, J. C., & Gómez-Polo, M. (2025). Alignment accuracy of soft tissue and implant position scans captured by using four intraoral scanners and an intraoral photogrammetry system with and without coded healing abutments. *The Journal of Prosthetic Dentistry, 134*, 1259.e1–1259.e10. https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2025.06.015

Revilla-León, M., Ghunaim, D., Barmak, A. B., Afshari, F. S., Fang, Q., & Prasad, S. (2026c). Accuracy of complete arch implant scans recorded by using calibrated scanning techniques: A systematic review and meta-analysis. Report of the Committee on Research in Fixed Prosthodontics of the American Academy of Fixed Prosthodontics. *The Journal of Prosthetic Dentistry, 135*(4), e28–e42. https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2025.11.029

Revilla-León, M., Rubenstein, J., Methani, M. M., Piedra-Cascón, W., Özcan, M., & Att, W. (2023). Trueness and precision of complete-arch photogrammetry implant scanning assessed with a coordinate-measuring machine. *The Journal of*

Prosthetic Dentistry, 129, 160–165. https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2021.05.019

Selvi, M. N., Dönmez, M. B., Demirel, M., & Diken Türksayar, A. A. (2026). Surface and linear scan accuracy of intraoral and extraoral photogrammetry systems: An in vitro study. *The Journal of Prosthetic Dentistry, 135*(4), 818.e1–818.e7. https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2025.12.001

Stefanović, M., Marković, A., Todorović, A., Lerner, H., Mangano, F. G., & Šćepanović, M. (2026). Clinical accuracy and short-term outcomes of intraoral photogrammetry for complete-arch implant rehabilitation: A retrospective multicentre study on 35 patients. *Journal of Dentistry, 174*, Article 106919. https://doi.org/10.1016/j.jdent.2026.106919

Ucer, C., Khan, R. S., & Jones, G. (2025). A novel intraoral optical scan-transfer device for full-arch implant reconstruction. *Dentistry Journal, 13*(3), Article 134. https://doi.org/10.3390/dj13030134

Zhang, Y. J., Qian, S. J., Lai, H. C., & Shi, J. Y. (2023). Accuracy of photogrammetric imaging versus conventional impressions for complete arch implant-supported fixed dental prostheses: A comparative clinical study. *The Journal of Prosthetic Dentistry, 130*, 212–218. https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2021.09.035

BÖLÜM 6

TAM ARK İMPLANT DESTEKLİ SABİT PROTEZLERDE DİJİTAL ÖLÇÜNÜN DOĞRULANMASI VE PASİF UYUMUN DEĞERLENDİRİLMESİ

Ethem Furkan HIDIR[1]

Giriş

Tam ark implant destekli sabit protezlerde dijital ölçünün amacı, implantların üç boyutlu konumunu restorasyonun tasarlanacağı ortama güvenilir biçimde aktarmaktır. Bununla birlikte tarama dosyasının elde edilmesi, tek başına üretilen protezin pasif uyumunu kanıtlamaz. Tarama, kütüphane eşleştirmesi, tasarım ve üretim aşamaları farklı hata kaynakları içerir. Bu nedenle dijital verinin doğruluğu ile restorasyonun ağız içindeki uyumu, ilişkili fakat ayrı değerlendirme alanlarıdır (Asavanant et al., 2025; Revilla-León et al., 2025).

Bu bölümde tam ark dijital implant ölçüleri, ölçü verisinin doğrulanması ve son restorasyonun pasif uyum kontrolü arasındaki ilişki anlatı derlemesi kapsamında ele alınmaktadır. Amaç, yöntemleri yalnızca sayısal sapmalarına göre sıralamak yerine, hangi

[1] Uzm. Dt., Fırat Üniversitesi, Diş Hekimliği Fakültesi, Protetik Diş Tedavisi Anabilim Dalı, ORCID: 0009-0007-0437-5036.

aşamada neyi değerlendirdiklerini açıklamak ve klinik araştırmalar ile laboratuvar bulgularını birlikte yorumlamaktır. İncelenen çalışmaların heterojenliği nedeniyle tek bir tarama veya doğrulama yönteminin bütün olgular için üstün olduğu varsayılmamaktadır.

Pasif uyum ve klinik anlamı

Pasif uyum, protezin implant veya abutment bağlantılarına ek uyumsuzluk gerilimi oluşturmadan oturmasını ifade eden biyomekanik bir hedeftir. Ancak bağlantı arayüzündeki açıklık, vidalar sıkıldıktan sonraki deformasyon ve hastada ortaya çıkabilecek komplikasyonlar aynı sonuç ölçütü değildir. Arayüzün kapalı görünmesi, sıkma sırasında oluşan gerilimin bulunmadığını tek başına göstermez (Abdelrehim et al., 2024; Pan et al., 2021).

Uyumsuzluğun vida komplikasyonları ve peri-implant dokular üzerindeki etkileri değerlendirilirken nedensellik konusunda dikkatli olunmalıdır. He ve arkadaşlarının sistematik derlemesinde yalnızca altı klinik çalışma yer almış; karıştırıcı değişkenlerin kontrolü sınırlı bulunmuştur. Daha fazla uyumsuzluk ile vida komplikasyonları arasında olası ilişki bildirilirken, peri-implant kemik kaybıyla açık ve tutarlı bir ilişki gösterilememiştir. Dolayısıyla her geometrik sapmanın kaçınılmaz olarak biyolojik başarısızlığa yol açacağı ileri sürülemez (He et al., 2026).

Klinik kabul edilebilirlik için evrensel bir mikrometre sınırı da bulunmamaktadır. Sapmanın yönü, konumu, destekler arasındaki dağılımı ve değerlendirme yöntemi sonuçların anlamını değiştirir. Literatürde kullanılan eşiklerin, çalışmanın materyali ve ölçüm yaklaşımı belirtilmeden genel bir kabul ölçütüne dönüştürülmesi uygun değildir (Abdelrehim et al., 2024).

Dijital doğruluk ile fiziksel uyumun ayrılması

Ölçüm doğruluğu (accuracy), gerçeğe yakınlık (trueness) ve kesinlik (precision) kavramlarıyla değerlendirilir. Gerçeğe yakınlık,

tekrarlı ölçümlerin ortalamasının referans değere yakınlığını; kesinlik ise aynı koşullarda yinelenen ölçümlerin birbirine yakınlığını ifade eder. Bir yöntem tekrarlanabilir sonuçlar üretirken sistematik konum hatası taşıyabilir. Ayrıca referans olarak kullanılan model veya tarama cihazının belirsizliği de karşılaştırmayı etkiler (Revilla-León et al., 2023; Revilla-León et al., 2026).

Üç boyutlu yüzeyler arasındaki kök ortalama kare (root mean square, RMS) sapması, farkları tek bir değerde özetler; ancak hatanın implantlar arasındaki dağılımını tek başına açıklamaz. Fu ve arkadaşları, sanal RMS sapmaları ile altyapıdaki en yüksek marjinal uyumsuzluk arasında ilişki bildirmiştir. Bu bulgu, sayısal verinin fiziksel uyumla ilişkili olabileceğini destekler; çalışmada kullanılan tarayıcılar ve model koşulları dışında aynı ilişkinin değişmeden süreceğini göstermez (Fu et al., 2025).

Ölçü verisinin doğrulanması, implant konumlarının doğru aktarılıp aktarılmadığını sorgular. Protez uyumunun değerlendirilmesi ise tasarım ve üretimin de eklendiği son ürünü inceler. Aynı tarama dosyasından üretilmiş iki modelin birbiriyle uyumlu olması, dosyanın ağız içindeki implant konumlarını doğru temsil ettiğine ilişkin bağımsız kanıt oluşturmaz. Bu ayrım, doğrulama işleminin amacını tanımlarken belirleyicidir (Wong et al., 2025).

Dijital ölçüde hata kaynakları

Tam dişsiz arklarda sabit anatomik referansların azlığı ve hareketli yumuşak dokular, ardışık görüntülerin birleştirilmesini zorlaştırabilir. İmplantlar arası uzaklık, implant tarama gövdesinin (scanbody) geometrisi ve görünür yüksekliği, tarama yolu ve operatör uygulaması sonuçları etkileyebilir. Bu değişkenler birbirinden bağımsız düşünülmemeli; tarayıcı ve yazılımın özellikleriyle birlikte değerlendirilmelidir (Revilla-León et al., 2023).

Scanbody verisinin doğru kaydedilmesi kadar, kaydın uygun dijital kütüphane bileşeniyle eşleştirilmesi de önemlidir. İmplant konumunun aktarılması, bağlantı seviyesinin ve kullanılan bileşenin doğru tanımlanmasını gerektirir. Ayrıntılı bir yüzey kaydı, yanlış kütüphane seçimini veya fiziksel bileşenin tam oturmamasını kendiliğinden düzeltmez. Bu nedenle bileşenin oturması, bağlantı seviyesi ve dijital eşleştirme aynı kayıt zincirinin parçaları olarak değerlendirilmelidir (Revilla-León & Kois, 2025; Revilla-León et al., 2023).

Üretim aşaması ayrıca değerlendirilmelidir. Asavanant ve arkadaşları, aynı deney düzeninde frezelenmiş ve üç boyutlu baskıyla üretilmiş doğrulama parçalarının farklı uyum sonuçları verdiğini göstermiştir. Bu bulgu, uyumsuzluğun her durumda tarama dosyasına bağlanamayacağını düşündürür. Dijital ölçü ile doğrulama parçası arasındaki süreçte tasarımın, üretim yönteminin ve bağlantı bileşenlerinin yapıştırılmasının etkisi bulunmaktadır (Asavanant et al., 2025).

Veri edinim yöntemleri ve doğrulama gereksinimi

Revilla-León ve arkadaşlarının (2025) sınıflamasında beş tarama tekniği tanımlanmıştır: splintleme yapılmayan yöntemler, kalibre edilmemiş splintleme, kalibre scanbody sistemleri, kalibre yapılar ve ters ölçü (reverse impression) yöntemleri. Bu sınıflama, implant konumlarının nasıl kaydedildiğini açıklar. Revilla-León ve Kois'in (2025) iş akışı sınıflaması ise implant konumlarına ek olarak yumuşak doku, diş konumu, karşıt ark ve çeneler arası ilişkinin kaydını ele alır. Böylece tarama tekniği ile protezin tasarımı için gereken bütün verilerin edinimi birbirinden ayrılır.

Yardımcı yapılar ve splintleme, tarayıcıya daha belirgin geometrik referanslar sağlayabilir. Ancak farklı materyal ve geometrilere sahip sistemlerin aynı etkiyi göstereceği kabul edilemez. Splintlenmiş ve splintlenmemiş scanbody düzeneklerini

karşılaştıran sistematik derleme ile standart scanbody, ScanTransfer ve splintlenmiş ScanTransfer bileşenlerini inceleyen araştırma, kullanılan düzeneklerin ayrı değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir (Alawawda et al., 2026; Andrade et al., 2026).

Aljumaili ve Cinar, doğrudan tarama, rezinle splintleme, üç boyutlu baskılı tarama yardımcıları ve ağız içi fotogrametriyi aynı modelde karşılaştırmıştır. Bulgular, yönteme göre doğrusal ve açısal sapmaların farklılaşabildiğini göstermiştir. Bu nedenle tek bir sonuç değişkenindeki iyileşme, bütün doğruluk boyutlarında veya nihai protez uyumunda eşdeğer kazanç olarak yorumlanmamalıdır (Aljumaili & Cinar, 2026).

Fotogrametri ve dijital kayıtların birleştirilmesi

Fotogrametri, implantlara bağlanan işaretleyiciler aracılığıyla implant konumlarını kaydetmeye yönelik bir veri edinim yaklaşımıdır. İmplant konumlarının elde edilmesi ile yumuşak dokuların ve oklüzal ilişkinin kaydı farklı işlemlerdir. Bu nedenle protez tasarımı için veri setlerinin ortak referanslar üzerinden birleştirilmesi gerekir. Revilla-León ve Kois'in (2025) tanımladığı iş akışlarında bu referanslar; mevcut dişler, referans işaretleyicileri, sabitleme referansları, scanbody bileşenleri, yardımcı aygıtlar veya geçici restorasyonlar olabilir.

Revilla-León ve arkadaşlarının (2026) sistematik derlemesi, kalibre scanbody sistemleri, ağız içi fotogrametri ve kalibre yapıların doğruluğunu birlikte incelemiştir. Buradaki kalibre teknik kavramı, kullanılan tarayıcının rutin kalibrasyonundan farklı olarak belirli ölçüm bileşenlerini ve sistemlerini tanımlar. Prasad ve arkadaşlarının (2026) ağız dışı teknikleri değerlendiren derlemesinde ise ters ölçüye ilişkin çalışma sayısı fotogrametri çalışmalarından daha azdır. Bu durum, yöntemlere ilişkin sonuçların aynı kanıt yoğunluğuna dayanmadığını göstermektedir.

Reverse scanbody iş akışları

Ters tarama gövdesi (reverse scanbody) yaklaşımında mevcut geçici restorasyon, implant konumlarının ağız dışında aktarılmasına aracılık eder. Restorasyon ağızdan çıkarıldıktan sonra ters tarama gövdeleri restorasyonun bağlantı yüzeylerine bağlanır ve bu bütün taranır. Başlangıç restorasyonunun uyumu bu nedenle önemlidir; hatalı bir restorasyon referans alındığında hatanın sonraki kayıtlara taşınması olasıdır. Nuytens ve arkadaşlarının karşılaştırması, bu iş akışında kullanılan tarayıcının da sonuçları etkileyebileceğini göstermektedir (Nuytens et al., 2023).

Tarama yolu, ağız dışında gerçekleştirilen işlemlerde de önemini korur. Papaspyridakos ve arkadaşlarının prototip çalışması farklı tarama yollarının uyuma etkisini incelemiştir. Bu nedenle reverse tekniğin yalnızca restorasyonun çıkarılıp taranmasından oluşan, cihazdan ve işlem sırasından bağımsız bir yöntem gibi tanımlanması eksik kalır (Papaspyridakos et al., 2023).

Otuz hastayı kapsayan retrospektif çalışmada, reverse scanbody iş akışı ve doğrulama aşamaları kullanılarak üretilen zirkonya restorasyonların klinik ve radyografik uyumu uygun bulunmuştur. Bununla birlikte kontrol grubu bulunmayan bu araştırma, bütün alternatiflere karşı üstünlük göstermez. Kilicaslan Dasdelen ve arkadaşlarının model çalışması da standart ve reverse protokollerinin sonuçlarının implant sayısı ve çene konfigürasyonuyla birlikte yorumlanması gerektiğini göstermektedir (Kilicaslan Dasdelen et al., 2026; Papaspyridakos et al., 2026).

Doğrulama jigleri ve üretim yöntemi

Doğrulama jigleri, implant konumlarının modele veya dijital iş akışına aktarılmasındaki uyumsuzlukları araştırmak için kullanılan, implant bağlantılarını birbirine bağlayan kontrol parçalarıdır. Analog ve dijital yöntemler karşılaştırılırken

doğrulanmak istenen kayıt ile kontrol aracının hangi veriden üretildiği açıklanmalıdır. Kontrolün aynı hatayı yeniden üretip üretmediği sorgulanmalı; jig kendiliğinden hatasız bir referans kabul edilmemelidir (Pan et al., 2021; Wong et al., 2025).

Fotogrametriyle ilişkili dijital iş akışında tasarlanıp frezelenen jiglerin kullanımı klinik olgu düzeyinde de tanımlanmıştır. Bu yayınlar yöntemin uygulanabilirliğini gösterir; klinik başarı oranlarının belirlenmesi için karşılaştırmalı araştırmaların yerine geçmez. Materyalin rijitliği, parçanın geometrisi ve bağlantıların oluşturulması, aracın hangi tür uyumsuzlukları gösterebileceğini etkileyen unsurlardır (Sinada & Papaspyridakos, 2021).

Asavanant ve arkadaşlarının deneyinde frezelenmiş doğrulama parçaları, baskılı parçalardan daha iyi uyum göstermiştir. Bu sonuç, incelenen materyal ve üretim koşullarıyla sınırlıdır. Nagai ve arkadaşları ise yalnızca dişleri yerine koyan FP-1 ve dişlerle birlikte diş eti dokusunu da yerine koyan FP-3 protez tiplerini model üzerinde karşılaştırmıştır. Gruplar arasında istatistiksel olarak anlamlı fark bulunmamasına rağmen her grupta uyumsuz örnekler görülmüştür. Bu sonuçlar, yöntem seçiminin tek başına pasif uyum garantisi sağlamadığını düşündürmektedir (Asavanant et al., 2025; Nagai et al., 2025).

Klinik uyum değerlendirmesi

Pasif uyumun klinik kontrolünde tek bir bulguya dayanmak yerine birbirini tamamlayan değerlendirmelerin birlikte kullanılması daha açıklayıcıdır. Görsel ve dokunsal inceleme arayüzdeki açıklığı veya oturma sorununu gösterebilir; tek vida testi ise bağlantıların birlikte oturma davranışını incelemeye yardımcı olur. Radyografik değerlendirme, uygun projeksiyon elde edildiğinde erişimi sınırlı arayüzleri destekleyici biçimde değerlendirebilir. Yöntemlerin

ölçtüğü sonuçlar ve sınırları Tablo 1'de özetlenmiştir (Figueras-Alvarez et al., 2021).

Tablo 1 Uyum değerlendirme yöntemlerinin katkıları ve sınırlılıkları

Yöntem	**Değerlendirdiği özellik**	**Başlıca sınırlılık**
Görsel ve dokunsal inceleme	Arayüz açıklığı, oturma ve sallanma bulguları	Erişim, gözlemci ve dokuların görünürlüğüne bağımlıdır.
Tek vida testi	Bir bağlantı sabitlenince diğer bağlantıların oturma davranışı	Test noktası, materyal esnekliği ve temaslar sonucu etkileyebilir.
Vida direnci değerlendirmesi	Sıkma sırasında gözlenen oturma davranışı	Vida ön yükü açıklığı maskeleyebilir; tek başına gerilimsizliği kanıtlamaz.
Radyografik inceleme	Görüntülenebilen bağlantı arayüzlerindeki açıklık	Projeksiyon bağımlıdır; bütün üç boyutlu sapmaları göstermez.
Sayısal sapma analizi	Referansa göre doğrusal, açısal veya yüzeysel farklar	Referans ve eşleştirme yöntemine bağımlıdır; klinik uyumla eşdeğer değildir.

Kaynak: Figueras-Alvarez et al. (2021), Fu et al. (2025) ve Pan et al. (2021) esas alınarak bu bölüm için oluşturulmuştur.

Sheffield testinde, diğer vidalar gevşek bırakılırken tek bir vida üzerinden protezin oturma davranışı değerlendirilir. Bütün vidaların sıkılması ise protezi bağlantılara doğru çekerek arayüz açıklığını maskeleyebilir. Bu nedenle vidaların sıkılmasıyla açıklığın kaybolması tek başına pasif oturma olarak yorumlanmamalıdır. Testin hangi bağlantıdan yapıldığı, diğer vidaların durumu ve neyin uyumsuzluk kabul edildiği açıklanmalıdır (Figueras-Alvarez et al., 2021; Pan et al., 2021).

Klinik bir araştırmada kullanılan değerlendirme yöntemi sonuç oranlarını doğrudan etkileyebilir. Harfagar ve arkadaşları

dijital ve konvansiyonel ölçülerde aynı pasif uyum oranını bildirmiştir. Buna karşılık farklı model araştırmalarında kullanılan jig materyali, üretim yolu ve kabul ölçütleri değişmektedir. Bu nedenle farklı çalışmalardaki uyum yüzdelerinin tek bir başarı sıralaması gibi karşılaştırılması yanıltıcı olabilir (Harfagar et al., 2025; Nagai et al., 2025).

Güncel araştırmaların birlikte yorumlanması

Doğrulama literatürü yorumlanırken tarama sayısı, model sayısı ve hasta sayısı ayrılmalıdır. Aynı modelden alınan tekrarlı taramalar, yöntemin tekrarlanabilirliğini incelemeye yardımcı olur; farklı klinik anatomilerin temsil edildiği anlamına gelmez. Benzer biçimde düşük RMS, her bağlantıda düşük açıklık veya düşük gerilim bulunduğunu tek başına göstermez. Klinik değerlendirme yöntemlerinin model üzerinde kullanılması da araştırmayı klinik hasta çalışmasına dönüştürmez. Tablo 2, seçilmiş araştırmaları bu ayrımlar üzerinden karşılaştırmaktadır (Fu et al., 2025; Kilicaslan Dasdelen et al., 2026).

Tablo 2 Seçilmiş güncel araştırmaların doğrulama açısından karşılaştırılması

Araştırma	**Tasarım**	**Doğrulama açısından katkı ve yorum sınırı**
(Asavanant et al., 2025)	İn vitro; 60 doğrulama parçası	Frezelenmiş ve baskılı parçaların uyumu farklıdır. Sonuç tarama kadar üretim yöntemini de yansıtır.
(Nagai et al., 2025)	İn vitro; 40 frezelenmiş parça	FP-1 ve FP-3 modelleri incelenmiştir. Her grupta uyumsuz örnek bulunması yöntem seçiminin tek başına yeterli olmadığını gösterir.
(Kilicaslan Dasdelen et al., 2026)	İn vitro; 80 tarama veri seti ve 80 jig	Standart ve reverse protokolleri, sayısal sapma ve model üzerindeki jig uyumuyla değerlendirilmiştir. Hasta çalışması değildir.

