

PROTETİK DİŞ TEDAVİSİ ARAŞTIRMALARINDA GÜNCEL METODOLOJİK YAKLAŞIMLAR

EDİTÖR
DOÇ. DR. GÜLBAHAR ERDİNÇ AKYOL

Protetik Diş Tedavisi Araştırmalarında Güncel Metodolojik Yaklaşımlar

Editör

Doç. Dr. Gülbahar ERDİNÇ AKYOL

İmtiyaz Sahibi
Platanus Publishing®

Editör
Doç. Dr. Gülbahar Erdinç Akyol

Kapak & Mizanpaj & Sosyal Medya
Platanus Yayın Grubu

Birinci Basım
Mart, 2026

Yayımcı Sertifika No
45813

ISBN
978-625-8516-21-7

©copyright
Bu kitabın yayım hakkı Platanus Publishing'e aittir. Kaynak gösterilmeden alıntı yapılamaz, izin alınmadan hiçbir yolla çoğaltılamaz.

Adres: Natoyolu Cad. Fahri Korutürk Mah. 157/B, 06480, Mamak,
Ankara, Türkiye.

Telefon: +90 312 390 1 118
web: www.platanuspublishing.com
e-mail: platanuskita@gmail.com



Platanus Publishing®

İÇİNDEKİLER

BÖLÜM 15

**Doğal Diş–İmplant Destekli Sabit Protezlerde Sonlu Elemanlar Analizi:
Biyomekanik Öngörülebilirlik ve Klinik Başarıya Etkileri**
İpek Tezel

BÖLÜM 227

Protetik Diş Hekimliğinde Yapay Zekâ Tabanlı Dijital İş Akışları
Tuba Şenocak & Türker Akar

BÖLÜM 343

Cad Cam Sistemleri ile Uyumlu Geçici Restorasyon Üretimi
Betül İyigün & Tuğçe Koyu



BÖLÜM 1

Doğal Diş–İmplant Destekli Sabit Protezlerde Sonlu Elemanlar Analizi: Biyomekanik Öngörülebilirlik ve Klinik Başarıya Etkileri

İpek Tezel¹

GİRİŞ

Sonlu elemanlar analizi (SEA), mühendislik bilimi tarafından geliştirilen ve karmaşık yapıların mekanik davranışlarını sayısal olarak incelemeye olanak tanıyan bir analiz yöntemidir. Bu yöntemde, incelenen yapı çok sayıda küçük elemene ayrılarak her bir elemanın mekanik özellikleri ve sınır koşulları tanımlanmakta, böylece yükleme altında meydana gelen stres dağılımları ve deformasyon sınırları hesaplanabilmektedir. Sonlu elemanlar analizi, özellikle deneysel olarak ölçülmesi zor veya in vivo koşullarda değerlendirilmesi mümkün olmayan sistemlerin biyomekanik davranışlarının incelenmesinde güvenilir bir yöntem olarak kabul edilmektedir (Falcinelli vd., 2023).

Diş hekimliği alanında SEA'nın kullanımı, implantolojinin gelişmesiyle birlikte önemli ölçüde artmıştır. Dental implantlar, çiğneme kuvvetlerini doğrudan çevre kemiğe ileten rijit yapılar olmaları nedeniyle, biyomekanik açıdan doğal dişlerden farklı davranış sergilemektedir. Bu durum, implant çevresi kemikte streslerin yoğunlaşmasına ve uzun dönemde kemik rezorpsiyonu gibi komplikasyonlara zemin hazırlayabilmektedir. Sonlu elemanlar analizi, implant-kemik bağlantısında meydana gelen bu karmaşık stres dağılımlarını üç boyutlu olarak inceleyerek, implant tasarımı ve protetik planlamanın biyomekanik olarak değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. (Zupancic Cepic vd., 2022).

SEA'nın dental uygulamalardaki temel avantajlarından biri, farklı klinik senaryoların sanal ortamda karşılaştırılabilmesine olanak sağlamasıdır. İmplant çapı, boyu, yerleşim açısı, protetik üst yapı materyali ve kuvvetlerin uygulanma yönü gibi çok sayıda değişken, klinik uygulamaya geçilmeden önce analiz edilebilmektedir. Bu sayede, mekanik açıdan daha dengeli yük dağılımı sağlayan tasarımlar belirlenebilmekte ve olası mekanik komplikasyonların önüne geçilmesi hedeflenmektedir (Martí-Vigil vd., 2024).

¹ Doktora Öğrencisi, İstanbul Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü
Diş Hekimliği Fakültesi, Protetik Diş Tedavisi Anabilim Dalı, İstanbul, Türkiye,
ORCID: 0000-0003-0221-9957

Bununla birlikte, sonlu elemanlar analizinin implant destekli protetik sistemlerdeki kullanımı yalnızca implant-implant destekli restorasyonlarla sınırlı değildir. Klinikte, kısmi dişsizlik olgularında doğal dişlerin korunarak implantlarla birlikte destek olarak kullanıldığı implant-diş bağlantılı sabit protezler de yaygın biçimde uygulanmaktadır. Bu tür sistemlerde, doğal dişlerin periodontal ligament aracılığıyla gösterdiği fizyolojik mobilite ile implantların çevre kemiğe rijit şekilde bağlanması arasında belirgin bir biyomekanik uyumsuzluk bulunmaktadır. Bu farklı davranış biçimi, yüklerin diş ve implant arasında eşit olmayan şekilde paylaşılmasına neden olabilmektedir (Sadek vd., 2025).

İmplant-diş bağlantılı sabit protezlerde biyomekanik davranışın değerlendirilmesi, bu sistemlerin klinik başarısı açısından kritik öneme sahiptir. Periodontal ligamentin elastik özellikleri nedeniyle doğal dişler yük altında belirli bir hareket sergilerken, implantlar bu harekete izin vermez. Bu durum, özellikle bağlantı bölgelerinde stres yoğunlaşmasına ve implant boyun bölgesi ile diş desteklerinde aşırı yüklenmeye yol açabilmektedir. Sonlu elemanlar analizine dayanan çalışmalar, implant-diş bağlantılı protezlerde stres dağılımının; bağlantı tasarımı, kullanılan protetik materyalin elastik modülü ve yükleme koşullarına bağlı olarak değiştiğini göstermektedir (Lencioni vd., 2020).

Güncel literatürde yapılan üç boyutlu SEA çalışmaları, implant-diş bağlantılı sistemlerin uygun vaka seçimi ve doğru protetik planlama ile kabul edilebilir biyomekanik performans gösterebileceğini ortaya koymaktadır. Buna karşın, bu sistemlerin biyomekaniği implant-implant destekli restorasyonlara kıyasla daha karmaşık olup, her vaka için dikkatli bir değerlendirme gerektirmektedir. Bu nedenle sonlu elemanlar analizi, implant-diş bağlantılı sabit protezlerin biyomekanik öngörülebilirliğini artıran önemli bir araştırma yöntemi olarak öne çıkmaktadır.

1. SONLU ELEMANLAR ANALİZİ

1.1. Sonlu Elemanlar Analizi Nedir?

Sonlu elemanlar analizi (SEA), karmaşık yapıların mekanik davranışlarını sayısal olarak çözmeyi amaçlayan bir hesaplama yöntemidir. Bu yöntemde, karmaşık geometrilere ve sınır koşullarına sahip bir fiziksel sistem, sonlu sayıda küçük alt bölgeye (elemanlara) ayrılarak her bir eleman için tanımlanan denklemler yardımıyla sistemin genel davranışı yaklaşık olarak belirlenir (Zienkiewicz ve Taylor, 2005).