Araştırma	Tasarım	Doğrulama açısından katkı ve yorum sınırı
(Harfagar et al., 2025)	Prospektif; aynı 20 katılımcıda iki yöntem	Her iki yöntemde 17/20 (%85) pasif uyum bildirilmiştir. Sonuç, kullanılan Sheffield testine ve iş akışına aittir.
(Fu et al., 2025)	İn vitro; dört ana model	Sanal sapma ile fiziksel altyapı uyumsuzluğu ilişkilendirilmiştir. Önerilen eşik sistemler arasında genellenemez.
(Papaspyridakos et al., 2026)	Retrospektif; 30 hasta	Doğrulama aşamaları içeren reverse iş akışında uygun restorasyon uyumu bildirilmiştir. Karşılaştırma grubu yoktur.

Kaynak: Tabloda belirtilen araştırmalar esas alınarak bu bölüm için oluşturulmuştur. Örnek sayıları farklı analiz birimlerini temsil eder.

Klinik iş akışı için bütünleşik değerlendirme

Mevcut literatür doğrultusunda kontrol süreçleri üç aşamada ele alınabilir: veri edinimi sırasında tarama bileşenlerinin ve tarama işleminin doğruluğunun değerlendirilmesi, kesin restorasyonun üretimi öncesinde kaydedilen implant konumlarının doğrulama jigleriyle kontrol edilmesi ve üretilmiş restorasyonun ağız içi uyumunun klinik ve gerektiğinde radyografik yöntemlerle değerlendirilmesi (Figueras-Alvarez et al., 2021; Mizumoto et al., 2020; Rosmaninho et al., 2024). Bu bölümde önerilen üç aşamalı düzen, ilgili literatürde açıklanan yöntemleri amaçlarına göre bir araya getiren bir sentezdir; klinik olarak doğrulanmış bir karar algoritması veya her hastaya uygulanması gereken zorunlu bir protokol değildir.

İlk aşamada kullanılan bağlantı seviyesi, scanbody ve kütüphane uyumu, tarama kapsamı ve referansların sürekliliği değerlendirilir. İkinci aşamada doğrulama gereksinimi, kullanılan yöntemin kanıtları ve olgunun özellikleriyle birlikte ele alınır. Üçüncü aşamada son ürün, ölçü verisinden bağımsız üretim

hatalarının da bulunabileceği dikkate alınarak incelenir. Bu sıralama, sorunun hangi aşamada ortaya çıkmış olabileceğini araştırmaya yardımcı olabilir (Revilla-León & Kois, 2025; Revilla-León et al., 2023).

Uyumsuzluk saptandığında yalnız tekrar tarama yapmak yerine sorunun kapsamı belirlenmelidir. Bileşenin oturması, veri eşleştirmesi, jig üretimi veya restorasyonun oturmasını engelleyen temaslar farklı nedenlerdir. Kontrol aracının kendisindeki hata ile ölçü verisindeki hatanın ayrılması, aynı işlemin gereksiz tekrarını önlemek açısından önemlidir. Kayıtlarda kullanılan sistem, yazılım, materyal ve değerlendirme yöntemi açıkça belirtilmelidir (Andrade et al., 2026; Nuytens et al., 2023).

Kanıtların sınırlılıkları ve araştırma gereksinimleri

Mevcut literatürde model çalışmaları, teknik tanımlamalar ve sınırlı sayıdaki klinik araştırmalar birlikte yer almaktadır. Bu nedenle laboratuvarda saptanan doğruluk farklarının uzun dönem klinik yarara doğrudan dönüştüğü varsayılamaz. Gelecek araştırmalar, tarama doğruluğu ile bağlantı düzeyindeki uyumsuzluğu, değerlendirmeciler arası tutarlılığı ve uzun dönem komplikasyonları aynı tasarım içinde ilişkilendirmelidir. Maliyet, işlem süresi ve yeniden üretim gereksiniminin raporlanması da doğrulama yöntemlerinin pratik değerini açıklayabilir (He et al., 2026; Pan et al., 2021).

Sonuç

Tam ark dijital implant ölçülerinde güvenilirlik, veri ediniminden restorasyonun ağız içi değerlendirmesine uzanır. Tarama yardımcıları, fotogrametri, reverse scanbody yöntemleri ve doğrulama jigleri farklı aşamalara katkı sağlar. Ölçü doğruluğu ve son protezin pasif uyumu ayrı sorgulanmalı; kontrol aracının kendi hataları ve mevcut kanıtların sınırları dikkate alınmalıdır.

Kaynakça

Abdelrehim, A., Etajuri, E. A., Sulaiman, E., Sofian, H., & Salleh, N. M. (2024). Magnitude of misfit threshold in implant-supported restorations: A systematic review. *The Journal of Prosthetic Dentistry, 132*(3), 528–535. https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2022.09.010

Alawawda, O., Yeşil, Z., Sakarya, R. E., Haoran, M. A., & Yeşil, Ç. (2026). Trueness of complete arch intraoral implant scans using splinted and non-splinted scan bodies: A systematic review and meta-analysis. *The Journal of Prosthetic Dentistry, 136*(2), e104–e114. https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2026.04.028

Aljumaili, L., & Cinar, İ. C. (2026). Evaluation of four digital methods in capturing complete-arch implant positions: Direct scanning, splinted scan bodies, three-dimensional-printed scan aids, and intraoral photogrammetry. *Journal of Prosthodontics*. Advance online publication. https://doi.org/10.1111/jopr.70213

Andrade, N. R., González, M. I. A., Mosaddad, S. A., Revilla-León, M., & Gómez-Polo, M. (2026). Accuracy of complete-arch digital implant impressions using conventional scanbodies, ScanTransfers, and splinted ScanTransfers: An in vitro study. *BMC Oral Health, 26*(1), 532. https://doi.org/10.1186/s12903-026-07948-w

Asavanant, N., Yang, C.-C., AlQallaf, H., Zandinejad, A., Morton, D., Nagai, T., & Lin, W.-S. (2025). Effects of complete-arch digital scanning techniques on the passive fit of CAD-CAM verification devices. *Journal of Prosthodontics, 34*(7), 741–748. https://doi.org/10.1111/jopr.14084

Figueras-Alvarez, O., Cantó-Navés, O., Real-Voltas, F., & Roig, M. (2021). Protocol for the clinical assessment of passive fit for multiple implant-supported prostheses: A dental technique. *The Journal of Prosthetic Dentistry, 126*(6), 727–730. https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2020.10.001

Fu, X.-J., Liu, M., Shi, J.-Y., Deng, K., Lai, H.-C., Gu, W., & Zhang, X.-M. (2025). Comparison of different intraoral scanners with prefabricated aid on accuracy and framework passive fit of digital complete-arch implant impression: An in vitro study. *Clinical Oral Implants Research, 36*(1), 17–27. https://doi.org/10.1111/clr.14353

Harfagar, G., Solis, S., Hernandez, M., Fehmer, V., Sailer, I., & Azevedo, L. (2025). Trueness and passivity of digital and conventional implant impressions in edentulous jaws: A prospective clinical study. *Clinical Implant Dentistry and Related Research, 27*(2), e70022. https://doi.org/10.1111/cid.70022

He, Z., Bennani, V., Aarts, J. M., Choi, J. J. E., & Veerasamy, A. (2026). Clinical implications of misfit in multiunit implant-supported fixed dental prostheses: A systematic review. *Journal of Prosthodontics*. Advance online publication. https://doi.org/10.1111/jopr.70231

Kilicaslan Dasdelen, R., Leblebicioglu Kurtulus, I., & Kilic, K. (2026). Accuracy and clinical passive fit of reverse and standard scan body protocols for complete-arch implant-supported digital impressions: An in vitro study. *Journal of Prosthodontics*. Advance online publication. https://doi.org/10.1111/jopr.70241

Mizumoto, R. M., Yilmaz, B., McGlumphy, E. A., Jr., Seidt, J., & Johnston, W. M. (2020). Accuracy of different digital scanning techniques and scan bodies for complete-arch implant-supported prostheses. *The Journal of Prosthetic Dentistry, 123*(1), 96–104. https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2019.01.003

Nagai, T., Kuroda, Y., Asavanant, N., Yang, C.-C., Morton, D., & Lin, W.-S. (2025). Influence of prosthesis type and intraoral scanner-based extraoral scanning protocol on the passive fit of CAD-CAM verification devices. *Journal of Prosthodontics*. Advance online publication. https://doi.org/10.1111/jopr.14097

Nuytens, P., Vandeweghe, S., & D'haese, R. (2023). Accuracy of a chairside reverse scanbody workflow for a complete arch implant-supported prosthesis using four intraoral scanners versus a desktop scanner. *Journal of Dentistry, 138*, 104717. https://doi.org/10.1016/j.jdent.2023.104717

Pan, Y., Tsoi, J. K. H., Lam, W. Y. H., & Pow, E. H. N. (2021). Implant framework misfit: A systematic review on assessment methods and clinical complications. *Clinical Implant Dentistry and Related Research, 23*(2), 244–258. https://doi.org/10.1111/cid.12968

Papaspyridakos, P., Bedrossian, E. A., Kanikicharla, S., Ntovas, P., Barmak, A. B., & Chochlidakis, K. (2026). Reverse scan body: A retrospective clinical study with 30 edentulous jaws. *Journal of Prosthodontics, 35*(1), 47–53. https://doi.org/10.1111/jopr.70055

Papaspyridakos, P., Bedrossian, E. A., Ntovas, P., Kudara, Y., Bokhary, A., & Chochlidakis, K. (2023). Reverse scan body: The scan pattern affects the fit of complete-arch prototype prostheses. *Journal of Prosthodontics, 32*(S2), 186–191. https://doi.org/10.1111/jopr.13772

Prasad, S., Barmak, A. B., & Revilla-León, M. (2026). A systematic review and meta-analysis of the accuracy of complete arch implant scanning techniques performed extraorally: Reverse impression and extraoral photogrammetry methods. Report of the Committee on Research in Fixed Prosthodontics of the American Academy of Fixed Prosthodontics. *The Journal of Prosthetic Dentistry, 136*(1), e79–e101. https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2026.01.018

Revilla-León, M., Ghunaim, D., Barmak, A. B., Afshari, F. S., Fang, Q., & Prasad, S. (2026). Accuracy of complete arch implant scans recorded by using calibrated scanning techniques: A systematic review and meta-analysis. Report of the Committee on Research in Fixed Prosthodontics of the American Academy of Fixed Prosthodontics. *The Journal of Prosthetic Dentistry, 135*(4), e28–e42. https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2025.11.029

Revilla-León, M., Gómez-Polo, M., Rutkunas, V., Ntovas, P., & Kois, J. C. (2025). Classification of complete-arch implant scanning techniques recorded by using intraoral scanners. *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry, 37*(1), 236–243. https://doi.org/10.1111/jerd.13322

Revilla-León, M., & Kois, J. C. (2025). Implant scanning workflows for fabricating implant-supported prostheses recorded by using intraoral scanners with or without photogrammetry technologies. *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry, 37*(6), 1384–1391. https://doi.org/10.1111/jerd.13431

Revilla-León, M., Lanis, A., Yilmaz, B., Kois, J. C., & Gallucci, G. O. (2023). Intraoral digital implant scans: Parameters to improve accuracy. *Journal of Prosthodontics, 32*(S2), 150–164. https://doi.org/10.1111/jopr.13749

Rosmaninho, A., Vedovato, E., Kois, J. C., & Revilla-León, M. (2024). Altered reverse impression method involving extraoral digitalization of a verification jig for the fabrication of implant-supported prosthesis by using a complete-digital workflow. *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry, 36*(4), 566–572. https://doi.org/10.1111/jerd.13157

Sinada, N., & Papaspyridakos, P. (2021). Digitally designed and milled verification jigs generated from photogrammetry data acquisition: A clinical report. *Journal of Prosthodontics, 30*(8), 651–655. https://doi.org/10.1111/jopr.13409

Wong, A. W. H., Nedelcu, R., & Hamilton, A. (2025). Clinical recommendations for implant verification jigs in analogue and digital workflows. A narrative review. *Australian Dental Journal, 70*(S1), S35–S49. https://doi.org/10.1111/adj.70025

BÖLÜM 7

CURRENT AND NEXT-GENERATION DENTAL IMPLANT ABUTMENT MATERIALS: CLINICAL PERFORMANCE AND MATERIAL SELECTION

ELİF YEĞİN[1]
BAŞAK BURCU KÖMÜRATEŞ[2]

Introduction

The clinical success of implant-supported restorations depends on several factors, including peri-implant tissue health, mechanical stability, and esthetic outcomes. Implant abutments play an important role in these aspects by connecting the implant to the prosthetic restoration and interacting with the surrounding peri-implant soft tissues (Shah & Sivaswamy, 2023). Therefore, abutment material selection should consider the mechanical, biological, and esthetic requirements of each clinical situation.

Titanium and its alloys have been widely used for implant abutments due to their favorable mechanical properties, corrosion resistance, and biocompatibility (Gomes & Montero, 2011; Hanawa,

[1] Assoc. Prof. Dr., Istanbul Medeniyet University, Faculty of Dentistry, Department of Prosthodontics, ORCID: 0000-0002-2865-372X
[2] Res. Asst., Istanbul Medeniyet University, Faculty of Dentistry, Department of Prosthodontics, ORCID: 0009-0001-3637-0332

2020). However, the gray color of titanium may cause visible discoloration of the peri-implant mucosa, particularly in the anterior region when the soft tissue is thin (Gomes & Montero, 2011; Totou et al., 2021). This esthetic limitation has contributed to the development of ceramic abutments, initially using aluminum oxide (alumina) and subsequently zirconia, particularly yttria-stabilized tetragonal zirconia polycrystal (Y-TZP) (Gomes & Montero, 2011; Turkoglu et al., 2019).

Although metallic and ceramic abutments have demonstrated favorable clinical performance, each material has certain limitations. Hybrid abutments incorporating titanium bases and ceramic components have been developed to combine the mechanical properties of titanium with the esthetic advantages of ceramics (Moreno et al., 2023; Mostafavi et al., 2021). In addition, polymeric materials, including polymethyl methacrylate (PMMA), polyetheretherketone (PEEK), and reinforced PEEK-based composites such as BioHPP, have been investigated for provisional and other implant-supported prosthetic applications (Al-Mohammad et al., 2025; Herráez-Galindo et al., 2022; Reda et al., 2022). Surface modification techniques, such as photofunctionalization and antimicrobial coatings, are also being studied to improve the biological properties of implant abutment materials (Odatsu et al., 2020; Rehner et al., 2025; Suzumura et al., 2023; Tuna et al., 2015; Yang et al., 2020).

This chapter reviews the mechanical, biological, and esthetic properties of metallic, ceramic, and polymeric implant abutment materials, with an emphasis on their clinical applications and limitations. It also discusses recent developments in surface modification and manufacturing technologies to support material selection in implant prosthodontics.

Metal Abutments

Metallic abutments have been widely used in implant-supported prosthetic restorations since the early development of implant dentistry (Gomes & Montero, 2011). Materials used for metallic abutments and implant-supported superstructures include noble alloys (gold- or palladium-based), base-metal alloys (such as Ni-Cr and Co-Cr), commercially pure titanium, and titanium alloys (Bortagaray et al., 2016).

The use of base-metal alloys, particularly Ni-Cr and Co-Cr, in combination with titanium implants is generally discouraged because of their higher susceptibility to corrosion (Bortagaray et al., 2016). In addition, contact between dissimilar metals in the oral environment may lead to galvanic corrosion, since titanium is electrochemically more noble than Ni-Cr alloys (Ozkomur et al., 2013), and the metal ions released through corrosion may cause toxicity and sensitization reactions (Bortagaray et al., 2016).

Among metallic abutment materials, titanium and gold alloys remain established options, with material selection depending on the mechanical, biological, and clinical requirements of each case.

Titanium Abutments

Titanium is one of the most widely used materials for implant abutments due to its long-term clinical reliability, corrosion resistance, and favorable mechanical properties (Halim et al., 2022; Hanawa, 2020). Its high fracture resistance and fatigue strength make it particularly suitable for restorations subjected to high occlusal forces (Halim et al., 2022; Hanawa, 2020). In addition to its mechanical properties, titanium exhibits excellent biocompatibility and supports peri-implant soft tissue attachment to a degree comparable to zirconia (Hanawa, 2020). Titanium has also demonstrated favorable osseointegration properties, with some studies reporting a greater osteogenic response compared to untreated zirconia surfaces (Hanawa, 2020).

Despite these advantages, the gray color of titanium may cause visible discoloration of the surrounding peri-implant mucosa, particularly in the anterior region when the soft tissue is thin (Gomes & Montero, 2011). To address this esthetic limitation, anodic oxidation (anodization) has been introduced as a surface modification technique. This electrochemical process increases the thickness of the titanium oxide layer, producing different surface colors, commonly gold and pink, through optical interference (Seyidaliyeva et al., 2022). Gold anodization may improve the esthetic appearance of ceramic restorations by reducing the visibility of the underlying gray metal (Khorshidi et al., 2024; Martínez-Rus et al., 2017). Similarly, pink anodization may reduce grayish discoloration of the peri-implant mucosa, particularly in patients with thin soft tissues (Bittner et al., 2020; Gil et al., 2017, 2019; Miranda et al., 2025).

A split-mouth clinical study with an 18-month follow-up found no significant differences in pink esthetic score, recession, probing depth, plaque, or bleeding between pink-anodized and conventional titanium abutment collars (Farrag & Khamis, 2023). Moreover, the esthetic improvements associated with anodization do not necessarily indicate superior biological performance (Miranda et al., 2025). Therefore, anodization may be considered a useful approach for improving the esthetic properties of titanium abutments, although zirconia may still be preferred in certain clinical situations with high esthetic demands (Miranda et al., 2025).

Gold Alloy Abutments

Gold alloys have been used in implant dentistry due to their corrosion resistance and favorable biocompatibility, with a relatively low risk of allergic reactions and soft tissue irritation (Minotti & Maesano, 2025).

Cast gold UCLA-type abutments have demonstrated screw joint stability comparable to CAD/CAM titanium abutments in vitro (Park et al., 2014) and have been used successfully in single-implant restorations over a 4-year follow-up (Vigolo et al., 2006). However, their use in contemporary clinical practice has decreased, primarily due to their high cost and the availability of alternative materials. In addition, a human histological pilot study reported greater inflammatory responses and less favorable peri-implant soft tissue attachment around gold alloy abutments compared to titanium abutments (Sampatanukul et al., 2018).

Ceramic Abutments

Ceramic materials have been increasingly used in implant dentistry to improve esthetic outcomes and provide favorable peri-implant soft tissue responses (Totou et al., 2021). Ceramic abutments were introduced as an alternative to metallic abutments, particularly to reduce the grayish discoloration of peri-implant mucosa associated with titanium in patients with thin soft tissues. Their tooth-like color provides an esthetic advantage, especially in the anterior region (Gomes & Montero, 2011; Totou et al., 2021).

The main advantages of ceramic abutments include good biocompatibility, corrosion resistance, and relatively low bacterial plaque accumulation (Mobilio et al., 2016; Turkoglu et al., 2019). In addition, their favorable optical properties may improve the esthetic appearance of implant-supported restorations and the surrounding soft tissues, particularly in the anterior maxilla (Gomes & Montero, 2011; Turkoglu et al., 2019).

Despite these advantages, ceramic materials have certain mechanical limitations. Their brittle nature and limited capacity for plastic deformation make them susceptible to fracture under tensile and bending stresses. Structural defects and repeated occlusal loading may further increase the risk of fracture (Agustín-Panadero

et al., 2019; Gomes & Montero, 2011). The mechanical performance of ceramic abutments depends on their composition, crystalline structure, and manufacturing method. Advances in CAD/CAM technology have contributed to improvements in the fabrication accuracy and mechanical reliability of ceramic abutments (Turkoglu et al., 2019).

Alumina Abutments

Aluminum oxide (alumina) was one of the first ceramic materials used for implant abutments to reduce peri-implant mucosal discoloration associated with metallic components (Gomes & Montero, 2011; Turkoglu et al., 2019). Alumina provides favorable esthetic properties due to its tooth-like color. However, its clinical use is limited by its mechanical properties, particularly its relatively low fracture toughness (Mobilio et al., 2016). Accordingly, alumina abutments have shown lower fracture strength than zirconia abutments in vitro (Gomes & Montero, 2011; Turkoglu et al., 2019). Consequently, alumina abutments have largely been replaced by yttria-stabilized tetragonal zirconia polycrystal (Y-TZP) abutments, which offer higher fracture resistance while maintaining favorable esthetic and biological properties (Mobilio et al., 2016; Turkoglu et al., 2019).

Zirconia Abutments

Zirconia, particularly yttria-stabilized tetragonal zirconia polycrystal (Y-TZP), has become widely used as an implant abutment material due to its favorable esthetic properties (Totou et al., 2021). Its tooth-like white color may reduce the grayish discoloration of peri-implant mucosa associated with titanium abutments, particularly in the anterior region (Al-Mohammad et al., 2025; Totou et al., 2021). The esthetic outcome is also influenced by peri-implant soft tissue thickness. In patients with thin peri-implant mucosa, the underlying abutment material may have a greater effect

on soft tissue color, making zirconia a suitable option for minimizing discoloration (Lops et al., 2017). In contrast, when soft tissue thickness exceeds 3 mm, the influence of abutment material on mucosal color becomes less pronounced (Halim et al., 2022).

In addition to its esthetic properties, zirconia exhibits good biocompatibility and favorable peri-implant soft tissue responses, with relatively low bacterial biofilm accumulation reported in some studies (Hanawa, 2020; Wiessner et al., 2023). A human histological study reported soft tissue attachment around zirconia abutments comparable to that around titanium and more favorable than that around gold alloy abutments (Sampatanukul et al., 2018). Some studies have also reported slightly lower bleeding on probing (BOP) and higher pink esthetic scores around zirconia abutments than around titanium abutments (Halim et al., 2022), although meta-analyses have found no significant differences in probing depth, BOP, or papillary index between the two materials (Al-Mohammad et al., 2025; Laleman et al., 2023). Although a tendency toward greater plaque accumulation around titanium abutments has been reported (Halim et al., 2022), available clinical evidence suggests that both materials provide comparable long-term outcomes, with no consistent significant differences in marginal bone loss or implant survival rates over follow-up periods of up to five years (Al-Mohammad et al., 2025; Laleman et al., 2023).