SEA'nın temelini, karmaşık bir yapının davranışını tanımlayan kısmi denklemlerin doğrudan çözümünün çoğu durumda mümkün olmaması oluşturur. Bu nedenle sistem, belirli düğüm noktalarıyla birbirine bağlanan elemanlardan oluşan bir ağ (mesh) yapısına dönüştürülür ve çözüm, bu düğüm noktalarındaki bilinmeyenler üzerinden elde edilir. Böylece problem, sonsuz serbestlik derecesine sahip bir sistemden, sonlu serbestlik derecesine sahip bir matematiksel modele indirgenmiş olur (Cook vd., 2002).

Sonlu elemanlar analizinde çözüm süreci genel olarak; geometrinin tanımlanması, elemanlara bölünmesi, malzeme özelliklerinin atanması, yükler ve sınır koşullarının belirlenmesi, denklemlerin çözülmesi ve sonuçların değerlendirilmesi aşamalarından oluşur. Bu aşamalar, yöntemin doğruluğunu ve güvenilirliğini doğrudan etkileyen kritik adımlardır (Bathe, 2006).

SEA, özellikle karmaşık geometriye sahip sistemlerde gerilme, şekil değiştirme ve yer değiştirme dağılımlarının incelenmesine olanak tanınması nedeniyle deneysel yöntemlere önemli bir alternatif veya tamamlayıcı olarak kabul edilmektedir. Bununla birlikte, elde edilen sonuçların doğruluğu; kullanılan eleman tipi, ağ yoğunluğu, malzeme varsayımları ve sınır koşullarının gerçek sisteme ne ölçüde uyumlu olduğuna bağlıdır (Reddy, 2019).

Diş hekimliğinde sonlu elemanlar analizi, implant destekli restorasyonlarda ortaya çıkan yüklerin kemik-implant ve implant-protez ara yüzleri boyunca nasıl iletildiğini ve dağıldığını inceleme imkânı sunmaktadır. Bu yaklaşım, stres yoğunlaşma bölgelerinin belirlenmesine ve bu sayede farklı bölgelere implant yerleşiminin, bağlantı tiplerinin ve restoratif materyallerin biyomekanik performanslarının karşılaştırılmasına katkı sağlamaktadır (Geng vd., 2001).

1.2. Sonlu Elemanlar Analizinin Tarihçesi

Sonlu elemanlar yaklaşımının temelleri, 1960'lı yılların başlarında, havacılık ve uzay teknolojilerinde karşılaşılan karmaşık yapısal problemlerin analiz edilmesine yönelik gereksinimler doğrultusunda atılmıştır.

Süreç içinde önemli ölçüde ilerleme kaydeden sonlu elemanlar yöntemi, başlangıçta statik yapı analizlerine odaklanmışken, günümüzde akışkanlar mekaniği, ısı transferi ve elektromanyetik alan hesaplamaları dâhil olmak üzere çok sayıda mühendislik disipliniinde temel bir analiz aracı olarak kullanılmaktadır. Çok sayıda endüstriyel disiplinde yaygın biçimde kullanılan yöntem, geleneksel deneysel testlerin maliyetli ve zaman alıcı olduğu durumlarda tercih edilen temel bir hesaplama aracı hâline gelmiştir (Geng vd., 2001).

Sonlu elemanlar analizinin implantoloji alanındaki erken dönem uygulamalarından biri, 1976 yılında Weinstein tarafından rapor edilmiş olup, söz konusu çalışmada dental implant-kemik kompleksinin, oklüzal kuvvetler altındaki biyomekanik yanıtı değerlendirilmiştir (Weinstein vd., 1976).

Weinstein ve arkadaşlarının öncü çalışmasının ardından, bilgisayar teknolojilerindeki ilerlemelere paralel olarak sonlu elemanlar yöntemi implant diş hekimliğinde giderek daha yaygın bir biçimde kullanılmaya başlanmıştır. Özellikle 1990'lı yıllardan itibaren üç boyutlu modelleme olanaklarının gelişmesi, implant-kemik ara yüzeyindeki stres dağılımlarının daha gerçekçi biçimde değerlendirilmesine olanak sağlamış; implant geometrisi, materyal özellikleri ve yükleme senaryolarının biyomekanik etkileri ayrıntılı olarak incelenebilmiştir. Bu süreçte SEA, deneysel yöntemlere tamamlayıcı bir araç olarak kabul edilmiş ve implant tasarımı ile protetik planlamaya yönelik önemli öngörüler sunan temel bir analiz yöntemi hâline gelmiştir (Geng vd., 2001).

1.3. Sonlu Elemanlar Analizinin Avantajları ve Dezavantajları

Sonlu elemanlar analizinin en önemli avantajlarından biri, fiziksel prototip üretimine ve invaziv deneysel çalışmalara olan ihtiyacı azaltarak zaman ve maliyet tasarrufu sağlamasıdır. Ayrıca analizlerin tekrarlanabilir olması, aynı model üzerinde farklı parametrelerin değiştirilerek sistem davranışının karşılaştırılmasına olanak tanımaktadır. Bununla birlikte, SEA'nın doğruluğu büyük ölçüde modelleme sürecinde kullanılan geometrik verilerin, malzeme özelliklerinin ve sınır koşullarının gerçekçi biçimde tanımlanmasına bağlıdır. Modelde yapılan basitleştirmeler ve varsayımlar, elde edilen sonuçların klinik veya gerçek yaşam koşullarıyla birebir örtüşmesini sınırlandırmaktadır (Zienkiewicz ve Taylor, 2005; Reddy, 2019).

Bununla birlikte, diş hekimliğinde kullanılan sonlu elemanlar modelleri bazı sınırlılıklar içermektedir. İnsan dokularının çoğu zaman izotropik ve doğrusal elastik kabul edilmesi, kemik remodelasyonu, kas kuvvetleri ve biyolojik adaptasyon süreçlerinin modele dâhil edilememesi, elde edilen sonuçların yalnızca teorik bir değerlendirme olarak yorumlanmasını gerektirmektedir. Ayrıca anatomik yapıların karmaşıklığı ve bireysel farklılıklar, modellenen sistemin gerçek klinik koşulları tam olarak yansıtmamasını zorlaştırabilmektedir. Bu nedenle, sonlu elemanlar analizinden elde edilen bulguların deneysel ve klinik verilerle desteklenmesi büyük önem taşımaktadır (Zupancic Cepic vd., 2022; Falcinelli vd., 2023).

2. SONLU ELEMANLAR İLE DOĞAL DIŞ-İMLANT DESTEKLİ PROTEZLERDE MODELLEME YAKLAŞIMLARI

2.1. Geometrik Modelleme

SEA çalışmalarında ilk adım, analiz edilecek anatomik yapıların ve protetik bileşenlerin geometrik olarak modellenmesidir. Doğal diş–implant destekli sabit protezlerde bu süreç; doğal diş, periodontal ligament, alveoler kemik (kortikal ve trabeküler), implant, abutment ve protetik üst yapıların ayrı ayrı tanımlanmasını içermektedir. Erken dönem çalışmalarda basitleştirilmiş iki boyutlu modeller tercih edilirken, günümüzde üç boyutlu bilgisayarlı tomografi verilerinden elde edilen anatomik olarak daha gerçekçi modeller kullanılmaktadır (Papavasiliou vd., 1996; Holmgren vd., 1998).