Despite these advantages, zirconia abutments have certain mechanical limitations. Their high hardness may cause greater deformation and wear of the implant–abutment connection than titanium abutments (Nam et al., 2018), and their brittleness limits their use in regions subjected to high occlusal forces (Halim et al., 2022).

Hybrid (Titanium-Base) Abutments

Hybrid abutments have been introduced to combine the mechanical advantages of titanium with the esthetic properties of ceramic materials. These abutments consist of a prefabricated titanium base that connects to the implant and a customized ceramic component, usually made of zirconia or lithium disilicate, which is bonded to the titanium base using resin cement. This design provides a titanium interface at the implant–abutment connection, while the ceramic component allows customization of the emergence profile and improves the esthetic appearance of the restoration (Moreno et al., 2023; Mostafavi et al., 2021).

In vitro studies have reported favorable mechanical performance of hybrid abutments. In one study, monolithic zirconia and lithium disilicate crowns supported by zirconia hybrid abutments on titanium bases withstood 1.5 million chewing-simulation cycles without screw loosening or failure, and implant-supported specimens showed fracture loads exceeding 2,200 N after fatigue (Nawafleh et al., 2021). Because the titanium base forms the implant–abutment interface, hybrid designs may also avoid the greater connection wear associated with one-piece zirconia abutments (Nam et al., 2018). Furthermore, extraoral cementation of the ceramic component to the titanium base allows excess cement to be removed before placement, potentially reducing the risk of cement-related peri-implant complications (Moreno et al., 2023).

The use of hybrid abutments has been facilitated by advances in CAD/CAM technology, which allow the fabrication of customized ceramic components compatible with prefabricated titanium bases (Moreno et al., 2023). The retention of the ceramic component depends on several factors, including the restorative material, the dimensions of the titanium base, and the type of luting cement. Resin-based cements have been reported to provide the most favorable bonding (Moreno et al., 2023), and in vitro findings have shown that retention is influenced by both the restorative material

and the titanium base height, with lithium disilicate showing higher retention than zirconia (Alseddiek et al., 2023). Overall, hybrid abutments represent a suitable treatment option when both mechanical reliability and favorable esthetic outcomes are required.

Polymeric Biomaterials

Polymeric materials have been investigated as alternatives to conventional metallic and ceramic implant abutments due to their favorable biocompatibility and chemical stability (Blanch-Martínez et al., 2021; Papathanasiou et al., 2020). Their relatively low elastic modulus may influence stress distribution within the implant–abutment complex and surrounding bone. In addition, their radiolucency may reduce imaging artifacts in certain radiographic examinations compared to metallic materials (Bathala et al., 2019; Blanch-Martínez et al., 2021; Papathanasiou et al., 2020). However, many polymeric materials exhibit lower mechanical strength and fatigue resistance than conventional metallic and ceramic materials, which may limit their use in definitive restorations. Therefore, they are primarily used for healing abutments and provisional restorations (Blanch-Martínez et al., 2021; Herráez-Galindo et al., 2022). Recent research has focused on improving the mechanical properties of polymer-based materials through reinforcement techniques to expand their potential applications in definitive implant-supported restorations (Bruno et al., 2023; Gazo et al., 2024).

Polymethyl Methacrylate (PMMA) Abutments

Polymethyl methacrylate (PMMA) is widely used in prosthetic dentistry and has also been used for the fabrication of provisional implant abutments and restorations (Herráez-Galindo et al., 2022).

Experimental studies have demonstrated favorable human gingival fibroblast responses to PMMA surfaces (Herráez-Galindo et al., 2019; Rizo-Gorrita et al., 2019).

Despite these biological advantages, PMMA has mechanical limitations that restrict its clinical applications. In vitro testing according to ISO 14801 has demonstrated lower fracture resistance and fatigue strength for fiber-reinforced PMMA abutments compared to lithium disilicate and zirconia abutments. Their mechanical performance is also influenced by abutment geometry and design (Bruno et al., 2023). Therefore, PMMA is primarily used for provisional abutments and short-term soft tissue conditioning rather than definitive restorations subjected to prolonged functional loading (Herráez-Galindo et al., 2022).

Polyetheretherketone (PEEK) Abutments

Polyetheretherketone (PEEK) is a semi-crystalline thermoplastic polymer that has been investigated as an alternative material for implant abutments due to its favorable mechanical properties and relatively low elastic modulus (Blanch-Martínez et al., 2021; Ortega-Martínez et al., 2017; Rahmitasari et al., 2017). Unreinforced PEEK has an elastic modulus of approximately 3–4 GPa and a tensile strength of around 80 MPa. Its mechanical properties can be modified by incorporating reinforcing materials such as carbon fibers, glass fibers, or hydroxyapatite, potentially improving its load-bearing capacity and influencing stress distribution within the implant–abutment complex (Bathala et al., 2019; Gazo et al., 2024; Rahmitasari et al., 2017).

PEEK also exhibits favorable biocompatibility; however, findings on biofilm formation are inconsistent. In vitro studies have reported biofilm formation on PEEK equal to or lower than that on titanium and zirconia (Hahnel et al., 2015) or comparable to that on titanium (Suphangul et al., 2024), whereas an in vivo study found greater biofilm formation on PEEK than on titanium and zirconia (Wiessner et al., 2023). Its light, opaque color may offer esthetic advantages over metallic abutments, particularly during provisional

soft tissue conditioning (Papathanasiou et al., 2020). However, the low surface energy and chemical stability of PEEK can make bonding to resin-based restorative materials challenging. Surface treatments, including sulfuric acid etching, have been investigated to improve adhesion between PEEK and veneering composites (Blanch-Martínez et al., 2021).

Although PEEK has primarily been investigated for provisional applications, its potential use in definitive implant-supported restorations has received increasing attention (Ghazal-Maghras et al., 2022; Ortega-Martínez et al., 2017). A 2025 network meta-analysis including 34 studies and 950 patients reported no statistically significant differences in marginal bone loss, probing depth, or plaque index among PEEK, titanium, and zirconia abutments (Al-Mohammad et al., 2025). These findings suggest that PEEK may be a promising alternative to conventional abutment materials. However, further long-term clinical studies are needed to establish the mechanical reliability and clinical performance of PEEK and its reinforced variants in definitive restorations (Al-Mohammad et al., 2025; Ghazal-Maghras et al., 2022).

Polyetherketoneketone (PEKK) and BioHPP Abutments

Polyetherketoneketone (PEKK) and BioHPP are high-performance polymeric materials that have been investigated for implant-supported prosthetic applications. PEKK belongs to the polyaryletherketone (PAEK) family and has attracted interest due to its chemical stability and mechanical properties. Its use as an implant abutment material has been evaluated in biomechanical studies. A finite element analysis comparing titanium, PEEK, and PEKK implant–abutment models reported that the polymer models transmitted more stress to the peri-implant bone and to the abutment screws, whereas the highest stresses within the implant and abutment were observed in the titanium models (Küçükekenci et al., 2025).

BioHPP is a modified PEEK-based material containing approximately 20% ceramic fillers (Karayel & Canay, 2026). Its use has been investigated in implant-supported prosthetic frameworks and other restorative applications (Reda et al., 2022). In an in vitro study comparing composite-veneered BioHPP and titanium frameworks for three-unit implant-supported fixed dental prostheses, the BioHPP frameworks fractured at a mean load of 1518 ± 134 N and demonstrated marginal fit comparable to titanium frameworks (Jin et al., 2019). The study also reported higher shear bond strength between BioHPP and the veneering composite than between titanium and the same composite (Jin et al., 2019).

Although these findings indicate potential applications for PEKK and BioHPP in implant prosthodontics, evidence supporting their long-term performance as definitive implant abutment materials remains limited. Further clinical studies are needed to evaluate their mechanical reliability and peri-implant tissue responses.

Future Trends in Abutment Surface Engineering and Digital Manufacturing

Surface Modification Techniques

Surface modification techniques have been investigated to improve the biological properties of implant abutment materials, particularly their interactions with peri-implant soft tissues and oral microorganisms. Photofunctionalization using ultraviolet (UV) or vacuum ultraviolet (VUV) irradiation is one approach that has been studied for modifying zirconia surfaces. UV treatment can reduce surface hydrocarbon contamination and increase surface wettability, potentially improving cellular attachment and activity (Suzumura et al., 2023; Tuna et al., 2015). However, prolonged UV-C exposure may also affect the color stability of zirconia (Han et al., 2020). Studies investigating short-duration VUV treatment have reported

increased surface hydrophilicity and enhanced fibroblast migration on zirconia, suggesting potential benefits for peri-implant tissue responses (Manoj et al., 2025; Suzumura et al., 2023). Other approaches include surface biofunctionalization with polydopamine-based coatings and cell-adhesion peptides, which have been investigated to promote gingival fibroblast attachment and reduce bacterial colonization (Yang et al., 2020).

Antimicrobial coatings have also received attention as potential strategies for reducing bacterial biofilm formation on implant components. Silver nanoparticle (AgNP) coatings applied to titanium healing abutments have demonstrated antibacterial activity in both in vitro and clinical settings (Odatsu et al., 2020). More recently, composite coatings incorporating ZnO and silver nanoparticles into polymer-based matrices have been investigated to combine antimicrobial activity with acceptable cellular compatibility (Rehner et al., 2025). Although these approaches have shown promising experimental results, further studies are required to establish their long-term stability, safety, and clinical effectiveness when applied to implant abutments.

Additive Manufacturing and Emerging Digital Technologies

Advances in digital dentistry have expanded the manufacturing options available for implant prosthetic components. Additive manufacturing, commonly referred to as 3D printing, enables the fabrication of customized structures with complex geometries (Cai et al., 2023). Although CAD/CAM milling remains widely used, additive manufacturing techniques are increasingly being investigated for processing high-performance polymers, including PEEK, for dental applications.

Another emerging approach is four-dimensional (4D) printing, which involves the fabrication of structures designed to change their shape or properties over time in response to external

stimuli. Shape-memory polymers, for example, may respond to stimuli such as heat, light, or electric and magnetic fields (Cai et al., 2023; Khorsandi et al., 2021; Yarali et al., 2024). Computational modeling and machine learning methods are also being investigated to predict the behavior of these materials and optimize their design (Yarali et al., 2024). In addition, multimaterial printing and bioprinting technologies offer potential applications in the fabrication of customized regenerative scaffolds and other complex biomedical structures (Cai et al., 2023). However, their direct application to definitive implant abutments remains largely experimental.

Despite these developments, several limitations must be addressed before these technologies can be routinely incorporated into clinical practice. Long-term clinical evidence remains limited, particularly regarding the durability of surface coatings, cytotoxicity, color stability, and the mechanical reliability of modified interfaces (Han et al., 2020). Standardized manufacturing protocols, safety assessments, and regulatory requirements are also necessary for the clinical implementation of nanostructured and stimulus-responsive materials (Yarali et al., 2024). Future research should focus on long-term clinical evaluation, reproducible surface treatment protocols, and the practical feasibility of these technologies in implant prosthodontics.

Conclusion and Clinical Considerations

The selection of an implant abutment material should be based on the clinical situation, considering occlusal load, esthetic requirements, peri-implant soft tissue thickness, and the intended durability of the restoration. Titanium abutments are a reliable choice in regions with high functional loads, whereas zirconia abutments are more suitable in the anterior region, particularly in patients with thin peri-implant mucosa. Hybrid abutments with a titanium base

combine the mechanical advantages of a titanium connection with the esthetic properties of a ceramic component. Polymeric materials are mainly used for provisional restorations, and long-term clinical studies are needed before they can be recommended for definitive use.

Surface modification techniques and digital manufacturing methods may expand the range of abutment options in the future. However, further clinical research is required to confirm their long-term performance.

References

Agustín-Panadero, R., Serra-Pastor, B., Roig-Vanaclocha, A., Fons-Font, A., & Solá-Ruiz, M. F. (2019). Fracture resistance and the mode of failure produced in metal-free crowns cemented onto zirconia abutments in dental implants. *PLoS ONE, 14*(8), e0220551. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0220551

Al-Mohammad, Y. N., Kelly, C., Martinekova, P., Wenning, A. S., Kiss-Dala, S., Gede, N., Keremi, B., Németh, Z., Hermann, P., Czumbel, L. M., Mikulás, K., Hegyi, P., Sculean, A., & Varga, G. (2025). Zirconia, titanium, and polyetheretherketone implant abutments show equal long-term clinical success: A systematic review and network meta-analysis. *Periodontology 2000, 99*(1), 268–283. https://doi.org/10.1111/prd.70018

Alseddiek, A., Al-Zordk, W., & Attia, A. (2023). Retention of hybrid-abutment-crowns with offset implant placement: Influence of crown materials and Ti-base height. *BMC Oral Health, 23*(1), 784. https://doi.org/10.1186/s12903-023-03490-1

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), 5–9. https://doi.org/10.25122/jml-2019-0003

Bittner, N., Schulze-Späte, U., Silva, C., Da Silva, J. D., Kim, D. M., Tarnow, D., Ishikawa-Nagai, S., & Gil, M. S. (2020). Comparison of peri-implant soft tissue color with the use of pink-neck vs gray implants and abutments based on soft tissue thickness: A 6-month follow-up study. *The*

International Journal of Prosthodontics, 33(1), 29–38. https://doi.org/10.11607/ijp.6205

Blanch-Martínez, N., Arias-Herrera, S., & Martínez-González, A. (2021). Behavior of polyether-ether-ketone (PEEK) in prostheses on dental implants. A review. *Journal of Clinical and Experimental Dentistry, 13*(5), e520–e526. https://doi.org/10.4317/jced.58102

Bortagaray, M. A., Ibañez, C. A. A., Ibañez, M. C., & Ibañez, J. C. (2016). Corrosion analysis of an experimental noble alloy on commercially pure titanium dental implants. *The Open Dentistry Journal, 10*, 486–496. https://doi.org/10.2174/1874210601610010486

Bruno, L., Canullo, L., Mayer, Y., Schoenbaum, T., Giuzio, F., & Maletta, C. (2023). Static and fatigue mechanical performance of abutments materials for dental restorations. *Materials, 16*(10), 3713. https://doi.org/10.3390/ma16103713

Cai, H., Xu, X., Lu, X., Zhao, M., Jia, Q., Jiang, H.-B., & Kwon, J.-S. (2023). Dental materials applied to 3D and 4D printing technologies: A review. *Polymers, 15*(10), 2405. https://doi.org/10.3390/polym15102405

Farrag, K. M., & Khamis, M. M. (2023). Effect of anodized titanium abutment collars on peri-implant soft tissue: A split-mouth clinical study. *The Journal of Prosthetic Dentistry, 130*(1), 59–67. https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2021.09.019

Gazo, H. E., Semaan, A., Benrose, P., & Khaled, Y. (2024). Exploring polyetheretherketone in dental implants and abutments: A focus on biomechanics and finite element

methods. *Reviews on Advanced Materials Science, 63*(1), 1294–1304. https://doi.org/10.1515/rams-2024-0031

Ghazal-Maghras, R., Vilaplana-Vivo, J., Camacho-Alonso, F., & Martínez-Beneyto, Y. (2022). Properties of polyetheretheretherketone (PEEK) implant abutments: A systematic review. *Journal of Clinical and Experimental Dentistry, 14*(4), e349–e358. https://doi.org/10.4317/jced.59466

Gil, M. S., Ishikawa-Nagai, S., Elani, H. W., Da Silva, J. D., Kim, D. M., Tarnow, D., Schulze-Späte, U., & Bittner, N. (2017). A prospective clinical trial to assess the optical efficacy of pink neck implants and pink abutments on soft tissue esthetics. *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry, 29*(6), 409–415. https://doi.org/10.1111/jerd.12309

Gil, M. S., Ishikawa-Nagai, S., Elani, H. W., Da Silva, J. D., Kim, D. M., Tarnow, D., Schulze-Späte, U., Silva, C., & Bittner, N. (2019). Comparison of the color appearance of peri-implant soft tissue with natural gingiva using anodized pink-neck implants and pink abutments: A prospective clinical trial. *The International Journal of Oral & Maxillofacial Implants, 34*(3), 752–758. https://doi.org/10.11607/jomi.6318

Gomes, A. L., & Montero, J. (2011). Zirconia implant abutments: A review. *Medicina Oral, Patología Oral y Cirugía Bucal, 16*(1), e50–e55. https://doi.org/10.4317/medoral.16.e50

Hahnel, S., Wieser, A., Lang, R., & Rosentritt, M. (2015). Biofilm formation on the surface of modern implant abutment materials. *Clinical Oral Implants Research, 26*(11), 1297–1301. https://doi.org/10.1111/clr.12454

Halim, F. C., Pesce, P., De Angelis, N., Benedicenti, S., & Menini, M. (2022). Comparison of the clinical outcomes of titanium and zirconia implant abutments: A systematic review of systematic reviews. *Journal of Clinical Medicine, 11*(17), 5052. https://doi.org/10.3390/jcm11175052

Han, A., Ding, H., Tsoi, J. K. H., Imazato, S., Matinlinna, J. P., & Chen, Z. (2020). Prolonged UV-C irradiation is a double-edged sword on the zirconia surface. *ACS Omega, 5*(10), 5126–5133. https://doi.org/10.1021/acsomega.9b04123

Hanawa, T. (2020). Zirconia versus titanium in dentistry: A review. *Dental Materials Journal, 39*(1), 24–36. https://doi.org/10.4012/dmj.2019-172

Herráez-Galindo, C., Rizo-Gorrita, M., Luna-Oliva, I., Serrera-Figallo, M.-Á., Castillo-Oyagüe, R., & Torres-Lagares, D. (2019). In vitro comparative study of fibroblastic behaviour on polymethacrylate (PMMA) and lithium disilicate polymer surfaces. *Polymers, 11*(4), 744. https://doi.org/10.3390/polym11040744

Herráez-Galindo, C., Rizo-Gorrita, M., Maza-Solano, S., Serrera-Figallo, M.-Á., & Torres-Lagares, D. (2022). A review on CAD/CAM yttria-stabilized tetragonal zirconia polycrystal (Y-TZP) and polymethyl methacrylate (PMMA) and their biological behavior. *Polymers, 14*(5), 906. https://doi.org/10.3390/polym14050906

Jin, H.-Y., Teng, M.-H., Wang, Z.-J., Li, X., Liang, J.-Y., Wang, W.-X., Jiang, S., & Zhao, B.-D. (2019). Comparative evaluation of BioHPP and titanium as a framework veneered with composite resin for implant-supported fixed dental prostheses. *The Journal of Prosthetic Dentistry,*

122(4), 383–388. https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2019.03.003

Karayel, A. B., & Canay, R. Ş. (2026). BioHPP in prosthetic dentistry: A narrative review of mechanical, biological, and clinical properties. *Biomaterial Investigations in Dentistry, 13*(1), 1–8. https://doi.org/10.2340/biid.v13.45303

Khorsandi, D., Fahimipour, A., Abasian, P., Saber, S. S., Seyedi, M., Ghanavati, S., Ahmad, A., De Stephanis, A. A., Taghavinezhaddilami, F., Leonova, A., Mohammadinejad, R., Shabani, M., Mazzolai, B., Mattoli, V., Tay, F. R., & Makvandi, P. (2021). 3D and 4D printing in dentistry and maxillofacial surgery: Printing techniques, materials, and applications. *Acta Biomaterialia, 122*, 26–49. https://doi.org/10.1016/j.actbio.2020.12.044

Khorshidi, S., Zarbakhsh, A., Lawaf, S., Golalipour, S., Sayyari, M., & Mahmoudi Nahavandi, A. (2024). In vitro effect of anodization of titanium abutments on color parameters and color difference of lithium disilicate all-ceramic crowns. *Clinical and Experimental Dental Research, 10*(5), e70002. https://doi.org/10.1002/cre2.70002

Küçükekenci, A. S., Güler, M., & Bekci, M. (2025). The stress distribution of implants made of polyaryletherketones: A 3D finite element analysis. *Acta Odontologica Turcica, 42*(2), 65–74. https://doi.org/10.17214/gaziaot.1420859

Laleman, I., Lambert, F., Gahlert, M., Bacevic, M., Woelfler, H., & Roehling, S. (2023). The effect of different abutment materials on peri-implant tissues—A systematic review and meta-analysis. *Clinical Oral Implants Research, 34*(Suppl. 26), 125–142. https://doi.org/10.1111/clr.14159

Lops, D., Stellini, E., Sbricoli, L., Cea, N., Romeo, E., & Bressan, E. (2017). Influence of abutment material on peri-implant soft tissues in anterior areas with thin gingival biotype: A multicentric prospective study. *Clinical Oral Implants Research, 28*(10), 1263–1268. https://doi.org/10.1111/clr.12952

Manoj, N., Chidambaranathan, A. S., & Balasubramanium, M. (2025). Evaluation of biointegration and hydrophilicity of titanium and zirconia after vacuum-assisted ultraviolet-functionalization: An in vitro study. *The Journal of Indian Prosthodontic Society, 25*(4), 353–361. https://doi.org/10.4103/jips.jips_338_25

Martínez-Rus, F., Prieto, M., Salido, M. P., Madrigal, C., Özcan, M., & Pradíes, G. (2017). A clinical study assessing the influence of anodized titanium and zirconium dioxide abutments and peri-implant soft tissue thickness on the optical outcome of implant-supported lithium disilicate single crowns. *The International Journal of Oral & Maxillofacial Implants, 32*(1), 156–163. https://doi.org/10.11607/jomi.5258

Minotti, M., & Maesano, A. (2025). Properties and performance of gold in dental prosthetics. *Medicine and Materials, 5*(1), 17–22. https://doi.org/10.36868/MEDMATER.2025.05.01.017

Miranda, A., Komara, I., Cahyanto, A., Sukotjo, C., & Susanto, A. (2025). Clinical and esthetic outcomes of anodized titanium abutments: A systematic review of randomized controlled trials. *Clinical, Cosmetic and Investigational Dentistry, 17*, 405–421. https://doi.org/10.2147/CCIDE.S535430

Mobilio, N., Mollica, F., & Catapano, S. (2016). Ceramic materials as an alternative to titanium for dental implant fabrication. In M. A. Almasri (Ed.), *Dental implantology and biomaterial*. IntechOpen. https://doi.org/10.5772/64066

Moreno, A. L. M., dos Santos, D. M., Bertoz, A. P. M., & Goiato, M. C. (2023). Abutment on titanium-base hybrid implant: A literature review. *European Journal of Dentistry, 17*(2), 261–269. https://doi.org/10.1055/s-0042-1750801

Mostafavi, A. S., Mojtahedi, H., & Javanmard, A. (2021). Hybrid implant abutments: A literature review. *European Journal of General Dentistry, 10*(2), 106–115. https://doi.org/10.1055/s-0041-1735766

Nam, R. K., Lee, S. J., Park, E. J., Kwon, H. B., & Yoon, H. I. (2018). Three-dimensional deformation and wear of internal implant-abutment connection: A comparative biomechanical study using titanium and zirconia. *The International Journal of Oral & Maxillofacial Implants, 33*(6), 1279–1286. https://doi.org/10.11607/jomi.6349

Nawafleh, N., Elshiyab, S., Öchsner, A., & George, R. (2021). In vitro fatigue and fracture load of monolithic ceramic crowns supported by hybrid abutment. *The Open Dentistry Journal, 15*, 664–671. https://doi.org/10.2174/1874210602115010664

Odatsu, T., Kuroshima, S., Sato, M., Takase, K., Valanezhad, A., Naito, M., & Sawase, T. (2020). Antibacterial properties of nano-Ag coating on healing abutment: An in vitro and clinical study. *Antibiotics, 9*(6), 347. https://doi.org/10.3390/antibiotics9060347

Ortega-Martínez, J., Farré-Lladós, M., Cano-Batalla, J., & Cabratosa-Termes, J. (2017). Polyetheretherketone (PEEK)

as a medical and dental material. A literature review. *Medical Research Archives, 5*(4). https://doi.org/10.18103/mra.v5i4.1209

Ozkomur, A., Erbil, M., & Akova, T. (2013). Diamondlike carbon coating as a galvanic corrosion barrier between dental implant abutments and nickel-chromium superstructures. *The International Journal of Oral & Maxillofacial Implants, 28*(4), 1037–1047. https://doi.org/10.11607/jomi.3091

Papathanasiou, I., Kamposiora, P., Papavasiliou, G., & Ferrari, M. (2020). The use of PEEK in digital prosthodontics: A narrative review. *BMC Oral Health, 20*, 217. https://doi.org/10.1186/s12903-020-01202-7

Park, J. M., Lee, J. B., Heo, S. J., & Park, E. J. (2014). A comparative study of gold UCLA-type and CAD/CAM titanium implant abutments. *The Journal of Advanced Prosthodontics, 6*(1), 46–52. https://doi.org/10.4047/jap.2014.6.1.46

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. https://doi.org/10.3390/dj5040035

Reda, R., Zanza, A., Galli, M., De Biase, A., Testarelli, L., & Di Nardo, D. (2022). Applications and clinical behavior of BioHPP in prosthetic dentistry: A short review. *Journal of Composites Science, 6*(3), 90. https://doi.org/10.3390/jcs6030090

Rehner (Costache), A. M. G., Tudorache, D.-I., Bîrcă, A. C., Nicoară, A. I., Niculescu, A.-G., Holban, A. M., Hudiță, A., Bîclesanu, F. C., Balaure, P. C., Pangică, A. M.,

Grumezescu, A. M., & Croitoru, G.-A. (2025). Antibacterial properties of PMMA/ZnO(NanoAg) coatings for dental implant abutments. *Materials, 18*(2), 382. https://doi.org/10.3390/ma18020382

Rizo-Gorrita, M., Herráez-Galindo, C., Torres-Lagares, D., Serrera-Figallo, M.-Á., & Gutiérrez-Pérez, J.-L. (2019). Biocompatibility of polymer and ceramic CAD/CAM materials with human gingival fibroblasts (HGFs). *Polymers, 11*(9), 1446. https://doi.org/10.3390/polym11091446

Sampatanukul, T., Serichetaphongse, P., & Pimkhaokham, A. (2018). Histological evaluations and inflammatory responses of different dental implant abutment materials: A human histology pilot study. *Clinical Implant Dentistry and Related Research, 20*(2), 160–169. https://doi.org/10.1111/cid.12562

Seyidaliyeva, A., Rues, S., Evagorou, Z., Hassel, A. J., Büsch, C., Rammelsberg, P., & Zenthöfer, A. (2022). Predictability and outcome of titanium color after different surface modifications and anodic oxidation. *Dental Materials Journal, 41*(6), 930–936. https://doi.org/10.4012/dmj.2022-075

Shah, K. K., & Sivaswamy, V. (2023). A literature review on implant abutment types, materials, and fabrication processes. *Journal of Long-Term Effects of Medical Implants, 33*(1), 57–66. https://doi.org/10.1615/JLongTermEffMedImplants.2022042720

Suphangul, S., Pujarern, P., Rokaya, D., Kanchanasobhana, C., Rungsiyakull, P., & Chaijareenont, P. (2024). Comparison

of plaque accumulation between titanium and PEEK healing abutments. *Journal of Functional Biomaterials, 15*(11), 334. https://doi.org/10.3390/jfb15110334

Suzumura, T., Matsuura, T., Komatsu, K., Sugita, Y., Maeda, H., & Ogawa, T. (2023). Vacuum ultraviolet (VUV) light photofunctionalization to induce human oral fibroblast transmigration on zirconia. *Cells, 12*(21), 2542. https://doi.org/10.3390/cells12212542

Totou, D., Naka, O., Mehta, S. B., & Banerji, S. (2021). Esthetic, mechanical, and biological outcomes of various implant abutments for single-tooth replacement in the anterior region: A systematic review of the literature. *International Journal of Implant Dentistry, 7*, 85. https://doi.org/10.1186/s40729-021-00370-7

Tuna, T., Wein, M., Swain, M., Fischer, J., & Att, W. (2015). Effect of ultraviolet photofunctionalisation on the cell attractiveness of zirconia implant materials. *European Cells & Materials, 29*, 82–96. https://doi.org/10.22203/eCM.v029a07

Turkoglu, P., Kose, A., & Sen, D. (2019). Abutment selection for anterior implant-supported restorations. In M. A. Almasri (Ed.), *An update of dental implantology and biomaterial*. IntechOpen. https://doi.org/10.5772/intechopen.80965

Vigolo, P., Givani, A., Majzoub, Z., & Cordioli, G. (2006). A 4-year prospective study to assess peri-implant hard and soft tissues adjacent to titanium versus gold-alloy abutments in cemented single implant crowns. *Journal of Prosthodontics, 15*(4), 250–256. https://doi.org/10.1111/j.1532-849X.2006.00114.x

Wiessner, A., Wassmann, T., Wiessner, J. M., Schubert, A., Wiechens, B., Hampe, T., & Bürgers, R. (2023). In vivo biofilm formation on novel PEEK, titanium, and zirconia implant abutment materials. *International Journal of Molecular Sciences, 24*(2), 1779. https://doi.org/10.3390/ijms24021779

Yang, Z., Liu, M., Yang, Y., Zheng, M., Yang, Y., Liu, X., & Tan, J. (2020). Biofunctionalization of zirconia with cell-adhesion peptides via polydopamine crosslinking for soft tissue engineering: Effects on the biological behaviors of human gingival fibroblasts and oral bacteria. *RSC Advances, 10*(11), 6200–6212. https://doi.org/10.1039/c9ra08575k

Yarali, E., Mirzaali, M. J., Ghalayaniesfahani, A., Accardo, A., Diaz-Payno, P. J., & Zadpoor, A. A. (2024). 4D printing for biomedical applications. *Advanced Materials, 36*(31), 2402301. https://doi.org/10.1002/adma.202402301

BÖLÜM 8

MONOLİTİK ZİRKONYA RESTORASYONLARDA YÜZEY İŞLEMLERİ VE SİMANTASYON PROTOKOLLERİ

ALİ SİNCAR[1]

Giriş

Monolitik zirkonya restorasyonların klinik kullanımı, yüksek mekanik kapasiteyi dijital üretim ve kabul edilebilir estetikle birleştirme olanağı sayesinde genişlemiştir. Veneer porselen tabakasının bulunmaması tabakalanmaya bağlı komplikasyonları azaltabilse de restorasyonun başarısı yalnızca seramiğin dayanımına bağlı değildir. Preparasyon, restorasyon tasarımı, yüzey bütünlüğü, siman seçimi ve uygulama sırası birlikte değerlendirilmelidir. Klinik derlemelerde monolitik zirkonyanın olumlu sonuçları bildirilmekle birlikte materyal grupları, takip süreleri ve simantasyon yöntemleri arasındaki farklılıklar, tek bir protokolün bütün olgular için üstün kabul edilmesini güçleştirmektedir (Leitão et al., 2022; Shihabi & Chrcanovic, 2023).

[1] Uzm. Dt., Fırat Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi, Protetik Diş Tedavisi Anabilim Dalı, Elazığ, Türkiye. E-posta: alsncr02@gmail.com. ORCID: 0009-0006-7312-9771

Zirkonya ile rezin arasında kalıcı bağlantı sağlamak, silika esaslı cam seramiklerden farklı bir yaklaşım gerektirir. Bunun yanında güncel zirkonyalar aynı mikroyapıya sahip değildir. Üç, dört ve beş mol yüzde itriya içeren materyallerin veya bileşimi kalınlık boyunca değişen çok katmanlı blokların tek bir yüzey işlemine aynı yanıtı vereceği varsayılamaz. Optik kazanım ile mekanik kapasite arasındaki ilişki, bağlantıyı artırma hedefinin seramiğin yapısal güvenliğiyle birlikte ele alınmasını gerektirir (Bernauer et al., 2026; Zhang & Lawn, 2018).

Bu bölümün amacı, monolitik zirkonya restorasyonlarda iç ve dış yüzey işlemlerinin gerekçelerini açıklamak; mekanik, tribokimyasal ve kimyasal yöntemleri karşılaştırmak ve klinik koşullara uyarlanabilir simantasyon yaklaşımı sunmaktır. Metin, 19 Ekim 2026 tarihine kadar doğrulanabilen seçilmiş akademik yayınların eleştirel anlatı derlemesidir; sistematik derleme olarak tasarlanmamıştır. PubMed kayıtları, yayıncı sayfaları ve erişilebilen makale içerikleri üzerinden bibliyografik bilgiler kontrol edilmiş; güncel derlemeler klinik araştırmalar ve mekanizma çalışmalarıyla birlikte değerlendirilmiştir. Laboratuvar bağlantı dayanımı, klinik retansiyon ve restorasyon sağkalımı ayrı sonuçlar olarak ele alınmıştır.

Zirkonyanın faz bileşimi ve itriya içeriği

Zirkonya, sıcaklık ve stabilizatör içeriğine bağlı olarak farklı kristal yapılarda bulunabilen bir oksit seramiktir. Dental uygulamalarda itriya ilavesi, uygun fazların oda sıcaklığında korunmasını sağlar. Geleneksel 3Y-TZP materyallerde tetragonal fazın gerilme altında monoklinik faza dönüşebilmesi, çatlak ilerlemesine karşı direnç oluşturan dönüşüm toklaşması mekanizmasının temelidir. Bu mekanizma, zirkonyanın yüksek dayanımının açıklanmasında önemlidir; ancak yüzeyde oluşabilecek

her faz dönüşümünün klinik açıdan yararlı olduğu anlamına gelmez (Denry & Kelly, 2008).

İtriya içeriği arttıkça faz dağılımı ve optik davranış değişir. Yüksek translüsensili materyallerde ışık saçılımının azalması estetik açıdan avantaj sağlayabilirken dönüşüm toklaşmasına katkıda bulunabilen fazların oranı azalabilir. Böylece 5Y materyalin daha geçirgen olması, 3Y materyalle aynı çatlak direncine veya aynı endikasyonlara sahip olduğu anlamına gelmez. 4Y grubu ara özellikler gösterebilmekle birlikte ticari ürünlerin faz bileşimi, tane yapısı ve üretim koşulları farklıdır. Yalnızca “yüksek translüsensi” etiketi üzerinden mekanik güvenlik kararı verilmemelidir (Zhang & Lawn, 2018).

Tablo 1. Zirkonya gruplarının yüzey işlemi açısından karşılaştırılması

Grup	**Temel eğilim**	**Klinik yarar**	**Yüzey işlemi açısından sınır**
3Y	Tetragonal faz ve dönüşüm toklaşması belirgin	Yük taşıyan endikasyonlarda mekanik kapasite	Agresif işlem yine kusur oluşturabilir
4Y	Optik ve mekanik özelliklerde ara profil	Estetik ve dayanım arasında seçenek	Ticari ürünler eşdeğer değildir
5Y	Daha yüksek translüsensi; daha sınırlı dönüşüm toklaşması	Uygun endikasyonda optik avantaj	İnce bölgelerde işlem hasarı ayrıca değerlendirilir
Bileşim geçişli	Bölgeye göre değişen faz bileşimi	Bölgesel optik ve mekanik düzenleme	Blok içi konum ve işlenen bölge kaydedilmelidir

Kaynak: (Alammar & Blatz, 2022; Bernauer et al., 2026; Zhang & Lawn, 2018) temel alınarak hazırlanmıştır. Eğilimler ürün endikasyonunun yerine geçmez.

Güncel bir sistematik derleme, 4Y ve 5Y zirkonyaların bükülme dayanımlarının materyal grubu kadar örnek hazırlama ve

test koşullarından da etkilendiğini göstermektedir. Bu nedenle literatürde bildirilen ortalama dayanımlar bir ürünün kullanım talimatındaki endikasyonların yerine geçemez. Çok katmanlı zirkonyalarda ise renk geçişi ile bileşim geçişi birbirinden ayrılmalıdır. Restorasyonun blok içindeki konumu, özellikle ince kenarlar ve bağlantı bölgeleri bakımından kaydedilmesi gereken bir üretim değişkenidir (Bernauer et al., 2026).

Yüzey bütünlüğü ve yaşlanma

Hidrotermal yaşlanma, suyun ve sıcaklığın etkisiyle belirli zirkonya mikroyapılarında yüzeyden başlayan değişimleri tanımlar. Bunun klinik önemi; faz bileşimi, artık gerilmeler, yüzey kusurları ve uygulanan işlemlerle ilişkilidir. Seramiğin hidrotermal yaşlanması ile rezin bağlantısının su içinde bozulması aynı süreç değildir. Birincisi seramik yapısıyla, ikincisi siman ve ara yüzün kimyasal ve fiziksel kararlılığıyla ilgilidir; ikisi aynı restorasyonda birlikte gerçekleşebilir (Chen et al., 2017; Denry & Kelly, 2008).

İç yüzeyi agresif biçimde pürüzlendirmek, bağlantı alanını artırırken yüzey kusurlarını da değiştirebilir. Eski Y-TZP araştırmalarında partikül abrazyonu sonrasında bükülme dayanımında artış bildirilmesi, bu işlemin her zirkonya türünde ve her şiddette güvenli olduğunu kanıtlamaz. Dönüşüme bağlı basma gerilmeleri ile oluşturulan kusurların zararlı etkisi aynı anda bulunabilir. Bu nedenle yüzey işlemi değerlendirilirken yalnızca başlangıç bağlantı dayanımı değil seramik kalınlığı, faz bileşimi ve yorulma davranışı da dikkate alınmalıdır (Alammar & Blatz, 2022; Aurélio et al., 2016).

Zirkonya ile rezin arasındaki adezyonun temelleri

Zirkonya, cam seramiklerdeki gibi asitle uzaklaştırılabilen silika esaslı bir cam matrikse sahip değildir. Cam seramikler için kullanılan hidroflorik asit ve silan dizisinin zirkonyaya doğrudan aktarılması bu nedenle uygun değildir. Zirkonyada kalıcı rezin

bağlantısı için mikromekanik tutuculuk oluşturan işlemler ile oksit yüzeye bağlanabilen fonksiyonel monomerlerin birlikte değerlendirilmesi gerekir. Mekanik ve kimyasal yaklaşımların birleşimi, çok sayıda laboratuvar araştırmasının ortak bulgusudur (Özcan & Bernasconi, 2015; Thammajaruk et al., 2018).

Yüzey enerjisi ve ıslanabilirlik, primerin veya simanın yüzeyle temasını etkiler. Ancak düşük temas açısı, tek başına dayanıklı bağlantı kanıtı değildir. Yüzey temizliği, sıvının bileşimi, ölçümün işlemden ne kadar sonra yapıldığı ve sonrasında oluşan polimer ağ birlikte önem taşır. Pürüzlülüğün artması da simanın bütün düzensizliklere yeterince nüfuz ettiğini göstermez. Klinik açıdan hedef, mümkün olan en yüksek pürüzlülük yerine temiz, üretici tarafından işlenmesine izin verilen ve kullanılan rezin sistemle uyumlu bir yüzeydir (Inokoshi et al., 2014; Li et al., 2024).

İki ayrı ara yüz ve bağlantının dayanıklılığı

Rezinle simante edilen diş destekli bir restorasyonda zirkonya–siman ve diş–siman ara yüzleri ayrı ayrı yönetilmelidir. Zirkonya tarafında başarılı bir primer uygulanması, kontamine dentin veya uygun hazırlanmamış mine nedeniyle gelişebilecek ayrılmayı önlemez. Benzer biçimde dişte güçlü adezyon bulunması, restorasyon iç yüzeyinde yetersiz işlemi telafi etmez. Kopmanın hangi ara yüzde gerçekleştiğinin incelenmesi, yalnızca bir bağlantı dayanımı değerine bakmaktan daha açıklayıcı olabilir (Blatz et al., 2016; Rohr et al., 2022).

Başlangıç bağlantısı ile yaşlandırma sonrası bağlantı arasında ayrım yapılmalıdır. Suda saklama, termal döngü ve mekanik yükleme farklı bozulma yollarını sınar. Suyun ara yüze ulaşması ve rezin bileşenlerinin özellikleri, fosfat monomeri içeren sistemlerde de zamanla dayanım kaybına yol açabilir. Dolayısıyla kimyasal bağ oluştuğunun gösterilmesi, ara yüzün ağız ortamında süresiz kararlı kalacağı anlamına gelmez. Uzun dönem bağlantı

değerlendirmesi, uygun kimyasal işlem kadar yeterli polimerizasyonu ve kontaminasyon kontrolünü de içermelidir (Chen et al., 2017; Kern & Wegner, 1998).

Alüminyum oksit ile hava kaynaklı partikül abrazyonu

Alüminyum oksit partikülleriyle hava kaynaklı abrazyon, zirkonya yüzeyinde mikromekanik tutuculuk oluşturmak için en çok araştırılan yöntemlerden biridir. İşlem literatürde kumlama olarak da adlandırılır. Partikül boyutu, basınç, uygulama süresi, uzaklık, açı ve yüzeyin sinterlenme durumu birlikte etki gösterir. Bu değişkenlerden biri değiştirilirken diğerleri sabitmiş gibi yorum yapmak, farklı araştırmaların sonuçlarını yanıltıcı biçimde karşılaştırmaya neden olabilir (Martins et al., 2026).

Otuz dört laboratuvar çalışmasını değerlendiren güncel meta-analiz, partikül abrazyonunun birçok koşulda bağlantıyı artırdığını desteklemektedir. Bununla birlikte yüksek heterojenlik ve kanıt kesinliğinin orta ile çok düşük arasında değişmesi, tüm materyaller için tek bir işlem şiddetinin önerilmesini engeller. Sinterleme öncesi ve sonrası işlemler de eşdeğer kabul edilmemelidir. Sinterleme öncesinde oluşturulan topografya daha sonraki ısıl süreçten etkilenebilir; sinterleme sonrasında yapılan işlem ise nihai seramik yüzeyine doğrudan etki eder (Martins et al., 2026).

Klinik uygulamada materyalin ticari adı ve üretici talimatı görülmeden standart bir basınç veya partikül boyutu seçilmemelidir. Örneğin bir laboratuvar çalışmasında belirli bir çok katmanlı zirkonya için 50 µm alüminyum oksit, 2 bar basınç, 10 saniye uygulama ve 10 mm uzaklık kullanılmış olması, bu değerleri bütün 5Y veya ince parsiyel restorasyonlar için doğrulanmış protokole dönüştürmez. Bu sayılar bir araştırma koşulunu tanımlar; klinik kararın yerine geçmez (Le et al., 2024).

Yüksek translüsensili materyallerde yüzey hasarı ile bağlantı kazanımı arasındaki denge özellikle önemlidir. İnce marjinler, düşük

kalınlıkta retantif kanatlar ve önceden aşındırılmış bölgeler tekrar işleme daha duyarlı olabilir. Restorasyonun laboratuvarda hangi işlemden geçtiği bilinmiyorsa ikinci bir abrazyon otomatik olarak uygulanmamalıdır. İşlemin tekrarlanması ancak temizlik gereksinimi, kalan kalınlık ve üretici önerileri birlikte değerlendirilerek düşünülmelidir (Alammar & Blatz, 2022).

Tribokimyasal silika kaplama

Tribokimyasal silika kaplamada yüzeye partikül çarpmasıyla mikromekanik değişiklik oluşturulurken silika içeren bir yüzey de elde edilmeye çalışılır. Bu yüzey, uygun silan uygulaması için kimyasal bağlanma olanağı sağlar. Böylece yöntem, yalnızca alüminyum oksitle abrazyondan farklı bir kimyasal bileşen içerir. Ancak elde edilen tabakanın niteliği işlem parametrelerine bağlıdır ve yüzeyin her bölgesinde aynı kaplama kalınlığının oluştuğu varsayılamaz (Özcan & Bernasconi, 2015).