Geometrik modellemenin ayrıntı düzeyinin artırılması, implant ve çevre dokulardaki stres dağılımlarının daha gerçekçi biçimde öngörülmesine olanak sağlamakla birlikte, model karmaşıklığının ve hesaplama süresinin belirgin şekilde artmasına neden olmaktadır. Bu nedenle sonlu elemanlar çalışmalarında, klinik gerçekliğin yeterli düzeyde temsil edilmesi ile hesaplama verimliliği arasında optimal bir denge kurulması hedeflenmektedir. Özellikle periodontal ligamentin özellikleri nedeniyle modellenme biçimi, doğal diş–implant destekli sistemlerin biyomekanik davranışını belirleyen en kritik faktörlerden biri olarak kabul edilmektedir (Papavasiliou vd., 1996; Geng vd., 2001; Natali vd., 2006).

2.2. Materyal Özelliklerinin Tanımlanması

Sonlu elemanlar analizinde kullanılan materyal özelliklerinin tanımlanması, hesaplanan stres ve deformasyon dağılımları üzerinde belirleyici bir rol oynamaktadır. Özellikle kemik ve diğer biyolojik dokuların çoğu çalışmada izotropik, homojen ve lineer elastik kabul edilmesi, bu yapıların gerçek mekanik davranışını tam olarak yansıtamamaktadır. Bu durum, analiz sonuçlarının klinik geçerliliğini sınırlayabilmekte ve modelin güvenilirliğini etkileyebilmektedir (Falcinelli vd., 2023). Çene kemiği, diş ve protetik materyaller sıklıkla izotropik, homojen ve lineer elastik kabul edilmekle birlikte, literatürde bu kabullerin tanımlanan malzeme özelliklerinin çeşitliliği ve standartlaşmamış değerlerin FEA sonuçlarının güvenilirliğini etkilediği vurgulanmıştır. Ayrıca periodontal ligament gibi yumuşak dokuların non-lineer ve viskoelastik davranış özelliklerinin modele dahil edilmesi veya edilmemesi, hesaplanan gerilim ve deformasyon dağılımlarını belirgin şekilde değiştirmektedir (Celik vd., 2022).

Benzer şekilde, kemik ve implant tanımlamalarındaki farklılıklar ile sonlu eleman parametrelerinin çeşitliliği, model sonuçlarının karşılaştırılabilirliğini

sınırlamakta ve analizlerin yorumlanmasında dikkatli olunması gerektiği literatürde vurgulanmaktadır (Prados-Privado vd., 2020). Ayrıca implant bileşenlerinin elastik modül değerlerindeki farklılıklar peri-implant kemikteki stres ve deformasyon dağılımlarını önemli ölçüde değiştirmekte, dolayısıyla materyal parametrelerinin doğru tanımlanmasının analiz sonuçlarının doğruluğu için kritik olduğu gösterilmiştir (Pérez-Pevida vd., 2016).

2.3. Sınır Şartları ve Yükleme Koşulları

Sonlu elemanlar analizinde sınır şartlarının tanımlanması, modelin ağız içerisindeki destek dokularla ve çene kemiği ile olan mekanik ilişkilerini belirleyen temel bir adımdır. Alveoler kemiğin alt ve lateral yüzeylerinin sabitlenmesi, çene kemiğinin rijit kabul edilmesi veya periodontal ligament gibi yumuşak dokuların davranışının modellenmesi gibi kabuller, uygulanan oklüzal ve lateral kuvvetlere karşı oluşacak stres ve deformasyon dağılımını doğrudan etkiler. Bu kabuller, özellikle doğal diş-implant destekli sabit protezlerde, implant ve dişler arasındaki yük paylaşımının doğru şekilde değerlendirilmesi ve peri-implant kemik üzerindeki stres dağılımının gerçekçi biçimde modellenmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Literatürde, sınır şartlarının modelleme biçimine bağlı olarak elde edilen stres ve deformasyon dağılımlarının değişebileceği, dolayısıyla modelin klinik geçerliliğinin ve güvenilirliğinin sınır şartlarının seçimine bağlı olduğu vurgulanmaktadır. Bu nedenle sonlu eleman analizlerinde sınır koşullarının dikkatli ve anatomik gerçekliğe uygun şekilde tanımlanması, hem sonuçların yorumlanabilirliğini artırmakta hem de klinik uygulamalarla ilişkilendirilebilmesini sağlamaktadır (Bandela & Kanaparthi, 2021; Büyük vd., 2022; Alemayehu & Jeng, 2021).

Yükleme koşulları genellikle aksiyal, oblik veya lateral kuvvetler şeklinde uygulanmaktadır. Literatürde sıklıkla 100–300 N aralığında statik kuvvetler kullanılsa da, bu değerlerin bireysel çiğneme kuvvetlerini ve parafonksiyonel alışkanlıkları tam olarak yansıtmadığı ve literatürde çoğu FEA çalışmasının statik yüklemeyi modellediği görülmektedir; buna karşın dinamik veya siklik yükleme senaryolarının kemik ve implant çevresindeki stres ve deformasyon davranışını daha gerçekçi yansıttığı bildirilmektedir. Statik ve dinamik yükler altında yapılan sayısal analizlerde dinamik yükleme koşullarının stres ve deformasyon düzeylerini değiştirerek daha yüksek değerler oluşturduğu gösterilmiştir (Alemayehu & Jeng, 2021). Ayrıca bazı çalışmalar dinamik yüklemelerin peri-implant kemikte farklı stres dağılımlarına yol açtığını rapor etmiştir. Bununla birlikte, dinamik yüklemeye odaklanan FEA çalışmalarının sayısının sınırlı olduğu ve daha fazla araştırmanın yapılmasının gerektiği vurgulanmaktadır (Falcinelli vd., 2023).

3. DOĞAL DİŞ-İMLANT DESTEKLİ SABİT PROTEZLERDE BAĞLANTI TİPLERİNİN SONLU ELEMANLAR ANALİZİ BULGULARINA ETKİSİ

Doğal diş-implant destekli sabit protezlerde bağlantı tipi, biyomekanik davranışı belirleyen en önemli tasarım parametrelerinden biri olarak kabul edilmektedir. Destek elemanları arasındaki bağlantının rijit veya non-rijit olması, okluzal yüklerin dağılımını, stres yoğunlaşma bölgelerini ve uzun dönem klinik sonuçları doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle, bağlantı tiplerinin biyomekanik etkileri sonlu elemanlar analizi çalışmaları ile ayrıntılı olarak incelenmiştir (Huang, Ding, Yuan, & Yan, 2021).

3.1. Rijit Bağlantılar

Rijit bağlantılı diş-implant destekli sabit protezlerde, doğal diş ve implant tek bir ünite gibi davranmakta ve aralarındaki hareket farklılığı minimum düzeye indirilmeye çalışılmaktadır. Ancak periodontal ligamentin fizyolojik hareket kabiliyeti ile implantların rijit yapısı arasındaki fark tamamen ortadan kaldırılamamaktadır. SEA çalışmalarında rijit bağlantı kullanılan modellerde, okluzal yüklerin büyük oranda implant üzerine aktarıldığı ve implant çevresi kortikal kemikte stres yoğunlaşmalarının arttığı gösterilmiştir (Huang, Ding, Yuan, & Yan, 2021).

Rijit bağlantıların avantajı, protezin stabilitesini artırması ve destek elemanları arasındaki mobilitayı sınırlamasıdır. Bununla birlikte, implant çevresindeki kemikte oluşan yüksek stres değerlerinin, uzun vadede marjinal kemik kaybı riskini artırabileceği bildirilmiştir. Doğal diş tarafında ise periodontal ligament sayesinde streslerin daha homojen dağıldığı ve diş kökü çevresinde aşırı gerilimlerin oluşmadığı rapor edilmiştir (Menicucci vd., 2002; Lin vd., 2008).

3.2. Non-Rijit Bağlantılar

Non-rijit bağlantılar, doğal dişin fizyolojik hareketine kısmen izin vererek implant ve diş arasındaki biyomekanik uyumsuzluğu azaltmayı amaçlamaktadır. Bu tür bağlantılar genellikle ataşmanlar veya stres kırıcı mekanizmalar aracılığıyla sağlanmaktadır. SEA çalışmalarında non-rijit bağlantı kullanılan modellerde, implant çevresindeki stres yoğunlaşmalarının azaldığı ve yüklerin daha dengeli bir şekilde paylaşıldığı bildirilmiştir (Lin vd., 2008).

Bununla birlikte, non-rijit bağlantıların doğal diş üzerinde oluşturduğu etkiler tartışmalıdır. Bazı SEA çalışmalarında, non-rijit bağlantıların doğal dişte artmış mobilitaya ve periodontal ligamentte yüksek stres değerlerine yol açabileceği belirtilmiştir. Bu durumun, özellikle periodontal desteği zayıf dişlerde klinik

komplikasyon riskini artırabileceği öne sürülmüştür (Özçelik, Ersoy, & Yılmaz, 2011).

3.3. Rijit ve Non-Rijit Bağlantıların Karşılaştırmalı SEA Bulguları

Rijit ve non-rijit bağlantıların karşılaştırıldığı sonlu elemanlar analizi çalışmalarında, her iki tasarımın da kendine özgü avantaj ve dezavantajlara sahip olduğu görülmektedir. Rijit bağlantılar, protezin genel stabilitesini artırırken implant çevresinde yüksek stres yoğunlaşmalarına neden olabilmektedir. Non-rijit bağlantılar ise implant çevresi kemikte stresleri azaltmakta ancak doğal dişte ve periodontal ligamentte artmış hareketlere yol açabilmektedir (Lin vd., 2008; Menicucci vd., 2002).

Bu bulgular, bağlantı tipi seçiminin tek başına biyomekanik kriterlere dayandırılmaması gerektiğini ortaya koymaktadır. Destek dışın periodontal durumu, implant sayısı ve konumu, açıklık uzunluğu ve oklüzal yüklerin yönü gibi klinik faktörler, bağlantı tipinin belirlenmesinde birlikte değerlendirilmelidir. SEA sonuçları, bu çok parametrelili karar sürecinde klinisyenlere önemli bir rehberlik sağlamaktadır.

3.4. Kantilever Varlığının Biyomekanik Sonuçları

Sonlu elemanlar analizine dayalı çalışmaların sonuçlarına göre, implant-destekli sabit protezlerde kantilever varlığı, sistemin biyomekanik davranışını belirgin şekilde olumsuz etkilemektedir. İmplant destekli protezlerde mezial ve distal kantilever tasarımlarının kullanılması, hem implantlar, abutmentler ve vidalarda hem de kortikal ve trabeküler kemikte oluşan stres değerlerinde anlamlı artışlara yol açmıştır. Kantileverli modellerde, özellikle distal kantilever kullanıldığında, yükleme altında oluşan moment kolunun uzamasına bağlı olarak implant boyun bölgesinde ve çevre kemikte stres yoğunlaşması belirginleşmiştir. Aksiyal ve oblik yükleme koşulları altında yapılan analizler, kantilever kullanımının yüklerin daha dengesiz bir şekilde aktarılmasına neden olduğunu ve bunun sonucunda kemik dokuda stres seviyelerinin arttığını göstermiştir. Buna karşılık, kantileversiz ve santral pontikli tasarımın daha homojen bir stres dağılımı sağladığı, her kuronun bir implant üzerinde olduğu konfigürasyonların ise en elverişli biyomekanik davranışı sergilediği belirlenmiştir. Bu bulgular, implant destekli sabit protezlerde kantilever uzantılarının, özellikle distal yerleşimli olduğunda, biyomekanik açıdan riskli bir tasarım olduğunu ortaya koymaktadır (Batista vd., 2017).

Klinik Parametre	SEA Bulguları	Klinik Yorum / Öneri
Doğal diş–implant mobilitate farkı	Yüklerin büyük kısmı implanta aktarılmakta, implant boyun bölgesi ve kortikal kemikte stres yoğunlaşması oluşmaktadır.	Vaka seçimi dikkatle yapılmalı, periodontal desteği zayıf dişler bağlantı için tercih edilmemelidir (Menicucci vd., 2002; Lin vd., 2008).
Periodontal ligamentin modele dahil edilmesi	Doğal dişte stresler daha homojen dağılırken, implant çevresinde daha yüksek stres değerleri gözlenmektedir.	PDL'nin biyomekanik etkisi göz önünde bulundurulmalı, rijit implant davranışı dikkate alınmalıdır (Papavasiliou vd., 1996; Lin vd., 2010).
Aksiyal yükleme	Stresler daha homojen dağılmakta, oblik yüklere kıyasla daha düşük değerler oluşmaktadır.	Oklüzal tasarımda aksiyel yükler öncelikli hedeflenmelidir (Tada vd., 2003; Lin vd., 2010).
Oblik yükleme	İmplant boyun bölgesi ve krestal kemikte belirgin stres artışı oluşmaktadır.	Lateral ve eğik temaslar minimize edilmeli, aksiyal yükleme hedeflenmelidir (Tada vd., 2003; Geng vd., 2001).
Rijit bağlantı kullanımı	İmplant çevresi kortikal kemikte stres artmaktadır.	Rijit bağlantılar sınırlı endikasyonlarda tercih edilmeli, biyomekanik risk değerlendirilmelidir (Huang vd., 2021; Menicucci vd., 2002).
Non-rijit bağlantı kullanımı	İmplant çevresi stresleri azalırken, doğal dişte ve PDL'de artmış stres görülebilmektedir.	Periodontal durumu iyi dişlerde dikkatle kullanılmalı, aşırı mobilitate riski değerlendirilmelidir (Lin vd., 2008; Özçelik vd., 2011).
Kantilever varlığı	İmplantlar, abutmentler ve kemik dokuda stres değerleri belirgin şekilde artmaktadır.	Distal kantilever biyomekanik açıdan en riskli tasarım olarak değerlendirilmelidir, mümkünse kaçınılmalıdır (Batista vd., 2017).

Oklüzal temas sayısı ve dağılımı	Noktasal ve sınırlı temalar lokal stres yoğunlaşmalarına yol açmaktadır.	Yaygın ve dengeli oklüzal temalar oluşturulmalı, oklüzal tasarım optimize edilmelidir (Manchikalapudi & Basapogu, 2022)
----------------------------------	--	---

4. DOĞAL DİŞ-İMLANT DESTEKLİ SABİT PROTEZLERDE RESTORATİF MATERYALLERİN SONLU ELEMANLAR ANALİZİ BULGULARINA ETKİSİ

Doğal diş-implant destekli sabit protezlerde kullanılan restoratif materyallerin mekanik özellikleri, biyomekanik davranış ve stres dağılımı üzerinde belirleyici bir role sahiptir. Elastik modül, kırılma direnci ve deformasyon kapasitesi gibi materyal özellikleri, oklüzal yüklerin destek elemanlarına nasıl aktarıldığını doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle, farklı restoratif materyallerin biyomekanik etkileri sonlu elemanlar analizi çalışmalarıyla ayrıntılı olarak incelenmiştir (Sertgöz, 1997; Dargahi, Najarian, & Talebi, 2005).