Silika kaplama sonrasında kullanılacak silan, fosfat monomeri ve siman kombinasyonu ilgili sistemin talimatına göre seçilmelidir. “Zirkonyada silan etkisizdir” ifadesi de “silan her zirkonyaya yeterlidir” ifadesi de aşırı genellemedir. Silika ile değiştirilmemiş oksit yüzeyinde tek başına silan güvenilir bir seçenek oluşturmazken silika kaplanmış yüzeyde silanın rolü farklıdır. Güncel derlemeler, mekanik ve kimyasal bileşenlerin birlikte değerlendirilmesi gerektiğini desteklemektedir (Li et al., 2024; Thammajaruk et al., 2018).

Aşındırma ve işlem sırasının önemi

İç yüzeyde uyumlama için elmas frez kullanılması ile kontrollü partikül abrazyonu aynı işlem değildir. Frezle aşındırma yerel oluklar, kusurlar ve kalınlık kaybı oluşturabilir. Uyum sorunu, siman boşluğu veya üretim hatası nedeniyle ortaya çıkmışsa aşındırmayı giderek artırmak yerine restorasyonun yeniden üretilmesi değerlendirilmelidir. Özellikle yük taşıyan ve ince

bölgelerde adezyon kazanımı uğruna tasarım güvenliğinden ödün verilmemelidir (Aurélio et al., 2016; Kern, 2015).

İşlem sırası laboratuvar ile klinik arasında belgelenmelidir. Sinterleme, renklendirme, glaze, uyumlama, abrazyon ve prova işlemlerinin hangi aşamada yapıldığı bilinmelidir. Hazırlanmış iç yüzeyin parmakla tutulması veya tükürükle yeniden teması, yüzey işleminin klinik değerini azaltabilir. Bu nedenle yüzey hazırlığı, tek bir cihaz uygulaması olarak değil simantasyon tamamlanıncaya kadar devam eden bir süreç olarak yönetilmelidir (Blatz et al., 2016; Thammajaruk et al., 2023).

10-MDP içeren primerler

10-metakriloiloksidesil dihidrojen fosfat, kısaca 10-MDP, fosfat grubu aracılığıyla oksit yüzeyle etkileşebilen ve metakrilat grubu aracılığıyla rezin yapıya katılabilen bir fonksiyonel monomerdir. Nükleer manyetik rezonans verileri, zirkonya ile etkileşimin yalnızca tek tip bağla açıklanamayacağını; iyonik etkileşimler ve hidrojen bağlarının birlikte rol oynayabildiğini göstermektedir. Bu mekanizma, MDP kullanımının bilimsel gerekçesini açıklar; ticari ürünlerin aynı performansı göstereceğini kanıtlamaz (Nagaoka et al., 2017).

Bir primerin etkinliği yalnızca etiketinde MDP bulunmasına bağlı değildir. Monomer konsantrasyonu, çözücü, diğer bileşenler, saklama koşulları ve uygulama biçimi yüzeyde oluşan tabakayı etkileyebilir. Daha fazla primer veya daha kalın film otomatik olarak daha güçlü bağlantı sağlamaz. Uygulama süresi, hava ile çözücü uzaklaştırılması ve primerin ayrıca polimerize edilip edilmeyeceği ürünün kullanım talimatından belirlenmelidir (Blatz et al., 2018; Nagaoka et al., 2017).

Üniversal adezivler ve siman sistemi uyumu

Üniversal adezivlerin zirkonya primeri olarak kullanımı, ürünün bu endikasyon için doğrulanmasına bağlıdır. Aynı şişede silan ve MDP bulunması, her yüzeyde ayrı primerle aynı etkinliğin elde edileceği anlamına gelmez. Ayrıca adezivin dual veya kimyasal polimerize olan simanla uyumu kontrol edilmelidir. Bazı sistemlerde aktivatör veya belirli uygulama sırası gerekirken başka bir sistemin aynı basamakları istememesi mümkündür (Rohr et al., 2022).

Farklı markaların primer ve simanlarını birleştiren laboratuvar araştırmaları, performansın kombinasyona göre değişebildiğini göstermektedir. Bu bulgu, bütün çapraz kombinasyonların başarısız olduğu anlamına gelmez; ancak deneysel olarak olumlu bulunan tek bir eşleşme de tüm ürünlere genellenemez. Klinik açıdan daha savunulabilir yaklaşım, seramik ve diş yüzeyleri için birlikte doğrulanmış bir sistem kullanmak ve basamakları ürünler arasında varsayımla aktarmamaktır (Le et al., 2024).

Simanın MDP içermesi, ayrı primer gereksinimini kendiliğinden ortadan kaldırmaz. Aynı şekilde primerde MDP bulunması, her simanın ek işlem olmadan uygun olacağını göstermez. Güncel ağ meta-analizi kimyasal monomer seçiminin önemini destekler; ancak farklı formülasyonları ortak bir monomer adı altında birleştirmenin klinik üstünlük kanıtı olmadığı unutulmamalıdır. Esas değerlendirme birimi, yüzey işlemi–primer–siman–polimerizasyon bütünüdür (Li et al., 2024).

Alternatif ve gelişmekte olan yöntemler

Lazerle yüzey işlemi, plazma uygulaması, seçici infiltrasyonla pürüzlendirme ve özel kimyasal aşındırma yöntemleri zirkonya bağlantısını geliştirmek için araştırılmaktadır. Bu yöntemler aynı mekanizmayla etki etmez. Lazer topografiyi ve ısıl etkilenmeyi değiştirebilirken plazma yüzeyin kimyasal durumunu ve

ıslanabilirliğini etkileyebilir. Bu nedenle “alternatif yüzey işlemi” başlığı altında bütün sonuçları tek bir klinik öneriye dönüştürmek uygun değildir (Li et al., 2024).

Özellikle plazma sonrasında temas açısının azalması, yaşlandırılmış bağlantıda kalıcı artışla eş anlamlı değildir. Seçici infiltrasyon veya deneysel kaplama yöntemlerinin yüksek sıralama elde etmesi de doğrudan klinik tercih oluşturmaz. Sıralamalar az sayıda çalışma, dolaylı karşılaştırmalar ve farklı yaşlandırma koşullarından etkilenebilir. Rutin uygulamaya geçiş için tekrarlanabilir işlem parametreleri, seramik bütünlüğü ve klinik sonuçlar birlikte gösterilmelidir (Nasri et al., 2025).

Tablo 2. İç yüzey işlemlerinin yararları ve sınırlılıkları

Yöntem	**Bağlantıya katkı**	**Sınırlılık ve kanıt**
Alüminyum oksit abrazyonu	Mikromekanik tutuculuk; kimyasal işlem için yüzey hazırlığı	Parametre ve materyale bağlı hasar; ağırlıkla laboratuvar kanıtı
Tribokimyasal silika kaplama	Pürüzlendirme ve silan için silika içeren yüzey	Kaplama niteliği ve silan–siman uyumu önemlidir
10-MDP içeren primer	Oksit yüzeyle kimyasal etkileşim	Tek başına yüzey temizliğini veya yeterli polimerizasyonu sağlamaz
Lazer	Parametreye bağlı topografik değişim	Isıl hasar olasılığı; standart klinik protokol sınırlı
Plazma	Yüzey kimyası ve ıslanabilirlikte değişim	Islanabilirlik artışı kalıcı bağlantıyla eşdeğer değildir
Özel kimyasal aşındırma ve infiltrasyon	Deneysel mikropürüzlendirme veya yüzey değişimi	Klinik uygulanabilirlik ve uzun dönem doğrulama yetersiz

Kaynak: (D'Alessandro et al., 2024; Li et al., 2024; Nasri et al., 2025; Özcan & Bernasconi, 2015). Karşılaştırma, klinik üstünlük sıralaması değildir.

Zirkonyanın kimyasal aşındırılması üzerine güncel sistematik derleme, özel asit uygulamalarının laboratuvar düzeyinde araştırıldığını ancak hava kaynaklı abrazyonun daha geniş kanıt

tabanına sahip olduğunu göstermektedir. Araştırmalarda kullanılan sıcak veya yüksek konsantrasyonlu asit sistemleri, cam seramikler için kullanılan klinik hidroflorik asit protokolüyle karıştırılmamalıdır. Bu deneysel uygulamalar, rutin ağız içi işlem olarak önerilemez. Yöntemlerin potansiyeli ile klinik kullanılabilirliği birbirinden ayrı değerlendirilmelidir (D'Alessandro et al., 2024).

Prova sonrası kontaminasyonun bağlantıya etkisi

Restorasyonun ağızda denenmesi sırasında iç yüzey tükürük, kan veya prova materyalleriyle temas edebilir. Özellikle fosfat içeren tükürük bileşenleri oksit yüzeyle etkileşerek daha sonra uygulanacak fosfat monomerlerinin bağlanmasını güçleştirebilir. Bu nedenle restorasyonun gözle temiz görünmesi, adeziv simantasyon için yeterli yüzey koşulunun sağlandığını göstermez. Laboratuvarda hazırlanmış yüzeyin prova sonrasında yeniden değerlendirilmesi gerekir (da Silva et al., 2022; Thammajaruk et al., 2023).

Tükürük kontaminasyonu üzerine meta-analizler, yalnızca suyla yıkama, alkol veya fosforik asit kullanımının güvenilir biçimde temiz kontrol yüzeyine eşdeğer bağlantı sağlamadığını göstermektedir. Fosforik asidin diş yüzeyinde yararlı bir işlem olması, zirkonya iç yüzeyinde de uygun bir temizleyici olduğunu göstermez. Diş ve restorasyon yüzeylerinin farklı kimyasal özellikleri, klinik basamakların birbirinden ayrılmasını gerektirir (da Silva et al., 2022).

Temizleyici seçimi ve yeniden abrazyon

Zirkonya için geliştirilmiş temizleyiciler, belirli koşullarda kontaminasyonun olumsuz etkisini azaltabilir. Bununla birlikte ticari temizleyiciler ortak bir kimyasal grubu temsil etmez ve bir ürünün sonucundan diğerine geçiş yapılamaz. Sodyum hipoklorit ve yeniden partikül abrazyonu da araştırılmıştır; etkinlik kullanılan konsantrasyon, süre, yüzeyin ön işlemi ve yaşlandırmaya bağlıdır.

Bu sonuçlar her olguda aynı temizleme reçetesini desteklemez (Thammajaruk et al., 2023).

Yeniden abrazyon etkili bir dekontaminasyon yolu olabilse de özellikle ince, yüksek translüsensili veya daha önce işlenmiş restorasyonlarda hasar riskiyle birlikte değerlendirilmelidir. Üreticinin bu işlem için izin verdiği sınırlar belirleyicidir. Primer uygulanmış bir yüzey kontamine olduğunda ise yalnızca yüzeyi kurutup simana geçilmemelidir. Yeniden temizleme ve gerekirse yeniden yüzey hazırlığı, kullanılan sistemin talimatına göre planlanmalıdır (Alammar & Blatz, 2022; da Silva et al., 2022).

Temizleme sonrasında yüzey önerildiği şekilde yıkanmalı, yağsız ve temiz hava ile kurutulmalı ve yeniden kontaminasyondan korunmalıdır. Pratik işlem sırası; prova ve gerekli uyumlamaların tamamlanması, iç yüzeyin uygun biçimde dekontaminasyonu, gerekiyorsa izin verilen mekanik işlem, kimyasal primer ve simantasyon olarak düzenlenebilir. Ancak mekanik işlem ile temizleme arasındaki kesin sıra, laboratuvar ön işlemi ve ürün talimatı dikkate alınarak belirlenmelidir (Blatz et al., 2016; Thammajaruk et al., 2023).

Tablo 3. Prova sonrası temizleme seçeneklerinin değerlendirilmesi

Seçenek	**Kanıtın genel yönü**	**Klinik yorum**
Yalnızca su	Kontaminasyon etkisini bütünüyle gidermeyebilir	Gözle temizlik yeterli kabul edilmez
Alkol	Temiz kontrol yüzeyine dönüş güvenilir değildir	Tek başına genel dekontaminasyon protokolü değildir
Fosforik asit	Tükürükle kontamine zirkonyada güvenilir çözüm değildir	Diş asitlemesi ile zirkonya temizliği ayrılmalıdır
Zirkonya temizleyicisi	Ürüne ve yaşlandırmaya bağlı olumlu sonuçlar	Süre, yıkama ve kurutma ilgili talimattan belirlenir

Seçenek	Kanıtın genel yönü	Klinik yorum
Yeniden abrazyon	Kontaminasyon etkisini azaltabilir	Ön işlem, kalınlık ve materyalin yeniden işlenebilirliği kontrol edilir

Kaynak: (da Silva et al., 2022; Thammajaruk et al., 2023). Tablo özellikle tükürük kontaminasyonu kanıtını özetler; kan ve prova materyallerine otomatik genellenmez.

Dış yüzeyin bitirilmesi ve polisaj

İç yüzeyde adezyon için uygun topografya hedeflenirken dış yüzeyde temas eden dokular ve antagonist diş açısından düzgünlük önem taşır. Oklüzal uyumlama sonrası oluşan pürüzlülük, zirkonyanın yalnızca sertliğiyle açıklanamayacak bir aşınma davranışı oluşturabilir. Bu nedenle simantasyon protokolü, oklüzal düzeltmelerden sonra dış yüzeyin nasıl yeniden bitirileceğini de kapsamalıdır (da Rosa et al., 2023).

Aşındırılmış YSZ yüzeylerinin bitirilmesi üzerine sistematik derleme, polisajın yüzey pürüzlülüğünü azaltabildiğini ve mekanik davranış açısından yararlı olabildiğini göstermektedir. Ancak yüzeyin parlak görünmesi, bütün alt yüzey kusurlarının ortadan kalktığı anlamına gelmez. Zirkonyaya uygun, kademeli polisaj sistemi kullanılmalı; aşındırmanın oluşturduğu kusurları yalnızca glaze ile kapatmanın yapısal iyileşme sağlayacağı varsayılmamalıdır (da Rosa et al., 2023).

Glaze ve polisajın karşılaştırıldığı küçük bir klinik pilot çalışma, bir yıllık takipte polisajlı yüzey karşısında daha düşük antagonist aşınması bildirmiştir. Bununla birlikte sınırlı örneklem ve takip süresi nedeniyle bu bulgu, bütün materyaller ve oklüzal koşullar için kesin bir üstünlük ölçüsü olarak yorumlanmamalıdır. Klinik aşınma derlemeleri de ölçüm yöntemleri, materyal türleri ve yanlılık riskleri bakımından heterojen bir kanıt tabanı göstermektedir (Flores-Ferreyra et al., 2025; Selvaraj et al., 2021).

Bu veriler ışığında klinik hedef, oklüzal uyumlamayı gerekli alanlarla sınırlamak ve sonrasında yüzeyi sistematik biçimde yeniden polisajlamaktır. Antagonist aşınması yalnızca materyal seçimiyle yönetilemez; oklüzal temaslar, parafonksiyon, antagonist dokunun başlangıç durumu ve izlem bulguları da değerlendirilmelidir. Yüzey işlemi kararında iç yüzeyin bağlantı gereksinimi ile dış yüzeyin biyomekanik işlevi birbirine karıştırılmamalıdır (Flores-Ferreyra et al., 2025; Selvaraj et al., 2021).

Siman seçimi ve preparasyonun retansiyonu

Siman seçimindeki ilk soru, restorasyonun kalması için adezyona ne ölçüde gereksinim duyulduğudur. Yeterli retansiyon ve direnç biçimi bulunan tam kron ile kısa, aşırı konik veya sınırlı bağlanma alanına sahip preparasyon aynı şekilde değerlendirilmez. Parsiyel restorasyonlar ve adeziv köprüler ise tasarımları gereği bağlantıya daha fazla bağımlı olabilir. Siman, yetersiz preparasyon veya uygunsuz endikasyonun otomatik telafisi olarak görülmemelidir (Blatz et al., 2018; Kern, 2015).

Konvansiyonel cam iyonomer veya rezin modifiye cam iyonomer simanlar, üretici tarafından uygun görülen ve yeterli mekanik retansiyona sahip tam örtücülü restorasyonlarda seçenek olabilir. Rezin simanlar ise adezyonun gerekli olduğu koşullarda daha ayrıntılı yüzey ve diş hazırlığı gerektirir. Klinik derlemelerde farklı simanlarla benzer sağkalım aralıklarının bulunması, bütün simanların her preparasyonda birbirinin yerine kullanılabileceğini kanıtlamaz (Maroulakos et al., 2019).

Siman tipini değerlendiren gözlemsel verilerde belirgin bir seçim yanlılığı olasılığı vardır. Hekim, retansiyonu zayıf olgularda rezin simanı daha sık tercih etmiş olabilir. Böyle bir dağılımda siman grupları benzer klinik risk taşımadığından ham desimantasyon oranlarını doğrudan karşılaştırmak yanıltıcıdır. Monolitik ve

veneerli zirkonyayı birlikte değerlendiren bir derlemenin sonucu da güncel 5Y monolitik kronlar için özgül siman üstünlüğü şeklinde sunulmamalıdır (Shihabi & Chrcanovic, 2023).

Adeziv ve kendinden adeziv rezin simanlar

Kendinden adeziv rezin siman, özellikle diş yüzeyindeki basamakları azaltmayı amaçlar; zirkonya yüzeyinin bütün işlemlerden bağımsız olduğu anlamına gelmez. Bir ürün ayrı primer gerektirebilir veya belirli bir yüzey işlemiyle birlikte doğrulanmış olabilir. Diğer taraftan çok basamaklı adeziv simantasyon, uygun izolasyon sağlanmadığında yalnızca basamak sayısını artırarak öngörülebilirlik kazandırmaz. Yöntem, olgunun adezyon gereksinimi ve uygulanabilirliği birlikte düşünülerek seçilmelidir (Blatz et al., 2018; Rohr et al., 2022).

Diş tarafında mine, dentin ve kor materyali birbirinden ayrılmalıdır. Mine için asitleme, dentin için nem kontrolü ve primer uygulaması kullanılan sistemin talimatına göre yürütülmelidir. Kompozit kor, metal kor veya farklı bir alt yapı aynı yüzey işlemini gerektirmez. Asitleme süresi veya adeziv polimerizasyonu bir üründen diğerine varsayımla aktarılmamalıdır. Hedef, hem diş hem restorasyon tarafı tanımlanmış ve birbiriyle uyumlu bir simantasyon sistemidir (Blatz et al., 2016; Rohr et al., 2022).

Polimerizasyon ve ışık geçirgenliği

Rezin simanın polimerizasyonu, yüzey işleminin etkisini klinik bağlantıya dönüştüren temel basamaktır. Zirkonyanın kalınlığı, optik özellikleri ve simanın formülasyonu, restorasyon altına ulaşan ışığı ve dönüşüm derecesini etkiler. Laboratuvar verileri, monolitik zirkonya üzerinden ışınlanan dual polimerize simanlarda bile materyal türü ve kalınlıkla ilişkili farklılıklar olduğunu göstermektedir. Bu nedenle dual polimerizasyon, ışık uygulamasının gereksiz olduğu anlamına gelmez (Sulaiman et al., 2015).

Özellikle kalın veya daha opak restorasyonlarda kimyasal polimerizasyon bileşeninin yeterliliği önemlidir. Yalnızca ışıkla polimerize olan bir siman, yüksek translüsensili görünüm gerekçesiyle gelişigüzel seçilmemelidir. Işık cihazının çıkışı, uç temizliği, restorasyona uzaklığı, erişilebilen yüzeyler ve üreticinin önerdiği uygulama süresi kontrol edilmelidir. Bütün zirkonyalara uygulanabilecek tek bir ışınlama süresi veya kalınlık eşiği bulunmamaktadır (Fidalgo-Pereira et al., 2023; Sulaiman et al., 2015).

Simanın çalışma ve sertleşme süreleri de oturtma başarısını etkiler. Erken başlayan sertleşme, aşırı adeziv film kalınlığı veya yetersiz oturtma kuvveti marjinal uyumu bozabilir. Fazlalıkların temizlenmesi için kullanılan kısa ön ışınlama, son polimerizasyonun yerine geçmez. Oksijen inhibisyonunu azaltmaya yönelik kenar uygulamaları ve son ışınlama, ilgili sistemin talimatına göre tamamlanmalıdır. Polimerizasyon kalitesi yalnızca simanın yüzeyde sertleşmiş görünmesiyle değerlendirilmemelidir (Fidalgo-Pereira et al., 2023).

Simantasyon öncesi değerlendirme

İşleme başlamadan materyalin ticari adı, itriya grubu, endikasyonu ve minimum kalınlıkları doğrulanmalıdır. Laboratuvardan iç yüzeyin hangi işlemleri gördüğü öğrenilmeli; prova sırasında marjinal uyum, proksimal temaslar, oklüzyon ve restorasyonun tam oturması kontrol edilmelidir. Uyumsuz bir restorasyonu simanla telafi etmeye çalışmak yerine uyumsuzluğun nedeni giderilmelidir. Kullanılacak primer, adeziv ve simanın güncel talimatları işlem öncesinde birlikte değerlendirilmelidir (Alammar & Blatz, 2022; Blatz et al., 2018).

İzolasyon planı seçilen adeziv yaklaşımı uygulamaya elverişli olmalıdır. Marjin konumu, gingival kanama ve erişim güçlüğü öngörülmeden adeziv simantasyona başlanmamalıdır.

Kontaminasyon kontrol edilemiyorsa önce klinik koşullar düzeltilmeli; yalnızca daha güçlü bir siman seçilerek sorun çözüldüğü düşünülmemelidir. Hazırlık aşamasında kullanılacak temizleyici, primer, karıştırma ucu, ışık cihazı ve fazlalık temizleme araçlarının hazır bulunması çalışma süresinin yönetimini kolaylaştırır (Blatz et al., 2018; Kern, 2015).