4.1. Metal-Seramik Restorasyonlar

Metal-seramik sistemler, uzun yıllardır diş-implant destekli sabit protezlerde yaygın olarak kullanılan restoratif materyaller arasında yer almaktadır. Yüksek elastik modüle sahip metal altyapılar, oklüzal yüklerin protez boyunca daha rijit bir şekilde iletilmesine neden olmaktadır. SEA çalışmalarında metal-seramik restorasyonların kullanıldığı modellerde, protez altyapısında düşük deformasyon değerleri gözlenirken, implant çevresi kortikal kemikte stres yoğunlaşmalarının artabildiği bildirilmiştir (Sertgöz, 1997; Dargahi, Najarian, & Talebi, 2005).

Metal-seramik sistemlerin avantajı, yüksek mekanik dayanım ve uzun dönem klinik başarının literatürde iyi belgelenmiş olmasıdır. Ancak rijit yapı özellikleri nedeniyle, özellikle diş-implant kombinasyonlarında biyomekanik uyumsuzluğu artırabileceği ve implant çevresi kemikte stres birikimine yol açabileceği ifade edilmektedir (Arınç, 2018).

4.2. Tam Seramik ve Zirkonya Alt Yapılı Restorasyonlar

Son yıllarda estetik beklentilerin artması ve materyal teknolojilerindeki gelişmelerle birlikte, zirkonya bazlı restorasyonlar diş-implant destekli sabit protezlerde giderek daha fazla tercih edilmektedir. Zirkonya altyapılar, metal-seramik sistemlere kıyasla yüksek elastik modüle sahip olup, tasarım ve kalınlık seçeneklerine bağlı olarak implant ve protez üzerindeki stres dağılımını değiştirebilmektedir (Arınç, 2018; Kelkar, Bhat, & Hegde, 2021).

SEA çalışmalarında zirkonya altyapılı protezlerin kullanıldığı modellerde, protez üzerinde oluşan streslerin daha homojen dağıldığı ve porselen st yapıdaki stres değerlerinin azalıdığı bildirilmiştir. Bununla birlikte, yüksek rijitlik nedeniyle implant çevresi kemikte oluşan streslerin metal-seramik sistemlere benzer veya bazı durumlarda daha yüksek olabileceği de rapor edilmiştir (Dargahi, Najarian, & Talebi, 2005).

4.3. Elastik Modülün Stres Dağılımına Etkisi

Restoratif materyalin elastik modülü, diş–implant destekli sabit protezlerin biyomekanik davranışını belirleyen temel faktörlerden biridir. Düşük elastik modüle sahip materyaller, oklüzal yükler altında daha fazla deformasyona uğrayarak streslerin bir kısmını absorbe edebilmekte ve destek elemanları üzerindeki stres yoğunlaşmalarını azaltabilmektedir. Buna karşın, yüksek elastik modüle sahip rijit materyaller, yükleri daha doğrudan implant ve kemik dokusuna iletmektedir. Ayrıca, farklı yükleme yönleri ve implant pozisyonlarının da stres dağılımı üzerinde belirleyici olduğu grlmştir. Örneğin, distal implant üzerine uygulanan eğik yükler, implant çevresinde ve alveolar kemikte daha yüksek von Mises stresleri oluşturmuştur. Bunun yanı sıra, farklı materyal kombinasyonları, protez boyunca yük iletimini ve mobiliteyi etkileyerek, bazı durumlarda düşük deformasyonlu materyallerin bile lokal stres yoğunlaşmalarına yol açabileceğini göstermiştir. Bu bulgular, restoratif materyal seçiminin yanı sıra, implant yerleşimi ve yk yönünün de klinik başarının sağlanmasında kritik rol oynadığını vurgulamaktadır (Jameel & Al-Khafaji, 2024).

SEA bulguları, restoratif materyal seçiminde yalnızca mekanik dayanımın değil, biyomekanik uyumun da dikkate alınması gerektiğini göstermektedir. Özellikle diş–implant kombinasyonlarında, periodontal ligamentin esnekliği ile restoratif materyalin rijitliği arasındaki denge, uzun dönem klinik başarı açısından kritik öneme sahiptir (Menicucci vd., 2002).

4.4. Klinik Uygulamalar ve Materyal Seçimi

Klinik uygulamalarda restoratif materyal seçimi, estetik beklentiler, fonksiyonel gereksinimler ve biyomekanik faktörlerin birlikte değerlendirilmesini gerektirmektedir. Posterior bölgede yer alan diş–implant destekli sabit protezlerde, yüksek çiğneme kuvvetlerine dayanım sağlamak amacıyla daha rijit materyaller tercih edilebilmektedir. Ancak SEA bulguları, bu tür vakalarda implant çevresi kemikte stres yoğunlaşmalarının dikkatle değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır (Menicucci vd., 2002; Lin vd., 2009).

Anterior bölgede veya estetik önceliğin yüksek olduğu durumlarda ise zirkonya yapıları restorasyonlar avantaj sağlayabilmektedir. Bununla birlikte, bu materyallerin biyomekanik etkilerinin bağlantı tipi, implant yerleşimi ve oklüzal

tasarımla birlikte ele alınması gerektiği vurgulanmaktadır (Gomes, Barão, Rocha, de Almeida & Assunção, 2011).

5. DOĞAL DİŞ-İMLANT DESTEKLİ SABİT PROTEZLERDE OKLÜZAL YÜKLEME SENARYOLARI VE STRES DAĞILIMI

Sonlu elemanlar analizinde implant ve implant-diş destekli sabit protez sistemlerinin biyomekanik davranışını doğru biçimde değerlendirebilmek için, modele uygulanan yükleme koşullarının klinikte karşılaşılan çiğneme kuvvetlerini mümkün olduğunca gerçekçi şekilde temsil etmesi gerekmektedir. Yükleme koşullarının büyüklüğü, yönü, uygulama noktası ve türü, elde edilen stres dağılımlarını doğrudan etkileyen temel parametreler arasında yer almaktadır. Bu nedenle sonlu elemanlar analizinde kullanılan yükleme senaryoları, implant, çevre kemik ve protetik bileşenler arasındaki mekanik etkileşimin anlaşılmasında belirleyici rol oynamaktadır. Literatürde çiğneme kuvvetleri çoğunlukla aksiyal (dikey), oblik (eğik) ve lateral (yatay) yükler şeklinde sınıflandırılmakta; bu yükleme tiplerinin her birinin implant sistemi üzerinde farklı stres dağılımı parametrelerine yol açtığı bildirilmektedir. Sonlu elemanlar analizi çalışmaları, bu farklı yükleme koşullarının implant boyun bölgesi, marjinal kemik ve protetik üst yapı üzerindeki etkilerini karşılaştırmalı olarak inceleyerek, implant tasarımı ve protetik planlamaya yönelik biyomekanik referanslar sağlamaktadır (Tada vd., 2003; Alemayehu & Jeng, 2021).

5.1. Aksiyal Yükleme Koşulları

Aksiyal yükleme, SEA çalışmalarında en sık kullanılan yükleme senaryolarından biridir ve genellikle ideal oklüzal temasları temsil etmektedir. Aksiyal kuvvetlerin diş ve implant uzun eksenine boyunca uygulanması durumunda, streslerin destek elemanları üzerinde daha homojen dağıldığı ve lateral kuvvetlere kıyasla daha düşük stres yoğunlaşmalarına yol açtığı bildirilmiştir (Tada vd., 2003; Geng vd., 2001).

Doğal diş-implant destekli sabit protezlerde aksiyal yükleme altında gerçekleştirilen sonlu elemanlar analizlerinde, periodontal ligamentin modele dahil edilmesinin stres dağılımını etkilediği; implant tarafında ise streslerin ağırlıklı olarak implant boynu ve çevresindeki kortikal kemik bölgesinde yoğunlaştığı rapor edilmiştir. Bu bulgular, aksiyal yüklerin biyomekanik açıdan daha elverişli bir yükleme senaryosu olmasına rağmen, implant çevresi kemikte stres birikiminin tamamen ortadan kalkmadığını göstermektedir (Menicucci vd., 2002; Lin et al., 2010).

5.2. Oblik ve Lateral Yükleme Koşulları

Oblik ve lateral yükleme senaryoları, çiğneme fonksiyonu sırasında oluşan gerçekçi kuvvet bileşenlerini temsil etmektedir. Sonlu elemanlar analizi

çalışmalarında oblik kuvvetlerin uygulanmasının, aksiyal yüklere kıyasla implant çevresi kemikte ve protetik bileşenlerde daha yüksek stres değerlerine yol açtığı gösterilmiştir. Özellikle oblik ve bukkolingual yükleme altında, streslerin implant boyun bölgesinde ve kortikal kemikte yoğunlaştığı; bu durumun implant-kemik ara yüzünde biyomekanik açıdan olumsuz bir ortam oluşturabileceği bildirilmektedir (Geng vd., 2001; Tada vd., 2003).

Doğal diş-implant destekli sabit protezlerde oblik yükleme altında, doğal dişin periodontal ligament aracılığıyla belirli bir hareket kabiliyeti göstermesi, implant üzerine aktarılan yüklerin artmasına neden olabilmektedir. Bu durumun, implant çevresi kemikte uzun dönemde meydana gelebilecek komplikasyonlar açısından olumsuz bir ortam oluşturabileceği düşünülmektedir (Menicucci vd., 2002).

5.3. Yükleme Noktasının ve Yük Dağılımının Etkisi

SEA çalışmalarında yükleme noktasının konumu, stres dağılımını belirleyen bir diğer önemli parametredir. Pontik(gövde) üzerine uygulanan kuvvetler ile doğrudan destek elemanları üzerine uygulanan kuvvetler arasında anlamlı biyomekanik farklılıklar gözlenmektedir. Pontik bölgesine uygulanan yüklerin, özellikle implant tarafında daha yüksek momentler oluşturduğu ve stres yoğunlaşmalarını artırdığı rapor edilmektedir (Eraslan vd., 2010).

Ayrıca, oklüzal temas alanının genişliği ve temas sayısı, implant destekli restorasyonlarda stres dağılımını belirleyen önemli faktörler arasında yer almaktadır. Sonlu elemanlar analizleri, oklüzal yüzeyde oluşturulan temas sayısının ve temasların dağılımının, implant, abutment ve çevre kemikte oluşan streslerin büyüklüğünü ve dağılım paternini doğrudan etkilediğini göstermektedir. Yaygın ve dengeli oklüzal temasların, tek veya noktasal temaslara kıyasla yüklerin daha geniş bir alana yayılmasını sağladığı, böylece özellikle implant boyun bölgesi ve kortikal kemik çevresinde oluşan stres yoğunlaşmalarını azalttığı bildirilmektedir. Buna karşılık, sınırlı sayıda ve noktasal oklüzal temasın, yüklerin lokalize olmasına neden olarak implant çevresi kemikte daha yüksek stres değerlerine yol açabildiği belirtilmektedir (Manchikalapudi & Basapogu, 2022). Bu bulgular, oklüzal temas düzenlemesinin ve oklüzal tasarımın, SEA sonuçları doğrultusunda optimize edilmesinin, implant destekli restorasyonların uzun dönem biyomekanik başarısı ve klinik sürdürülebilirliği açısından kritik öneme sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

. SONLU ELEMANLAR ANALİZİ BULGULARININ KLİNİK SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK VE KOMPLİKASYONLARLA İLİŞKİSİ

Sonlu elemanlar analizi (SEA), doğal diş-implant destekli sabit protezlerde biyomekanik davranışın anlaşılmasında ve uzun dönem klinik sonuçların öngörülmesinde önemli bir araştırma yöntemi olarak kullanılmaktadır. SEA

çalışmaları, implant, doğal diş, periodontal ligament ve çevre kemik dokuda oluşan stres dağılımlarını üç boyutlu olarak ortaya koyarak, klinikte karşılaşılan biyolojik ve mekanik komplikasyonların altında yatan nedenlerin daha iyi anlaşılmasını sağlamaktadır. Bu yönüyle SEA, klinik gözlemleri destekleyen ve tedavi planlamasına rehberlik eden bilimsel bir araç olarak değerlendirilmektedir (Sertgöz, 1997; Geng et al., 2001).

6.1. İmplant Çevresi Kemik Kaybı ve SEA Bulguları

SEA çalışmalarında, doğal diş–implant destekli sabit protezlerde implant çevresi kortikal kemikte stres yoğunlaşmasının sıklıkla implant boyun bölgesinde meydana geldiği gösterilmiştir. Özellikle doğal diş ile implant arasındaki mobilite farkı nedeniyle oklüzal yüklerin büyük bir kısmının implanta aktarılması, implant çevresi kemikte artmış gerilim değerlerine yol açmaktadır. Bu stres yoğunlaşmalarının, uzun dönem klinik takiplerde rapor edilen marjinal kemik kaybı ile ilişkili olabileceği belirtilmektedir (Menicucci vd., 2002).

Periodontal ligamentin modele dahil edildiği SEA çalışmalarında, doğal diş tarafında streslerin daha homojen dağıldığı, buna karşın implant çevresi kemikte daha yüksek stres değerlerinin olduğu bildirilmiştir. Bu bulgu, implantların rijit yapısının kemik üzerinde daha yüksek biyomekanik yük oluşturduğunu ve implant çevresi kemik kaybının biyomekanik temelli bir komplikasyon olabileceğini desteklemektedir (Papavasiliou vd., 1996; Lin vd., 2010).

6.2. Mekanik Komplikasyonlar ve Stres Dağılımı

SEA bulguları, mekanik komplikasyonların büyük ölçüde protezin stres dağılım paternleri ile ilişkili olduğunu ortaya koymaktadır. Abutment, bağlantı vidası ve üst yapı bileşenlerinde yüksek von Mises stres değerleri, vida gevşemesi, vida kırığı ve üstyapı kırıkları gibi mekanik komplikasyonların biyomekanik temelini açıklamaktadır. Özellikle kantilever varlığı ve oblik yükleme koşulları altında, bu bileşenlerdeki stres değerlerinin belirgin şekilde arttığı gösterilmiştir (Sertgöz, 1997; Batista vd., 2017).

Kantileverli tasarımlarda, moment kolunun uzamasına bağlı olarak implant ve abutment bileşenlerinde stres yoğunluğunun arttığı, bunun da mekanik başarısızlık riskini yükselttiği bildirilmektedir. SEA sonuçları, klinikte kantilever uzunluğunun sınırlandırılması ve oklüzal temasların dikkatli bir şekilde düzenlenmesi gerektiğini desteklemektedir (Geng vd., 2001; Batista vd., 2017).

6.3. Doğal Diş Üzerindeki Etkiler ve Periodontal Yanıt

Doğal diş–implant destekli sabit protezlerde, doğal diş üzerindeki biyomekanik etkiler SEA çalışmalarında önemli bir inceleme konusudur. Periodontal ligament sayesinde doğal dişin fizyolojik hareket kabiliyeti korunmakta; ancak rijit bağlantı veya uygunsuz oklüzal yükleme koşullarında

periodontal ligamentte artmış stres değerleri oluşabilmektedir. Bu durumun, özellikle periodontal desteği zayıf dişlerde artmış mobilite ve periodontal hasar riskine yol açabileceği öne sürülmüştür (Menicucci vd., 2002; Lin vd., 2008).