Retantif tam kronlarda yaklaşım

Yeterli retansiyon ve direnç biçimi bulunan tam kronlarda ilk karar, materyal ve siman üreticilerinin konvansiyonel simantasyona izin verip vermediğidir. İzin verilen koşullarda cam iyonomer veya rezin modifiye cam iyonomer siman düşünülebilir. Diş ve restorasyon yüzeyleri seçilen simana uygun temizlenmeli, restorasyon çalışma süresi içinde tam oturtulmalı ve fazla siman ilgili sertleşme evresinde uzaklaştırılmalıdır. Rezin siman için önerilen primer basamakları konvansiyonel simana gerekçesiz biçimde eklenmemelidir (Maroulakos et al., 2019).

Retantif bir kron için rezin siman seçildiğinde ise rezin sistemin gerektirdiği iç yüzey hazırlığı, dekontaminasyon ve diş yüzeyi işlemleri eksiksiz uygulanmalıdır. “Preparasyon zaten tutucu” düşüncesi, seçilen rezin sistemin basamaklarını atlamak için gerekçe oluşturmaz. Son değerlendirme tam oturma, marjinal fazlalıklar, proksimal geçişler ve oklüzal temasları kapsamalıdır. Kullanılan sistem ve uygulanan yüzey işlemi hasta kaydında belirtilmelidir (Blatz et al., 2016; Rohr et al., 2022).

Adezyona bağımlı restorasyonlarda yaklaşım

Kısa veya retansiyonu sınırlı preparasyonlarda adeziv simantasyon gereksinimi restorasyon tasarımıyla birlikte değerlendirilmelidir. Önce mevcut diş dokusunun yeterliliği, preparasyonun düzeltilebilirliği ve izolasyon olanağı gözden geçirilmelidir. Parsiyel restorasyonlarda ya da adeziv köprülerde yalnızca monolitik zirkonyanın yüksek dayanımına

güvenilmemelidir. Yeterli bağlanma alanı ve uygun yük dağılımı bulunmayan bir tasarım, güçlü bir primerle güvenilir hâle getirilemez (Blatz et al., 2018; Kern, 2015).

Uygun olguda prova ve uyumlama tamamlandıktan sonra iç yüzey dekontamine edilir. Üreticinin izin verdiği mekanik veya tribokimyasal işlem, daha önceki laboratuvar işlemleri dikkate alınarak uygulanır. Seçilen sistemin gerektirdiği MDP içeren primer veya uygun kimyasal ajan kullanılır; çözücü önerildiği biçimde uzaklaştırılır. Diş tarafında mine, dentin ve varsa kor materyaline özgü işlemler tamamlanır. Siman çalışma süresi içinde uygulanır ve restorasyon kesintisiz biçimde tam yerine oturtulur (Blatz et al., 2016; Kern & Wegner, 1998).

Fazlalık temizliği sırasında restorasyon yerinden oynatılmamalıdır. Ara yüzlere erişim sağlayan araçlar ve diş ipi, simanın uygun sertleşme evresinde kullanılmalıdır. Son polimerizasyon erişilebilen yüzeylerden üretici talimatına göre tamamlanmalı; oklüzal kontrol ve gerekirse düzeltme sonrasında dış yüzey yeniden polisajlanmalıdır. Klinik kayıt, ileride desimantasyon gelişirse işlem sırasının incelenmesine olanak verecek ayrıntıda tutulmalıdır (da Rosa et al., 2023; Sulaiman et al., 2015).

Zirkonya adeziv köprüler için uzun takipli olumlu veriler bulunması, adezyonun klinik olarak uygulanabilirliğini destekler. Bununla birlikte sık atıf yapılan on yıllık çalışma veneerlenmiş zirkonya kanatlı köprüleri değerlendirmiştir. Bu sonuç, ince 5Y monolitik kanatlar veya farklı parsiyel tasarımlar için doğrudan uzun dönem kanıt olarak kullanılamaz. Klinik başarı, materyal kuşağı ve restorasyon tasarımı açıkça belirtilerek aktarılmalıdır (Kern et al., 2017).

İmplant destekli restorasyonlar ve titanyum kaideler

İmplant üstü simante kron ile ağız dışında titanyum kaideye bağlanıp vidalanan hibrit restorasyon aynı simantasyon problemi

değildir. İlkinde periimplant dokuların yakınında siman artığı kontrolü ön plandayken ikincisinde zirkonya–rezin ve titanyum–rezin ara yüzleri, kaide geometrisi ve üreticinin onayladığı bağlama sistemi önem taşır. Diş destekli kron protokolü bu uygulamalara bütünüyle aktarılamaz (Shadid, 2025; Weinreuter et al., 2026).

Titanyum kaideye bağlamada implant bağlantısı ve vida kanalı korunmalı, yalnızca bağlanma için tanımlanan yüzeyler işlenmelidir. Titanyum ve zirkonya yüzeyleri ayrı materyaller olarak hazırlanmalı; seçilen rezin sistemin ağız dışı bağlama endikasyonu doğrulanmalıdır. Klinik sistematik derleme, farklı CAD-CAM seramiklerin titanyum kaidelere bağlanmasında genel olarak düşük ayrılma oranları bildirmekle birlikte en iyi siman için kesin öneri sunmamaktadır. Bulgular yalnızca monolitik zirkonyaya özgü kabul edilmemelidir (Shadid, 2025).

Tablo 4. Klinik koşula göre simantasyon kararları

Klinik koşul	**Yaklaşım**	**Kritik kontrol**
Retantif tam kron	İzin verilen konvansiyonel veya uygun rezin siman	Preparasyon, materyal ve siman talimatlarının uyumu
Retansiyonu sınırlı tam kron	Tasarım değerlendirmesi ve adeziv simantasyon	İzolasyon, iki ara yüz ve polimerizasyon
Parsiyel restorasyon veya adeziv köprü	Endikasyon doğrulanır; bağlantıya bağımlı yaklaşım	Mine alanı, geometri, seramik kalınlığı ve yükler
Titanyum kaideli hibrit yapı	Ağız dışında, iki materyale özgü bağlama	Kaide geometrisi, bağlantının korunması ve sistem uyumu
Ağız içinde simante implant kronu	Retansiyon ve temizlenebilirliğe göre seçim	Siman artıkları; yalnızca radyografiye güvenilmemesi

Kaynak: (Blatz et al., 2016; Kern, 2015; Maroulakos et al., 2019; Shadid, 2025; Weinreuter et al., 2026). Tablodaki öneriler klinik sentezdir; ürün talimatlarının yerine geçmez.

İmplant üstü ağız içi simantasyonda siman fazlalıklarının bütünüyle uzaklaştırılması ayrıca önemlidir. Güncel randomize klinik araştırmada hem cam iyonomer hem kompozit siman sonrasında kalıntı saptanmış; radyografik değerlendirmenin kalıntıları güvenilir biçimde göstermediği bildirilmiştir. Bu bulgu bir simanın her implant olgusunda üstün olduğunu kanıtlamaz, fakat yalnızca radyografiye dayanarak temizliğin tamamlandığına karar verilmemesi gerektiğini gösterir (Weinreuter et al., 2026).

Laboratuvar testlerinden klinik karara geçiş

Makaslama, mikrogerilme ve çekme testleri aynı gerilme dağılımını oluşturmaz. Numune geometrisi, bağlanma alanı ve yük uygulama düzeneği ölçülen değeri etkiler. Bu nedenle farklı testlerden elde edilen MPa değerlerini tek bir başarı sıralaması gibi kullanmak uygun değildir. Laboratuvarda yüksek bağlantı dayanımı, klinik başarı için biyolojik olarak anlamlı bir eşik değer tanımlamaz. Testin hangi klinik sorunu temsil ettiği açıklanmalıdır (Inokoshi et al., 2014).

Yaşlandırma protokolleri de birbirinin yerine geçmez. Belirli sayıda termal döngüyü kesin bir klinik yıl karşılığıyla eşitlemek bilimsel olarak savunulamaz. Suda saklama, sıcaklık değişimi ve tekrarlayan yükleme farklı etkileri temsil eder; hiçbirisi tek başına ağız ortamındaki bütün koşulları yeniden üretmez. Başlangıç değerine ek olarak yaşlandırılmış dayanım, erken kopma sayısı ve kopma tipi raporlandığında sonuçların yorumu güçlenir (Chen et al., 2017; Thammajaruk et al., 2018).

Erken kopan numunelerin analizden çıkarılması özellikle önemlidir. Bağlantısı en zayıf örnekler dışlandığında kalan numunelerin ortalama değeri olduğundan olumlu görünebilir. Ayrıca aynı dişten veya bloktan elde edilen çok sayıda örneğin bağımsız kabul edilmesi, örneklem büyüklüğünün gerçekte olduğundan fazla görünmesine yol açabilir. Bu nedenle yalnızca istatistiksel

anlamlılığa değil deneysel birime ve analiz yaklaşımına da bakılmalıdır (Le et al., 2024).

Sistematik derlemelerin sınırları

Sistematik derleme başlığı taşıyan her yayın aynı kesinlikte kanıt sağlamaz. Primer ve siman formülasyonları, zirkonya türleri, yüzey parametreleri ve yaşlandırma yöntemleri değiştiğinde havuzlanmış bir etkinin klinik anlamı sınırlanabilir. Ağ meta-analizlerinde dolaylı karşılaştırmaların geçerliliği, karşılaştırılan çalışma gruplarının yeterince benzer olmasına bağlıdır. En yüksek sıralamayı alan yöntemin az sayıda ve farklı koşullardaki araştırmaya dayanması, sonucu kırılgan hâle getirebilir (Li et al., 2024; Martins et al., 2026).

Şemsiye derlemeler çok sayıda sistematik derlemeyi bir araya getirse de aynı birincil araştırmaların birden fazla kez temsil edilmesi mümkündür. Dolayısıyla derleme sayısının artması, bağımsız klinik kanıtın aynı oranda arttığını göstermez. Mevcut literatürün önemli bölümü laboratuvar çalışmalarından oluştuğu için partikül abrazyonu ve fosfat monomeri kombinasyonunu destekleyen tutarlılık, bütün zirkonyalarda belirli bir ürün veya parametre setinin klinik üstünlüğü olarak yorumlanmamalıdır (Nasri et al., 2025).

Klinik sağkalım ve simantasyon başarısı

Sağkalım, restorasyonun ağızda kalmasını ifade edebilir; başarı ise tamir, yeniden simantasyon veya başka komplikasyon olmaksızın işlev görmesini gerektiren daha sıkı bir ölçüt olabilir. Yeniden simante edilmiş bir restorasyon sağkalım analizinde korunabilir, ancak başlangıç simantasyonu açısından komplikasyon gelişmiştir. Bu ayrım yapılmadan yüksek sağkalım oranlarından kusursuz bağlantı sonucu çıkarılamaz (Kern et al., 2017; Shihabi & Chrcanovic, 2023).

Elli posterior monolitik zirkonya kronu değerlendiren prospektif çalışmada beş yıllık sağkalım %98 bulunmuş; iki desimantasyon ve bir kök kırığı bildirilmiştir. Böylece yüksek sağkalımın simantasyon komplikasyonlarını dışlamadığı görülmektedir. Güncel bir sistematik derlemede monolitik yoğun sinterlenmiş zirkonya tek kronlar için tahmini beş yıllık sağkalım %96,8 olarak hesaplanmıştır. Bu oran tek bir yüzey işleminin başarısını veya her hastanın beklenen sonucunu göstermez (Pjetursson et al., 2026; Solá-Ruiz et al., 2021).

Bu klinik araştırmaların çoğu tek başına yüzey işlemini veya siman tipini rastgele karşılaştırmak için tasarlanmamıştır. Materyal, preparasyon, operatör ve simantasyon etkileri birbirinden bütünüyle ayrılamaz. Dolayısıyla yüksek sağkalım, belirli bir primerin veya abrazyon basıncının nedensel üstünlüğü olarak sunulmamalıdır. Güncel yayın tarihi de kapsanan bütün çalışmaların güncel materyalleri değerlendirdiği anlamına gelmez; derlemelerin tarama tarihleri ve materyal tanımları ayrıca incelenmelidir (Pjetursson et al., 2026; Shihabi & Chrcanovic, 2023).

Klinik derlemelerde kullanılan çalışmaların bir kısmı eski materyallere, kısa takiplere veya veneerli restorasyonlara dayanmaktadır. Yeni yüksek translüsensili materyallerin pazara çıkış hızı ile uzun dönem klinik araştırmaların tamamlanma hızı arasında fark vardır. Güncel bir ürünün optik avantajını, eski kuşak zirkonyanın uzun dönem sonuçlarıyla birleştirip ikisi aynı materyalmiş gibi değerlendirmekten kaçınılmalıdır (Alammar & Blatz, 2022; Leitão et al., 2022).

Desimantasyon ve yeniden simantasyon

Desimantasyon geliştiğinde yalnızca daha güçlü bir siman seçmek yeterli bir değerlendirme değildir. Restorasyon kırığı veya çatlağı, marjinal uyum, preparasyon geometrisi, sekonder çürük, kor bütünlüğü ve oklüzal yükler incelenmelidir. Simanın hangi yüzeyde

kaldığı, olası zayıf ara yüz hakkında ipucu verebilir; ancak tek başına kesin neden göstermez. Kontaminasyon, yetersiz polimerizasyon ve tasarım sorunları birlikte bulunabilir (Kern, 2015; Shihabi & Chrcanovic, 2023).

Yeniden kullanım düşünülüyorsa eski siman kontrollü biçimde uzaklaştırılmalı ve kalan seramik kalınlığı değerlendirilmelidir. Önceki yüzey işlemlerinin üzerine tekrar tekrar abrazyon uygulamak, özellikle ince bölgelerde güvenli kabul edilemez. Çatlak şüphesi, belirgin uyumsuzluk veya düzeltilemeyen tasarım sorunu varsa yeniden simantasyon yerine restorasyonun yenilenmesi düşünülmelidir. Yeniden işlem protokolü, materyalin ve bağlama sisteminin talimatlarıyla uyumlu olmalıdır (Alammar & Blatz, 2022; Blatz et al., 2018).

Yeniden simantasyonun klinik olarak mümkün olması, ilk bağlantı başarısızlığının önemsiz olduğu anlamına gelmez. Uzun takipli adeziv köprü araştırmalarında yeniden bağlanan restorasyonların işlevde kalabilmesi, uygun seçilmiş olgularda kurtarma yaklaşımının değerini gösterir. Bununla birlikte bu sonuç bütün monolitik kronlara veya bütün ayrılma nedenlerine genellenemez. Başarısızlığın nedeni düzeltilmeden aynı basamakların tekrarlanması, sorunun yinelenmesine zemin hazırlayabilir (Kern et al., 2017).

Gelecek araştırmalar ve klinik çıkarımlar

Gelecek araştırmalarda 3Y, 4Y, 5Y ve bileşim geçişli zirkonyalar ayrı tanımlanmalı; ticari ürün, sinterleme koşulu, blok içindeki konum ve yüzey parametreleri açıkça bildirilmelidir. Bağlantı dayanımının yanında yorulma, kalınlık kaybı ve yüzey kusurları da incelenmelidir. Yeni bir yöntemin değerini göstermek için yalnızca işlemsiz kontrolle karşılaştırma yerine güncel mekanik ve kimyasal kombine protokollerle karşılaştırma yapılması daha açıklayıcıdır (Bernauer et al., 2026; Martins et al., 2026).

Klinik araştırmalar siman tipini preparasyon retansiyonu ve materyal grubundan ayırabilecek biçimde tasarlanmalıdır. Kontaminasyon yönetimi, polimerizasyon koşulları ve operatör etkileri kaydedilmeli; desimantasyon, yeniden simantasyon, kırık, biyolojik komplikasyon ve hasta tarafından bildirilen sonuçlar ayrı sunulmalıdır. İnce veya yüksek translüsensili adezyona bağımlı restorasyonlar için uzun dönem, doğrudan klinik veriye özellikle gereksinim vardır (Maroulakos et al., 2019; Pjetursson et al., 2026).

Sonuç

Monolitik zirkonyada yüzey işlemi ve simantasyon, materyal kuşağı, restorasyon tasarımı, preparasyonun retansiyonu ve izolasyon koşulları birlikte değerlendirilerek planlanmalıdır. Mevcut laboratuvar kanıtları, üreticinin izin verdiği mekanik yüzey hazırlığının uygun fosfat monomeri içeren kimyasal işlemle birleştirilmesini desteklemektedir. Bununla birlikte bütün zirkonyalar için geçerli tek bir abrazyon parametresi, primer veya siman belirlemek mümkün değildir. Prova sonrası dekontaminasyon, iki ara yüzün doğru hazırlanması ve yeterli polimerizasyon, seçilen yüzey işleminin klinik değer kazanması için gereklidir (Özcan & Bernasconi, 2015; Thammajaruk et al., 2018).

Retantif tam kronlar ile adezyona bağımlı restorasyonlar ayrı değerlendirilmelidir. Dış yüzeyde gerekli oklüzal düzeltmeleri izleyen polisaj, iç yüzeyde ise kontaminasyon kontrolü ve sistem uyumu öne çıkar. Klinik kararın amacı en yüksek başlangıç MPa değerini elde etmekten ibaret değildir; seramik bütünlüğünü koruyan, uygulanabilir, izlenebilir ve uzun dönem sonuçlarla desteklenebilen bir tedavi süreci oluşturmaktır. Kanıtların sınırlarını bilmek, materyal ve ürünler arasında gerekçesiz genellemeleri önlemenin temelidir (da Rosa et al., 2023; Kern, 2015).

Kaynakça

Alammar, A., & Blatz, M. B. (2022). The resin bond to high-translucent zirconia—A systematic review. *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry, 34*(1), 117–135. https://doi.org/10.1111/jerd.12876

Aurélio, I. L., Marchionatti, A. M. E., Montagner, A. F., May, L. G., & Soares, F. Z. M. (2016). Does air particle abrasion affect the flexural strength and phase transformation of Y-TZP? A systematic review and meta-analysis. *Dental Materials, 32*(6), 827–845. https://doi.org/10.1016/j.dental.2016.03.021

Bernauer, S. A., Lirgg, N. M., Ioannidis, A., Zitzmann, N. U., & Rohr, N. (2026). Flexural strength of translucent zirconia for single crowns and fixed dental prostheses—A systematic review. *Journal of Prosthodontic Research, 70*(2), 173–182. https://doi.org/10.2186/jpr.JPR_D_24_00277

Blatz, M. B., Alvarez, M., Sawyer, K., & Brindis, M. (2016). How to bond zirconia: The APC concept. *Compendium of Continuing Education in Dentistry, 37*(9), 611–617. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27700128/

Blatz, M. B., Vonderheide, M., & Conejo, J. (2018). The effect of resin bonding on long-term success of high-strength ceramics. *Journal of Dental Research, 97*(2), 132–139. https://doi.org/10.1177/0022034517729134

Chen, C., Chen, Y., Lu, Z., Qian, M., Xie, H., & Tay, F. R. (2017). The effects of water on degradation of the zirconia-resin bond. *Journal of Dentistry, 64*, 23–29. https://doi.org/10.1016/j.jdent.2017.04.004

D'Alessandro, C., Josic, U., Mazzitelli, C., Maravic, T., Graham, L., Barausse, C., Mazzoni, A., Breschi, L., & Blatz, M. B. (2024). Is zirconia surface etching a viable alternative to airborne particle abrasion? A systematic review and meta-analysis of in vitro studies. *Journal of Dentistry, 151*, Article 105394. https://doi.org/10.1016/j.jdent.2024.105394

da Rosa, L. S., Pilecco, R. O., Sarkis-Onofre, R., Kantorski, K. Z., Valandro, L. F., & Pereira, G. K. R. (2023). Should finishing, polishing or glazing be performed after grinding YSZ ceramics? A systematic review and meta-analysis. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 138*, Article 105654. https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2023.105654

da Silva, N. R., de Araújo, G. M., Vila-Nova, T. E. L., Bezerra, M. G. P. G., Calderon, P. D. S., Özcan, M., & de Assunção e Souza, R. O. (2022). Which zirconia surface-cleaning strategy improves adhesion of resin composite cement after saliva contamination? A systematic review and meta-analysis. *The Journal of Adhesive Dentistry, 24*, 175–186. https://doi.org/10.3290/j.jad.b2916437

Denry, I., & Kelly, J. R. (2008). State of the art of zirconia for dental applications. *Dental Materials, 24*(3), 299–307. https://doi.org/10.1016/j.dental.2007.05.007

Fidalgo-Pereira, R., Torres, O., Carvalho, Ó., Silva, F. S., Catarino, S. O., Özcan, M., & Souza, J. C. M. (2023). A scoping review on the polymerization of resin-matrix cements used in restorative dentistry. *Materials, 16*(4), Article 1560. https://doi.org/10.3390/ma16041560

Flores-Ferreyra, B. I., Argueta-Figueroa, L., Torres-Rosas, R., Carrasco-Gutiérrez, R. G., Casillas-Santana, M. A., & Moyaho-Bernal, M. D. L. A. (2025). Dental human enamel

wear caused by ceramic antagonists: A systematic review and network meta-analysis. *Journal of Prosthodontic Research, 69*(2), 153–162. https://doi.org/10.2186/jpr.jpr_d_23_00263

Inokoshi, M., De Munck, J., Minakuchi, S., & Van Meerbeek, B. (2014). Meta-analysis of bonding effectiveness to zirconia ceramics. *Journal of Dental Research, 93*(4), 329–334. https://doi.org/10.1177/0022034514524228

Kern, M. (2015). Bonding to oxide ceramics—Laboratory testing versus clinical outcome. *Dental Materials, 31*(1), 8–14. https://doi.org/10.1016/j.dental.2014.06.007