Non-rijit bağlantı kullanılan modellerde ise doğal diş üzerindeki streslerin azaldığı, ancak periodontal ligamentte artmış hareketlerin ortaya çıkabildiği bildirilmiştir. Bu bulgular, doğal dişin periodontal durumunun bağlantı tipi seçiminde kritik bir faktör olduğunu ve SEA sonuçlarının klinik karar sürecine doğrudan katkı sağladığını göstermektedir (Lin vd., 2008; Özçelik vd., 2011).

SONUÇ

Bu derlemede incelenen sonlu elemanlar analizi (SEA) çalışmaları, doğal diş-implant destekli sabit protezlerin biyomekanik davranışının tek bir parametreyle açıklanamayacak kadar karmaşık bir yapıya sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Doğal diş ile implant arasındaki temel rijitlik ve mobilite farkı, tüm sistemin yük aktarım mekanizmasını belirleyen ana unsur olarak öne çıkmakta; bu fark, uygun olmayan protetik tasarımlar söz konusu olduğunda hem biyolojik hem de mekanik komplikasyonlar için zemin hazırlamaktadır.

SEA bulguları, implant çevresi kemik dokunun, özellikle kortikal kemik bölgesinin, stres yoğunlaşmalarına karşı en hassas yapı olduğunu göstermektedir. Bu durum, klinikte sıklıkla gözlenen marjinal kemik kaybının yalnızca biyolojik faktörlerle değil, aynı zamanda biyomekanik yükleme paternleriyle de yakından ilişkili olduğunu düşündürmektedir. Özellikle oblik yükleme koşulları ve kantilever uzantılarının varlığı, implant boyun bölgesinde stres ve gerilme değerlerini belirgin şekilde artırarak kemik-implant bağlantısının uzun dönem stabilitesini olumsuz etkileyebilmektedir.

Bağlantı tipi açısından değerlendirildiğinde, rijit ve non-rijit bağlantıların her birinin farklı biyomekanik avantaj ve dezavantajlara sahip olduğu görülmektedir. Rijit bağlantılar protezin genel stabilitesini artırırken implant çevresi kemikte stres yoğunluğunu artırabilmekte; non-rijit bağlantılar ise implant üzerindeki stresleri azaltma potansiyeline sahip olmakla birlikte doğal diş ve periodontal ligament üzerinde artmış hareketlere yol açabilmektedir. Bu bulgular, bağlantı tipi seçiminde mutlak bir “ideal” tasarımdan ziyade, hasta ve vaka bazlı bir yaklaşımın gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Kantilever varlığı, SEA çalışmalarında en tutarlı biçimde olumsuz biyomekanik sonuçlarla ilişkilendirilen tasarım unsurlarından biri olarak dikkat çekmektedir. Özellikle distal kantilever varlığı, moment kolunun uzamasına bağlı olarak hem implant bileşenlerinde hem de çevre kemik dokuda belirgin stres artışlarına neden olmaktadır. Bu nedenle, doğal diş-implant destekli sabit protezlerde kantilever kullanımının mümkün olduğunca sınırlandırılması,

kaçınılmaz olduğu durumlarda ise uzunluğunun ve oklüzal temaslarının titizlikle kontrol edilmesi gerektiği anlaşılmaktadır.

Sonlu elemanlar analizi, klinik çalışmaların yerine geçen bir yöntem olmaktan ziyade, klinik gözlemleri açıklayan ve öngörü sağlayan tamamlayıcı bir araç olarak değerlendirilmelidir. SEA bulguları, doğru vaka seçimi, uygun bağlantı tasarımı, dengeli oklüzal düzenleme ve kantileverden kaçınma gibi temel protetik prensiplerin biyomekanik temelini ortaya koyarak, doğal diş-implant destekli sabit protezlerin uzun dönem klinik başarısının artırılmasına katkı sağlamaktadır. Gelecekte, hasta spesifik modeller ve klinik verilerle desteklenen ileri düzey SEA çalışmalarının, bu kompleks sistemlerin daha iyi anlaşılmasına olanak tanıyacağı düşünülmektedir.

KAYNAKÇA

- Alemayehu, D.-B., & Jeng, Y.-R. (2021). Three-Dimensional Finite Element Investigation into Effects of Implant Thread Design and Loading Rate on Stress Distribution in Dental Implants and Anisotropic Bone. *Materials*, 14(22), 6974. <https://doi.org/10.3390/ma14226974>
- Arınç, H. (2018). Effects of prosthetic material and framework design on stress distribution in dental implants and peripheral bone: A three-dimensional finite element analysis. *Medical Science Monitor*, 24, 4279–4287. <https://doi.org/10.12659/MSM.908208>
- Bandela, V., & Kanaparthi, S. (2021). Finite Element Analysis and Its Applications in Dentistry. In: Baccouch, M. (Ed.), *Finite Element Methods and Their Applications*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.94064>
- Bathe, K. J. (2006). *Finite element procedures*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Batista, V. E. S., Verri, F. R., Almeida, D. A. F., Santiago Junior, J. F., Lemos, C. A. A., & Pellizzer, E. P. (2017). Finite element analysis of implant-supported prosthesis with pontic and cantilever in the posterior maxilla. *Computational Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, 20(6), 663–670. <https://doi.org/10.1080/10255842.2017.1287905>
- Büyük, F. N., Savran, E., & Karpat, F. (2022). Review on finite element analysis of dental implants. *Journal of Dental Implant Research* 41(3), 50-63. <https://doi.org/10.54527/jdir.2022.41.3.50>
- Celik, H. K., Koç, S., Kustarci, A., & Rennie, A. E. W. (2022). *A literature review on the linear elastic material properties assigned in finite element analyses in dental research*. *Materials Today Communications*, 30, 103087. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2021.103087>
- Cook, R. D., Malkus, D. S., Plesha, M. E., & Witt, R. J. (2002). *Concepts and applications of finite element analysis* (4th ed.). New York, NY: John Wiley & Sons.
- Dargahi, J., Najarian, S., & Talebi, M. (2005). Analysis of the effects of different materials in a tooth implant-supported fixed prosthesis using finite element method. *Biomedical Materials and Engineering*, 15(4), 317–331.
- Eraslan, O., İnan, Ö., & Seçilmiş, A. (2010). The effect of framework design on stress distribution in implant-supported FPDs: A 3-D FEM study. *European Journal of Dentistry*, 4(4), 374–382.
- Falcinelli, C., Valente, F., Vasta, M., & Traini, T. (2023). Finite element analysis in implant dentistry: State of the art and future directions. *Dental Materials*, 39, 539–556. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2023.04.002>