Kern, M., Passia, N., Sasse, M., & Yazigi, C. (2017). Ten-year outcome of zirconia ceramic cantilever resin-bonded fixed dental prostheses and the influence of the reasons for missing incisors. *Journal of Dentistry, 65*, 51–55. https://doi.org/10.1016/j.jdent.2017.07.003

Kern, M., & Wegner, S. M. (1998). Bonding to zirconia ceramic: Adhesion methods and their durability. *Dental Materials, 14*(1), 64–71. https://doi.org/10.1016/s0109-5641(98)00011-6

Le, M., Papia, E., & Larsson, C. (2024). The effect of combining primers and cements from different cement systems on the bond strength between zirconia and dentin. *BDJ Open, 10*, Article 44. https://doi.org/10.1038/s41405-024-00230-7

Leitão, C. I. M. B., Fernandes, G. V. D. O., Azevedo, L. P. P., Araújo, F. M., Donato, H., & Correia, A. R. M. (2022). Clinical performance of monolithic CAD/CAM tooth-supported zirconia restorations: Systematic review and meta-analysis. *Journal of Prosthodontic Research, 66*(3), 374–384. https://doi.org/10.2186/jpr.jpr_d_21_00081

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

Maroulakos, G., Thompson, G. A., & Kontogiorgos, E. D. (2019). Effect of cement type on the clinical performance and complications of zirconia and lithium disilicate tooth-supported crowns: A systematic review. Report of the Committee on Research in Fixed Prosthodontics of the American Academy of Fixed Prosthodontics. *The Journal of Prosthetic Dentistry, 121*(5), 754–765. https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2018.10.011

Martins, F. V., Vasques, W. F., Guyatt, G. H., & Fonseca, E. M. (2026). Effect of aluminum oxide airborne-particle abrasion on zirconia bond strength to tooth or composite resin substrates: A systematic review and meta-analysis. *The Journal of Prosthetic Dentistry, 135*(2), 278.e1–278.e16. https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2025.09.020

Nagaoka, N., Yoshihara, K., Feitosa, V. P., Tamada, Y., Irie, M., Yoshida, Y., Van Meerbeek, B., & Hayakawa, S. (2017). Chemical interaction mechanism of 10-MDP with zirconia. *Scientific Reports, 7*, Article 45563. https://doi.org/10.1038/srep45563

Nasri, S., Jaâfoura, S., Fejjari, M., Gassara, Y., Cherif, M., & Nouira, Z. (2025). Evidence on surface conditioning methods for durable and reliable bonding to zirconia restorations: An umbrella review. *The Journal of Contemporary Dental Practice, 26*(10), 1011–1024. https://doi.org/10.5005/jp-journals-10024-3944

Özcan, M., & Bernasconi, M. (2015). Adhesion to zirconia used for dental restorations: A systematic review and meta-analysis. *The Journal of Adhesive Dentistry, 17*(1), 7–26. https://doi.org/10.3290/j.jad.a33525

Pjetursson, B. E., Pitta, J., Balet, A., Bjarnadottir, G. R., Sailer, I., & Romandini, P. (2026). A systematic review and meta-analysis evaluating the survival, failure, and complication rates of metal-ceramic, veneered, and monolithic all-ceramic tooth-supported single crowns—Part 1. *The International Journal of Prosthodontics, 39*(3), 308–324. https://doi.org/10.11607/ijp.9633

Rohr, N., Märtin, S., Zitzmann, N. U., & Fischer, J. (2022). A comprehensive in vitro study on the performance of two different strategies to simplify adhesive bonding. *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry, 34*(5), 833–842. https://doi.org/10.1111/jerd.12903

Selvaraj, U., Koli, D. K., Jain, V., & Nanda, A. (2021). Evaluation of the wear of glazed and polished zirconia crowns and the opposing natural teeth: A clinical pilot study. *The Journal of Prosthetic Dentistry, 126*(1), 52–57. https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2020.04.007

Shadid, R. M. (2025). How much is stable the bonding of CAD-CAM implant-supported all-ceramic restorations to titanium bases clinically? A systematic review. *Clinical, Cosmetic and Investigational Dentistry, 17*, 181–200. https://doi.org/10.2147/ccide.s510760

Shihabi, S., & Chrcanovic, B. R. (2023). Clinical outcomes of tooth-supported monolithic zirconia vs. porcelain-veneered zirconia fixed dental prosthesis, with an additional focus on the cement type: A systematic review and meta-analysis.

Clinical Oral Investigations, 27(10), 5755–5769. https://doi.org/10.1007/s00784-023-05219-4

Solá-Ruiz, M. F., Baixauli-López, M., Roig-Vanaclocha, A., Amengual-Lorenzo, J., & Agustín-Panadero, R. (2021). Prospective study of monolithic zirconia crowns: Clinical behavior and survival rate at a 5-year follow-up. *Journal of Prosthodontic Research, 65*(3), 284–290. https://doi.org/10.2186/jpr.jpr_d_20_00034

Sulaiman, T. A., Abdulmajeed, A. A., Donovan, T. E., Ritter, A. V., Lassila, L. V., Vallittu, P. K., & Närhi, T. O. (2015). Degree of conversion of dual-polymerizing cements light polymerized through monolithic zirconia of different thicknesses and types. *The Journal of Prosthetic Dentistry, 114*(1), 103–108. https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2015.02.007

Thammajaruk, P., Guazzato, M., & Naorungroj, S. (2023). Cleaning methods of contaminated zirconia: A systematic review and meta-analysis. *Dental Materials, 39*(3), 235–245. https://doi.org/10.1016/j.dental.2023.01.009

Thammajaruk, P., Inokoshi, M., Chong, S., & Guazzato, M. (2018). Bonding of composite cements to zirconia: A systematic review and meta-analysis of in vitro studies. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 80*, 258–268. https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2018.02.008

Weinreuter, M., Richter, K., Stober, T., Rammelsberg, P., & Kappel, S. (2026). Residual cement excess of composite versus glass ionomer cement in implant-supported single crowns after different intraoral exposure times—A randomized controlled clinical trial. *Clinical Oral Implants Research, 37*(6), 714–721. https://doi.org/10.1111/clr.70113

Zhang, Y., & Lawn, B. R. (2018). Novel zirconia materials in dentistry. *Journal of Dental Research*, *97*(2), 140–147. https://doi.org/10.1177/0022034517737483

BÖLÜM 9

SABİT PROTETİK RESTORASYONLARDA ADEZİV SİMANTASYON: YÜZEY İŞLEMLERİ VE SİMAN SEÇİMİ

NAFİA EBRU POLAT AYDOĞDU[1]

Giriş

Sabit protetik restorasyonların klinik başarısı yalnızca doğru preparasyon, uygun materyal seçimi ve hassas üretime değil, restorasyonun dişe veya implant abutmentına nasıl bağlandığına da bağlıdır. Simantasyon, restorasyon ile destek yapı arasındaki boşluğu dolduran ve restorasyonun yerinde kalmasını sağlayan son klinik basamaktır (Pameijer, 2012; Rosenstiel et al., 1998). Bu basamakta yapılan bir hata, aylarca süren planlama ve üretim emeğini kısa sürede boşa çıkarabilir.

Geleneksel simantasyonda tutuculuk büyük ölçüde preparasyonun geometrisine dayanır. Simanın görevi, restorasyon ile diş arasındaki mikroskobik düzensizliklere girerek mekanik bir kilitlenme oluşturmaktır (Pameijer, 2012). Adeziv simantasyonda ise rezin bazlı bir siman, hem diş dokusuna hem de restorasyon yüzeyine mikromekanik ve kimyasal olarak bağlanır. Bu sayede

[1] Uzm. Dt., Erzurum Ağız ve Diş Sağlığı Merkezi, Protetik Diş Tedavisi, ORCID: 0009-0000-6119-9349

restorasyon, diş ile tek bir bütün gibi davranarak fonksiyonel kuvvetlere karşı koyar (Manso & Carvalho, 2017).

Adeziv simantasyonun önemi, son yirmi yılda kullanılan materyallerdeki değişimle birlikte belirgin biçimde artmıştır. Metal destekli restorasyonların yerini büyük ölçüde tam seramik ve hibrit materyaller almıştır (Spitznagel et al., 2018; Zhang & Lawn, 2018). Laminate veneer, inley ve onley gibi minimal invaziv restorasyonlar ile rezin bağlantılı köprüler, yeterli mekanik tutuculuk sağlayan bir preparasyon geometrisine sahip değildir ve klinik başarıları doğrudan adeziv bağlantıya bağlıdır (Kern et al., 2017; Peumans et al., 2000). Blatz et al. (2003) tarafından yapılan literatür derlemesi, silika bazlı seramiklere rezin bağlantının iyi belgelendiğini, buna karşın yüksek dayanıklı oksit seramiklere bağlantının daha az öngörülebilir olduğunu ve farklı yöntemler gerektirdiğini ortaya koymuştur.

Günümüzde klinisyen, çok sayıda siman, primer ve yüzey işlemi seçeneğiyle karşı karşıyadır. Doğru seçim; restorasyon materyaline, preparasyonun tutuculuğuna, izolasyon olanaklarına ve bağlanacak diş dokusunun niteliğine göre yapılmalıdır. Bu bölümde siman türleri, diş ve restorasyon yüzeylerinin hazırlanması, materyale göre siman seçimi ve klinik uygulama protokolü güncel literatür ışığında ele alınacaktır.

Siman Türleri

Protetik restorasyonların simantasyonunda kullanılan materyaller, bağlanma mekanizmalarına göre üç ana grupta toplanabilir: konvansiyonel simanlar, rezin modifiye cam iyonomer simanlar ve rezin simanlar (Manso & Carvalho, 2017; Rosenstiel et al., 1998).

Konvansiyonel Simanlar

Çinko fosfat, polikarboksilat ve geleneksel cam iyonomer simanlar bu grupta yer alır. Çinko fosfat siman, uzun klinik geçmişi olan ve yalnızca mekanik kilitlenmeyle tutuculuk sağlayan bir materyaldir. Cam iyonomer simanlar ise diş dokusuna sınırlı kimyasal bağlanma gösterir ve flor salımı yapar (Pameijer, 2012). Bu simanlar, yeterli tutuculuk sağlayan preparasyonlarda metal destekli restorasyonlar ve yüksek dayanıklı oksit seramikler için hâlâ kullanılabilmektedir. Ancak düşük bağlanma dayanımları nedeniyle cam seramiklerin ve minimal invaziv restorasyonların simantasyonunda uygun değildir (Manso & Carvalho, 2017).

Rezin Modifiye Cam İyonomer Simanlar

Rezin modifiye cam iyonomer simanlar, geleneksel cam iyonomere rezin monomerlerin eklenmesiyle elde edilmiştir. Daha yüksek dayanım, daha düşük çözünürlük ve kolay kullanım sunarlar. Bununla birlikte su emilimine bağlı genleşme gösterebildikleri için düşük dayanıklı cam seramik kronlarda çatlak riskine yol açabilecekleri bildirilmiştir (Leevailoj et al., 1998). Bu nedenle özellikle metal destekli ve zirkonya restorasyonlarda tercih edilirler.

Rezin Simanlar

Rezin simanlar, kompozit rezinlere benzer bir yapıya sahiptir ve en yüksek bağlanma dayanımını sağlayan gruptur. Polimerizasyon biçimine göre ışıkla, kimyasal olarak veya her iki yolla (dual) sertleşen tipleri vardır. Işıkla sertleşen simanlar, ince ve ışık geçirgen restorasyonlarda, özellikle laminate veneerlerde renk stabilitesi ve çalışma süresi açısından avantaj sağlar. Kalın veya opak restorasyonlarda ise ışığın yeterince ulaşamayacağı göz önünde bulundurularak dual sertleşen simanlar tercih edilir (Manso & Carvalho, 2017).

Rezin simanlar diş dokusuna bağlanma stratejisine göre üç alt grupta değerlendirilir:

- **Total-etch (etch-and-rinse) sistemlerle kullanılan simanlar:** Diş yüzeyi fosforik asitle pürüzlendirilir, yıkanır ve ardından ayrı bir adeziv uygulanır. Özellikle minede en güvenilir bağlantıyı sağlar, ancak teknik hassasiyeti yüksektir (Pashley et al., 2011).
- **Self-etch sistemlerle kullanılan simanlar:** Asidik monomer içeren primerler, smear tabakasını ayrıca yıkamaya gerek kalmadan çözerek diş yüzeyini hazırlar. Dentinde postoperatif hassasiyet riski daha düşüktür (Van Meerbeek et al., 2011).
- **Self-adeziv rezin simanlar:** Diş yüzeyine ayrı bir asitleme veya adeziv uygulaması gerektirmeden bağlanırlar. Ferracane et al. (2011), bu simanların konvansiyonel simanların kolay uygulanabilirliğini rezin simanların mekanik özellikleriyle birleştiren hibrit materyaller olduğunu belirtmektedir. Ancak mineye bağlanmaları sınırlıdır ve tutuculuğun büyük ölçüde preparasyon geometrisine dayandığı kron ve köprülerde kullanılmaları daha uygundur (Ferracane et al., 2011; Manso & Carvalho, 2017).

Son yıllarda yaygınlaşan üniversal adezivler, hem total-etch hem de self-etch modunda kullanılabilmekte ve birçoğu 10-metakriloiloksidesil dihidrojen fosfat (MDP) gibi fonksiyonel monomerler içermektedir. Bu özellikleri sayesinde aynı sistemle hem diş dokusuna hem de zirkonya ve metal gibi restorasyon yüzeylerine bağlanma sağlanabilmektedir (Nagaoka et al., 2017; Yoshida et al., 2004).

Diş Yüzeyinin Hazırlanması

Adeziv simantasyonun bir tarafını restorasyon, diğer tarafını diş dokusu oluşturur. Restorasyon yüzeyi laboratuvarda veya klinikte kontrollü koşullarda hazırlanabilirken, diş yüzeyi ağız ortamının nem, tükürük ve kan gibi değişkenlerine açıktır. Bu nedenle bağlantının en zayıf halkası çoğu zaman diş tarafıdır (Pashley et al., 2011).

Mine ve Dentine Bağlanma

Mine, yüksek mineral içeriği sayesinde fosforik asitle pürüzlendirildiğinde rezinin derinlemesine nüfuz edebileceği düzenli mikroporlar oluşturur. Bu nedenle mineye bağlantı güçlü ve uzun ömürlüdür (Buonocore, 1955). Preparasyonun mümkün olduğunca mine sınırları içinde kalması, özellikle laminate veneer ve onley gibi restorasyonlarda klinik başarıyı artıran önemli bir ilkedir (Gresnigt et al., 2019; Peumans et al., 2000).

Dentin ise organik içeriği yüksek, nemli ve tübüler yapıda bir dokudur. Dentine bağlantı, asitlenen yüzeyde açığa çıkan kollajen ağının rezinle infiltre edilmesiyle oluşan hibrit tabaka aracılığıyla sağlanır (Nakabayashi et al., 1982). Bu süreç nem dengesine son derece duyarlıdır. Aşırı kurutma kollajen ağının çökmesine, aşırı nem ise rezinin seyrelmesine yol açarak bağlantıyı zayıflatabilir (Pashley et al., 2011).

Geçici Simana Bağlı Kontaminasyon

Preparasyon ile kalıcı simantasyon arasındaki dönemde kullanılan geçici simanlar, özellikle öjenol içerenler, dentin yüzeyinde kalıntı bırakarak rezin simanın polimerizasyonunu ve bağlanmasını olumsuz etkileyebilir. Adeziv simantasyon planlanan vakalarda öjenolsüz geçici simanların tercih edilmesi ve kalıcı simantasyon öncesinde yüzeyin pomza veya hava-partikül

aşındırması ile dikkatlice temizlenmesi önerilmektedir (Qanungo et al., 2016).

Erken Dentin Örtülemesi (Immediate Dentin Sealing)

Magne (2005), indirekt adeziv restorasyonlarda preparasyon sırasında açığa çıkan dentinin, ölçü alınmadan hemen önce bir dentin bağlayıcı ajanla örtülenmesini önermiştir. Erken dentin örtülemesi adı verilen bu yaklaşım, taze kesilmiş dentine bağlantının en iyi koşullarda oluşmasını sağlar. Hibrit tabaka, restorasyonun yerleştirilmesinden önce stres altında kalmadan olgunlaşır. Bu yöntemin daha yüksek bağlanma dayanımı, daha az aralık oluşumu, daha az bakteriyel sızıntı ve daha düşük postoperatif hassasiyet sağladığı bildirilmiştir (Magne, 2005; Magne et al., 2005). Gresnigt et al. (2019), 11 yıllık prospektif klinik çalışmalarında erken dentin örtülemesinin laminate veneerlerin uzun dönem klinik performansını olumlu yönde etkilediğini bildirmiştir.

Erken dentin örtülemesi uygulanırken dikkat edilmesi gereken noktalar şunlardır:

- Adeziv uygulandıktan sonra yüzeydeki oksijen inhibisyon tabakası gliserin jel altında polimerize edilerek veya alkolle silinerek uzaklaştırılmalıdır. Aksi hâlde bazı ölçü materyallerinin sertleşmesi engellenebilir.
- Dolgulu adeziv kullanımı, daha kalın ve esnek bir ara tabaka oluşturarak işlemi kolaylaştırır.
- Kalıcı simantasyon öncesinde örtülenmiş yüzey hava-partikül aşındırma ile pürüzlendirilmeli ve üzerine yeniden adeziv uygulanmalıdır.
- Yüzeysel ve sınırlı dentin açıklıklarında ek kalınlık oluşturacağı için gerekli olmayabilir (Qanungo et al., 2016).

Restorasyon Yüzeyinin Hazırlanması

Restorasyonun iç yüzeyine uygulanacak işlem, materyalin kimyasal yapısına göre belirlenir. Silika içeren cam seramikler ile silika içermeyen oksit seramikler, birbirinden temel olarak farklı yaklaşımlar gerektirir (Blatz et al., 2003). Yanlış yüzey işlemi, en iyi siman kullanılsa bile bağlantının başarısız olmasına yol açabilir.

Cam Seramikler

Feldspatik seramikler, lösit ile güçlendirilmiş seramikler ve lityum disilikat gibi silika bazlı cam seramiklerde altın standart yaklaşım, hidroflorik asitle pürüzlendirme ve ardından silan uygulamasıdır. Hidroflorik asit, seramiğin camsı fazını seçici olarak çözerek mikromekanik tutuculuk sağlayan bir yüzey oluşturur. Silan ise seramikteki silika ile rezin simandaki metakrilat grupları arasında kimyasal bir köprü kurar (Lung & Matinlinna, 2012; Matinlinna et al., 2018).

Tian et al. (2014), cam seramik ile rezin siman arasındaki bağlantıyı etkileyen faktörleri inceleyen sistematik derlemelerinde seramiğin türü ve kristal yapısı, yüzey işlemi, siman tipi ve polimerizasyon yönteminin bağlantı üzerinde belirleyici olduğunu bildirmiştir. Asitleme süresi ve asit konsantrasyonu seramik türüne göre değişir ve üretici önerilerine uyulması önemlidir. Aşırı asitleme seramiğin yapısını zayıflatabilir, yetersiz asitleme ise bağlantıyı azaltır (Tian et al., 2014).

Cam seramikler için önerilen temel basamaklar şunlardır:

- Prova sonrası restorasyonun tükürük ve protein kontaminasyonundan arındırılması
- Üreticinin önerdiği konsantrasyon ve sürede hidroflorik asit uygulaması
- Asidin bol su ile yıkanması ve yüzeyin kurutulması

- Silan uygulanması ve çözücünün tamamen buharlaşmasının beklenmesi
- İsteğe bağlı olarak ince bir adeziv tabakası uygulanması

Günümüzde hidroflorik asit ve silanı tek basamakta birleştiren kendinden asitli seramik primerleri de piyasada bulunmaktadır. Bu ürünler kullanımı kolaylaştırsa da uzun dönem klinik verileri henüz sınırlıdır.

Zirkonya ve Diğer Oksit Seramikler

Zirkonya, camsı faz içermediği için hidroflorik asitle pürüzlendirilemez ve silanla kimyasal bağlantı oluşturmaz (Thompson et al., 2011). Uzun süre bağlanamayan bir materyal olarak görülmüş olsa da güncel literatür bu görüşü değiştirmiştir (Kern, 2015; Kern & Wegner, 1998). Inokoshi et al. (2014), 144 makaledeki 1.371 bağlanma testini değerlendirdikleri meta-analizde, zirkonyaya kalıcı bağlantı için mekanik ve kimyasal ön işlemlerin birlikte uygulanmasının özellikle kritik olduğunu ve yaşlandırma sonrasında kompozit esaslı bir siman kullanıldığı sürece siman markasının belirleyici olmadığını göstermiştir. Aynı grubun laboratuvar çalışmasında da mekanik ve kimyasal ön işlemlerin birlikte uygulandığı gruplarda bağlantının yaşlandırma sonrasında daha dayanıklı olduğu gösterilmiştir (Inokoshi et al., 2013). Özcan ve Bernasconi (2015) de sistematik derleme ve meta-analizlerinde, zirkonyaya bağlantının dayanıklılığında fizikokimyasal yüzey işlemlerinin ve fosfat monomeri içeren sistemlerin belirleyici olduğunu bildirmiştir.

Blatz et al. (2016), zirkonyaya bağlanmayı üç basamakta özetleyen APC konseptini önermiştir:

1. **A (Air-particle abrasion):** Restorasyonun iç yüzeyinin alüminyum oksit partikülleriyle düşük basınçta kumlanması

2. **P (Primer):** MDP gibi fosfat monomeri içeren bir zirkonya primerinin uygulanması
3. **C (Composite resin):** Adeziv bir kompozit rezin siman ile simantasyon

MDP monomeri, fosfat grupları aracılığıyla zirkonya yüzeyindeki metal oksitlerle kimyasal bağ kurar (Nagaoka et al., 2017). Kumlama ise hem yüzey alanını artırır hem de yüzeydeki kontaminasyonu temizler (Yang et al., 2010). Bununla birlikte, kumlama basıncının ve partikül boyutunun aşırı olmaması gerekir. Özellikle ince ve yüksek translüsent zirkonyalarda yüzey hasarı ve faz dönüşümü riski göz önünde bulundurulmalıdır (Zhang & Lawn, 2018).

Zirkonya prova sırasında tükürükle temas ettiğinde yüzeydeki fosfat gruplarını bağlayarak MDP'nin etkisini azaltabilir. Bu kontaminasyon yalnızca su ile yıkanarak giderilemez (Yang et al., 2008). Prova sonrasında yeniden kumlama veya özel temizleme solüsyonlarının kullanılması önerilmektedir.

Hibrit Materyaller

Polimer infiltre seramik ağ yapılar ve rezin nano seramikler gibi hibrit materyaller, hem seramik hem de polimer faz içerir. Bu materyallerde yüzey işlemi üreticiden üreticiye farklılık gösterir. Polimer infiltre seramik ağlar genellikle cam seramiklere benzer şekilde hidroflorik asit ve silanla hazırlanırken, rezin içeriği yüksek olan materyallerde kumlama ve silan uygulaması önerilebilmektedir. Bu nedenle hibrit materyallerde mutlaka üreticinin talimatlarına uyulmalıdır (Spitznagel et al., 2018).

Metal Yüzeyler

Metal destekli restorasyonlarda ve titanyum abutmentlarda iç yüzey kumlanarak pürüzlendirilir. Değerli olmayan alaşımlar ve titanyum, MDP içeren metal primerler veya üniversal adezivlerle

kimyasal olarak bağlanabilir. Değerli alaşımlarda ise kükürt içeren özel primerlere ihtiyaç duyulur (Thompson et al., 2011).

Siman Seçimi

Siman seçiminde tek bir doğru cevap yoktur. Karar; restorasyon materyalinin dayanımı, preparasyonun mekanik tutuculuğu, restorasyonun kalınlığı ve ışık geçirgenliği, izolasyon olanakları ve bağlanılacak diş dokusunun mine veya dentin olmasına göre verilmelidir (Manso & Carvalho, 2017).

Genel bir kural olarak, düşük ve orta dayanıklı cam seramikler rezin bağlantıyla hem tutuculuk hem de dayanım kazanır. Bu nedenle bu materyallerde adeziv simantasyon zorunlu kabul edilir. Blatz et al. (2018), rezin bağlantının silika bazlı seramiklerde uzun süredir altın standart olduğunu, ancak çok sayıda ön işlem basamağı gerektirdiği için teknik hassasiyetinin konvansiyonel simantasyondan yüksek olduğunu vurgulamaktadır. Aynı derlemede, tam kron ve köprü formundaki yüksek dayanıklı seramik restorasyonların konvansiyonel simanlarla da uzun dönemde yüksek sağkalım gösterdiği, buna karşın çalışmaların çoğunun rezin bağlantıyı önerdiği bildirilmektedir. Tek üyeli konsol tasarımlı yüksek dayanıklı seramik rezin bağlantılı köprüler de uzun dönemde yüksek başarı göstermektedir (Blatz et al., 2018; Kern et al., 2017). Tek kronlara ilişkin bir sistematik derlemede de lityum disilikat ve zirkonya esaslı tek kronların beş yıllık sağkalım oranlarının %90'ın üzerinde olduğu bildirilmiştir (Sailer et al., 2015).

Tablo 1'de restorasyon tipine ve materyale göre önerilen yüzey işlemleri ile siman seçenekleri özetlenmiştir.

Tablo 1. Restorasyon tipine ve materyale göre önerilen yüzey işlemleri ve siman seçenekleri

Restorasyon / materyal	**Restorasyon yüzey işlemi**	**Önerilen siman**	**Not**
Feldspatik seramik laminate veneer	Hidroflorik asit + silan	Işıkla sertleşen rezin siman, total-etch adeziv	Mine sınırları içinde preparasyon tercih edilir
Lityum disilikat inley, onley, kron	Hidroflorik asit + silan	Dual sertleşen rezin siman (veneerde ışıkla sertleşen)	Kronlarda yeterli tutuculuk varsa self-adeziv siman kullanılabilir
Zirkonya kron ve köprü (tutucu preparasyon)	Kumlama + MDP primer	Self-adeziv rezin siman veya MDP içeren rezin siman	Rezin modifiye cam iyonomer de bir seçenektir
Zirkonya rezin bağlantılı köprü, onley veya düşük tutuculuklu preparasyon	Kumlama + MDP primer (APC konsepti)	Adeziv rezin siman	Kontaminasyon kontrolü kritik önemdedir
Hibrit materyaller	Üreticiye göre hidroflorik asit veya kumlama + silan	Adeziv rezin siman	Üretici talimatı esas alınmalıdır
Metal destekli restorasyonlar	Kumlama (+ metal primer)	Konvansiyonel siman, rezin modifiye cam iyonomer veya self-adeziv rezin siman	Tutuculuk büyük ölçüde preparasyona dayanır

Kaynak: Blatz et al. (2003, 2016, 2018), Inokoshi et al. (2014), Tian et al. (2014), Ferracane et al. (2011), Özcan ve Bernasconi (2015) ve Spitznagel et al. (2018) temel alınarak yazar tarafından hazırlanmıştır.

İmplant üstü simante restorasyonlarda ek bir husus, artık simanın peri-implant dokularda kalması ve enflamasyona yol açma riskidir (Wilson, 2009). Bu nedenle implant üstü restorasyonlarda simanın miktarı kontrol edilmeli, bitim çizgisi mümkün olduğunca

dişeti seviyesinde veya yakınında konumlandırılmalı ve artık simanın tamamen temizlendiğinden emin olunmalıdır (Linkevicius et al., 2011).

Klinik Uygulama Protokolü

Adeziv simantasyon, çok sayıda basamaktan oluşan ve her basamağın bir sonrakini etkilediği bir süreçtir. Aşağıda cam seramik bir restorasyon için genel bir klinik protokol özetlenmiştir. Kullanılan ürünlere göre basamaklar değişebileceğinden üretici talimatları her zaman esas alınmalıdır (Manso & Carvalho, 2017; Tian et al., 2014).

1. **Geçici restorasyonun çıkarılması ve temizlik:** Geçici siman kalıntıları el aletleri ve florür içermeyen pomza ile uzaklaştırılır. Erken dentin örtülemesi uygulanmışsa yüzey hava-partikül aşındırma ile hazırlanır.
2. **Prova:** Restorasyonun uyumu, kontaktları ve rengi kontrol edilir. Renk uyumunu değerlendirmek için siman rengine uygun suda çözünür prova jelleri kullanılabilir. Oklüzyon kontrolü, ince seramiklerde kırılma riskini azaltmak için simantasyon sonrasına bırakılabilir.
3. **Restorasyonun hazırlanması:** Prova sonrasında restorasyon temizlenir ve materyale uygun yüzey işlemi (hidroflorik asit + silan veya kumlama + MDP primer) uygulanır.
4. **İzolasyon:** Mümkün olan her durumda lastik örtü (rubber dam) kullanılması önerilir. Lastik örtünün uygulanamadığı durumlarda pamuk rulolar, retraksiyon ipleri ve tükürük emiciler ile etkin nem kontrolü sağlanmalıdır.

5. **Diş yüzeyinin hazırlanması:** Seçilen adeziv stratejiye göre mine ve dentin asitlenir, adeziv uygulanır. Adezivin siman ile birlikte mi yoksa ayrı olarak mı polimerize edileceği, restorasyonun tam oturmasını engellememesi açısından dikkate alınmalıdır.
6. **Simanın uygulanması ve yerleştirme:** Siman restorasyonun iç yüzeyine uygulanır ve restorasyon hafif ve kontrollü bir basınçla yerine oturtulur.
7. **Artık simanın uzaklaştırılması:** Kısa süreli ön polimerizasyon (tack-curing) ile jel kıvamına getirilen artık siman, sonda ve diş ipiyle temizlenir. Bu basamak özellikle aproksimal bölgelerde titizlik gerektirir.
8. **Polimerizasyon:** Oksijen inhibisyon tabakasını önlemek için kenarlara gliserin jel uygulanır ve her yüzeyden yeterli süre ışık verilir.
9. **Bitirme ve kontrol:** Kenarlar bitirilip cilalanır, oklüzyon kontrol edilir ve gerekirse düzeltilir.

Başarısızlık Nedenleri ve Önleme

Adeziv simantasyondaki başarısızlıklar genellikle tek bir nedene değil, birden fazla küçük hatanın birikimine bağlıdır. Klinikte en sık karşılaşılan sorunlar ve bunları önlemeye yönelik öneriler aşağıda özetlenmiştir.

- **Kontaminasyon:** Tükürük, kan, sulkus sıvısı ve prova jelleri bağlantı yüzeylerini kirletebilir (Yang et al., 2008). Etkin izolasyon ve materyale uygun temizleme protokolleri bu riski azaltır.

- **Yanlış yüzey işlemi:** Zirkonyaya hidroflorik asit veya yalnızca silan uygulanması, cam seramiklerde ise asitleme basamağının atlanması bağlantının başarısız olmasına yol açar. Materyalin doğru tanımlanması bu nedenle önemlidir.
- **Ürün uyumsuzluğu:** Bazı asidik adezivler ile kimyasal sertleşen simanlar arasında uyumsuzluk görülebilir (Van Meerbeek et al., 2011). Aynı üreticinin uyumlu sistemlerinin kullanılması önerilir.
- **Yetersiz polimerizasyon:** Kalın ve opak restorasyonlarda yalnızca ışıkla sertleşen siman kullanımı yetersiz polimerizasyona neden olabilir. Bu durumlarda dual sertleşen simanlar tercih edilmelidir.
- **Artık siman:** Temizlenmeyen siman kalıntıları dişeti enflamasyonuna, plak birikimine ve implantlarda peri-implant hastalığa zemin hazırlayabilir (Wilson, 2009).
- **Postoperatif hassasiyet:** Dentinde aşırı asitleme, aşırı kurutma veya yetersiz örtüleme hassasiyete yol açabilir. Self-etch stratejiler ve erken dentin örtülemesi bu riski azaltabilir (Magne et al., 2005; Van Meerbeek et al., 2011).
- **Kenar renklenmesi:** Kenarlarda yetersiz polimerizasyon, artık siman ve bitirme-cila eksikliği zamanla renklenmeye neden olabilir.

Bu hataların büyük bölümü, basamakların standart bir protokole bağlanması ve her basamağın üretici talimatına uygun biçimde uygulanmasıyla önlenebilir.

Sonuç

Adeziv simantasyon, günümüz sabit protetik tedavisinin ayrılmaz bir parçasıdır. Özellikle cam seramikler, minimal invaziv restorasyonlar ve rezin bağlantılı köprülerde klinik başarı doğrudan adeziv bağlantının kalitesine bağlıdır. Yüksek dayanıklı oksit seramiklerde ise tutucu preparasyonlarda konvansiyonel simantasyon hâlâ bir seçenek olmakla birlikte, uygun protokolle uygulanan rezin bağlantı ek güvenlik sağlamaktadır (Blatz et al., 2018; Kern, 2015).

Başarılı bir adeziv simantasyonun temel ilkeleri şöyle özetlenebilir: restorasyon materyalinin doğru tanımlanması, materyale özgü yüzey işleminin uygulanması (cam seramiklerde hidroflorik asit ve silan, zirkonyada kumlama ve MDP primer), diş yüzeyinin kontaminasyondan korunması, etkin izolasyon ve artık simanın eksiksiz temizlenmesi. Erken dentin örtülemesi, geniş dentin açıklığı bulunan indirekt restorasyonlarda bağlantıyı güçlendiren yararlı bir yaklaşımdır.

Siman ve adeziv sistemlerin hızla değiştiği göz önüne alındığında, klinisyenin hem temel ilkeleri hem de kullandığı ürünlerin özelliklerini iyi bilmesi gerekir. Yeni ürünlerin, özellikle tek basamaklı seramik primerleri ve yüksek translüsent zirkonyalara yönelik protokollerin, uzun dönemli klinik çalışmalarla değerlendirilmesine ihtiyaç vardır.

Kaynakça

Blatz, M. B., Alvarez, M., Sawyer, K., & Brindis, M. (2016). How to bond zirconia: The APC concept. *Compendium of Continuing Education in Dentistry, 37*(9), 611–617. https://cced.cdeworld.com/courses/5028

Blatz, M. B., Sadan, A., & Kern, M. (2003). Resin-ceramic bonding: A review of the literature. *The Journal of Prosthetic Dentistry, 89*(3), 268–274. https://doi.org/10.1067/mpr.2003.50

Blatz, M. B., Vonderheide, M., & Conejo, J. (2018). The effect of resin bonding on long-term success of high-strength ceramics. *Journal of Dental Research, 97*(2), 132–139. https://doi.org/10.1177/0022034517729134

Buonocore, M. G. (1955). A simple method of increasing the adhesion of acrylic filling materials to enamel surfaces. *Journal of Dental Research, 34*(6), 849–853. https://doi.org/10.1177/00220345550340060801

Ferracane, J. L., Stansbury, J. W., & Burke, F. J. T. (2011). Self-adhesive resin cements – chemistry, properties and clinical considerations. *Journal of Oral Rehabilitation, 38*(4), 295–314. https://doi.org/10.1111/j.1365-2842.2010.02148.x

Gresnigt, M. M. M., Cune, M. S., Schuitemaker, J., van der Made, S. A. M., Meisberger, E. W., Magne, P., & Özcan, M. (2019). Performance of ceramic laminate veneers with immediate dentine sealing: An 11 year prospective clinical trial. *Dental Materials, 35*(7), 1042–1052. https://doi.org/10.1016/j.dental.2019.04.008

Inokoshi, M., De Munck, J., Minakuchi, S., & Van Meerbeek, B. (2014). Meta-analysis of bonding effectiveness to zirconia

ceramics. *Journal of Dental Research, 93*(4), 329–334. https://doi.org/10.1177/0022034514524228

Inokoshi, M., Kameyama, A., De Munck, J., Minakuchi, S., & Van Meerbeek, B. (2013). Durable bonding to mechanically and/or chemically pre-treated dental zirconia. *Journal of Dentistry, 41*(2), 170–179. https://doi.org/10.1016/j.jdent.2012.10.017

Kern, M. (2015). Bonding to oxide ceramics—Laboratory testing versus clinical outcome. *Dental Materials, 31*(1), 8–14. https://doi.org/10.1016/j.dental.2014.06.007

Kern, M., Passia, N., Sasse, M., & Yazigi, C. (2017). Ten-year outcome of zirconia ceramic cantilever resin-bonded fixed dental prostheses and the influence of the reasons for missing incisors. *Journal of Dentistry, 65*, 51–55. https://doi.org/10.1016/j.jdent.2017.07.003

Kern, M., & Wegner, S. M. (1998). Bonding to zirconia ceramic: Adhesion methods and their durability. *Dental Materials, 14*(1), 64–71. https://doi.org/10.1016/S0109-5641(98)00011-6

Leevailoj, C., Platt, J. A., Cochran, M. A., & Moore, B. K. (1998). In vitro study of fracture incidence and compressive fracture load of all-ceramic crowns cemented with resin-modified glass ionomer and other luting agents. *The Journal of Prosthetic Dentistry, 80*(6), 699–707. https://doi.org/10.1016/S0022-3913(98)70058-7

Linkevicius, T., Vindasiute, E., Puisys, A., & Peciuliene, V. (2011). The influence of margin location on the amount of undetected cement excess after delivery of cement-retained implant restorations. *Clinical Oral Implants Research,*

22(12), 1379–1384. https://doi.org/10.1111/j.1600-0501.2010.02119.x

Lung, C. Y. K., & Matinlinna, J. P. (2012). Aspects of silane coupling agents and surface conditioning in dentistry: An overview. *Dental Materials, 28*(5), 467–477. https://doi.org/10.1016/j.dental.2012.02.009

Magne, P. (2005). Immediate dentin sealing: A fundamental procedure for indirect bonded restorations. *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry, 17*(3), 144–154. https://doi.org/10.1111/j.1708-8240.2005.tb00103.x

Magne, P., Kim, T. H., Cascione, D., & Donovan, T. E. (2005). Immediate dentin sealing improves bond strength of indirect restorations. *The Journal of Prosthetic Dentistry, 94*(6), 511–519. https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2005.10.010

Manso, A. P., & Carvalho, R. M. (2017). Dental cements for luting and bonding restorations: Self-adhesive resin cements. *Dental Clinics of North America, 61*(4), 821–834. https://doi.org/10.1016/j.cden.2017.06.006

Matinlinna, J. P., Lung, C. Y. K., & Tsoi, J. K. H. (2018). Silane adhesion mechanism in dental applications and surface treatments: A review. *Dental Materials, 34*(1), 13–28. https://doi.org/10.1016/j.dental.2017.09.002

Nagaoka, N., Yoshihara, K., Feitosa, V. P., Tamada, Y., Irie, M., Yoshida, Y., Van Meerbeek, B., & Hayakawa, S. (2017). Chemical interaction mechanism of 10-MDP with zirconia. *Scientific Reports, 7*, Article 45563. https://doi.org/10.1038/srep45563

Nakabayashi, N., Kojima, K., & Masuhara, E. (1982). The promotion of adhesion by the infiltration of monomers into

tooth substrates. *Journal of Biomedical Materials Research, 16*(3), 265–273. https://doi.org/10.1002/jbm.820160307

Özcan, M., & Bernasconi, M. (2015). Adhesion to zirconia used for dental restorations: A systematic review and meta-analysis. *The Journal of Adhesive Dentistry, 17*(1), 7–26. https://doi.org/10.3290/j.jad.a33525

Pameijer, C. H. (2012). A review of luting agents. *International Journal of Dentistry, 2012*, Article 752861. https://doi.org/10.1155/2012/752861

Pashley, D. H., Tay, F. R., Breschi, L., Tjäderhane, L., Carvalho, R. M., Carrilho, M., & Tezvergil-Mutluay, A. (2011). State of the art etch-and-rinse adhesives. *Dental Materials, 27*(1), 1–16. https://doi.org/10.1016/j.dental.2010.10.016

Peumans, M., Van Meerbeek, B., Lambrechts, P., & Vanherle, G. (2000). Porcelain veneers: A review of the literature. *Journal of Dentistry, 28*(3), 163–177. https://doi.org/10.1016/S0300-5712(99)00066-4

Qanungo, A., Aras, M. A., Chitre, V., Mysore, A., Amin, B., & Daswani, S. R. (2016). Immediate dentin sealing for indirect bonded restorations. *Journal of Prosthodontic Research, 60*(4), 240–249. https://doi.org/10.1016/j.jpor.2016.04.001

Rosenstiel, S. F., Land, M. F., & Crispin, B. J. (1998). Dental luting agents: A review of the current literature. *The Journal of Prosthetic Dentistry, 80*(3), 280–301. https://doi.org/10.1016/S0022-3913(98)70128-3

Sailer, I., Makarov, N. A., Thoma, D. S., Zwahlen, M., & Pjetursson, B. E. (2015). All-ceramic or metal-ceramic tooth-supported fixed dental prostheses (FDPs)? A systematic review of the survival and complication rates.

Part I: Single crowns (SCs). *Dental Materials, 31*(6), 603–623. https://doi.org/10.1016/j.dental.2015.02.011

Spitznagel, F. A., Boldt, J., & Gierthmuehlen, P. C. (2018). CAD/CAM ceramic restorative materials for natural teeth. *Journal of Dental Research, 97*(10), 1082–1091. https://doi.org/10.1177/0022034518779759

Thompson, J. Y., Stoner, B. R., Piascik, J. R., & Smith, R. (2011). Adhesion/cementation to zirconia and other non-silicate ceramics: Where are we now? *Dental Materials, 27*(1), 71–82. https://doi.org/10.1016/j.dental.2010.10.022

Tian, T., Tsoi, J. K.-H., Matinlinna, J. P., & Burrow, M. F. (2014). Aspects of bonding between resin luting cements and glass ceramic materials. *Dental Materials, 30*(7), e147–e162. https://doi.org/10.1016/j.dental.2014.01.017

Van Meerbeek, B., Yoshihara, K., Yoshida, Y., Mine, A., De Munck, J., & Van Landuyt, K. L. (2011). State of the art of self-etch adhesives. *Dental Materials, 27*(1), 17–28. https://doi.org/10.1016/j.dental.2010.10.023

Wilson, T. G., Jr. (2009). The positive relationship between excess cement and peri-implant disease: A prospective clinical endoscopic study. *Journal of Periodontology, 80*(9), 1388–1392. https://doi.org/10.1902/jop.2009.090115

Yang, B., Barloi, A., & Kern, M. (2010). Influence of air-abrasion on zirconia ceramic bonding using an adhesive composite resin. *Dental Materials, 26*(1), 44–50. https://doi.org/10.1016/j.dental.2009.08.008

Yang, B., Lange-Jansen, H. C., Scharnberg, M., Wolfart, S., Ludwig, K., Adelung, R., & Kern, M. (2008). Influence of saliva contamination on zirconia ceramic bonding. *Dental*

Materials, 24(4), 508–513. https://doi.org/10.1016/j.dental.2007.04.013

Yoshida, Y., Nagakane, K., Fukuda, R., Nakayama, Y., Okazaki, M., Shintani, H., Inoue, S., Tagawa, Y., Suzuki, K., De Munck, J., & Van Meerbeek, B. (2004). Comparative study on adhesive performance of functional monomers. *Journal of Dental Research, 83*(6), 454–458. https://doi.org/10.1177/154405910408300604

Zhang, Y., & Lawn, B. R. (2018). Novel zirconia materials in dentistry. *Journal of Dental Research, 97*(2), 140–147. https://doi.org/10.1177/0022034517737483


BİDGE