- Geng, J. P., Tan, K. B. C., & Liu, G. R. (2001). Application of finite element analysis in implant dentistry: A review of the literature. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 85(6), 585–598. <https://doi.org/10.1067/mpr.2001.115251>
- Gomes, É. A., Barão, V. A. R., Rocha, E. P., de Almeida, É. O., & Assunção, W. G. (2011). Effect of metal-ceramic or all-ceramic superstructure materials on stress distribution in a single implant-supported prosthesis: Three-dimensional finite element analysis. *International Journal of Oral & Maxillofacial Implants*, 26(6), 1202–1209.
- Holmgren, E. P., Seckinger, R. J., Kilgren, L. M., & Mante, F. (1998). Evaluating parameters of osseointegrated dental implants using finite element analysis—A two-dimensional comparative study examining the effects of implant diameter, implant shape, and load direction. *The Journal of Oral Implantology*, 24(2), 80–88. doi:10.1563/1548-1336(1998)024<0080:EPOODI>2.3.CO;2
- Huang, Y.-C., Ding, S.-J., Yuan, C., & Yan, M. (2021). Biomechanical analysis of rigid and non-rigid connection with implant abutment designs for tooth-implant supported prosthesis: A finite element analysis. *Journal of Dental Sciences*, 16(4), 1243–1252. <https://doi.org/10.1016/j.jds.2021.07.020>
- Jameel, R. M., & Al-Khafaji, A. M. (2024). The influence of various superstructure materials on stress distribution for implant-supported prosthesis: Three-dimensional finite element analysis. *Prosthesis*, 6(5), 1133–1148. <https://doi.org/10.3390/prosthesis6050082>
- Kelkar, K. C., Bhat, V., & Hegde, C. (2021). Finite element analysis of the effect of framework materials at the bone–implant interface in the all-on-four implant system. *Dental Research Journal*, 18(1), Article 1. doi: 10.4103/1735-3327.310031
- Lencioni, K. A., Noritomi, P. Y., Macedo, A. P., Ribeiro, R. F., & Pereira, R. P. de A. (2020). Influence of different implants on the biomechanical behavior of a tooth–implant fixed partial dentures: A three-dimensional finite element analysis. *Journal of Oral Implantology*, 46(1), 27–34. <https://doi.org/10.1563/aaid-joi-D-18-00314>
- Lin, C. L., Chang, S. H., Wang, J. C., & Ko, C. C. (2010). Evaluation of stress induced by implant type, number of splinted teeth, and variations in periodontal support in tooth–implant-supported fixed partial dentures: A nonlinear finite element analysis. *Journal of Periodontology*, 81(1), 121–130. <https://doi.org/10.1902/jop.2009.090331>
- Lin, C.-L., Wang, J.-C., & Chang, W.-J. (2008). Biomechanical interactions in tooth-implant-supported fixed partial dentures with variations in the number of splinted teeth and connector type: a finite element analysis. *Clinical Oral*

Implants Research, 19(1), 107–117. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0501.2007.01363.x>

- Manchikalapudi, G., & Basapogu, S. (2022). Finite element analysis of effect of cusp inclination and occlusal contacts in PFM and PEEK implant-supported crowns on resultant stresses. *Medical Journal Armed Forces India*, 78(1), 80–87. <https://doi.org/10.1016/j.mjafi.2020.11.014>
- Martí-Vigil, J., Casamitjana, J., Marimon, X., Cerrolaza, M., Medina-Gálvez, R., Cantó-Navés, O., Ferrer, M., & Cabratosa-Termes, J. (2024). Impact testing in implant-supported prostheses and natural teeth: A systematic review of properties and performance. *Materials*, 17(16), Article 4040. <https://doi.org/10.3390/ma17164040>
- Menicucci, G., Mossolov, A., Mozzati, M., Lorenzetti, M., & Preti, G. (2002). Tooth-implant connection: Some biomechanical aspects based on finite element analyses. *Clinical Oral Implants Research*, 13(3), 334–341. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0501.2002.130315.x>
- Natali, A. N., Pavan, P. G., & Ruggero, A. L. (2006). Analysis of bone-implant interaction phenomena by using a numerical approach. *Clinical Oral Implants Research*, 17(1), 67–74. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0501.2005.01162.x>
- Özçelik, T. B., Ersoy, E., & Yılmaz, B. (2011). Biomechanical evaluation of tooth- and implant-supported fixed dental prostheses with various nonrigid connector positions: A finite element analysis. *Journal of Prosthodontics*, 20(1), 16–28. <https://doi.org/10.1111/j.1532-849X.2010.00654.x>
- Papavasiliou, G., Kamposiora, P., Bayne, S.C. & Felton, D.A. (1996). Three-dimensional finite element analysis of stress-distribution around single tooth implants as a function of bony support, prosthesis type, and loading during function. *Journal of Prosthetic Dentistry*, 76(6), 633–640. [https://doi.org/10.1016/s0022-3913\(96\)90442-4](https://doi.org/10.1016/s0022-3913(96)90442-4)
- Pérez-Pevida, E., Brizuela-Velasco, A., Chávarri-Prado, D., Jiménez-Garrudo, A., Sánchez-Lasheras, F., Solaberrieta-Méndez, E., Diéguez-Pereira, M., Fernández-González, F. J., Dehesa-Ibarra, B., & Monticelli, F. (2016). Biomechanical consequences of the elastic properties of dental implant alloys on the supporting bone: Finite element analysis. *BioMed Research International*, 2016, Article 1850401. <https://doi.org/10.1155/2016/1850401>
- Prados-Privado, M., Martínez-Martínez, C., Gehrke, S. A., & Prados-Frutos, J. C. (2020). Influence of bone definition and finite element parameters in bone and dental implants stress: A literature review. *Biology*, 9(8), Article 224. <https://doi.org/10.3390/biology9080224>

- Reddy, J. N. (2019). *An introduction to the finite element method* (4th ed.). New York, NY: McGraw-Hill Education.
- Sadek, H. S., Anany, N. M., El-Anwar, M. I., Alhotan, A., Diab, A.-H., Fayad, B. R., Heiba, I. M., Shahin, I. G., Bourauel, C., & Elshazly, T. M. (2025). Biomechanical performance of implant-tooth-supported prostheses: A numerical 3D finite element analysis. *International Dental Journal*, 75(6), Article 103882. <https://doi.org/10.1016/j.identj.2025.103882>
- Sertgöz, A. (1997). Finite element analysis study of the effect of superstructure material on stress distribution in an implant-supported fixed prosthesis. *International Journal of Prosthodontics*, 10(1), 19–27. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/9484066/>
- Tada, S., Stegaroiu, R., Kitamura, E., Miyakawa, O., & Kusakari, H. (2003). Influence of implant design and bone quality on stress/strain distribution in bone around implants: A 3-dimensional finite element analysis. *International Journal of Oral & Maxillofacial Implants*, 18(3), 357–368.
- Weinstein, A. M., Klawitter, J. J., Anand, S. C., & Schuessler, R. (1976). Stress analysis of porous rooted dental implants. *Journal of Dental Research*, 55(5), 772-777. <https://doi.org/10.1177/00220345760550051001>
- Zienkiewicz, O. C., & Taylor, R. L. (2005). *The finite element method for solid and structural mechanics* (Sixth edition). Oxford, England: Elsevier Butterworth-Heinemann.
- Zupancic Cepic, L., Frank, M., Reisinger, A., Pahr, D., Zechner, W., & Schedle, A. (2022). Biomechanical finite element analysis of short-implant-supported, 3-unit, fixed CAD/CAM prostheses in the posterior mandible. *International Journal of Implant Dentistry*, 8, Article 8. <https://doi.org/10.1186/s40729-022-00404-8>



BÖLÜM 2

Protetik Diş Hekimliğinde Yapay Zekâ Tabanlı Dijital İş Akışları

Tuba Şenocak¹ & Türker Akar²

Giriş

Son yıllarda teknolojiadaki gelişmeler ile protetik diş hekimliği alanında da hem klinik uygulamalarda hem de laboratuvar aşamalarında değişiklikler mevcuttur (Khanagar et al., 2021a). Sağlık bilimleri ve mühendislik alan uygulamaları yapay zekâ ve makine öğreniminden etkilenmektedir (Revilla-León et al., 2023a). Geleneksel ölçü alma teknikleri, hekimin bireysel olarak yaptığı restorasyon tasarım ve planlama aşamaları yerini zamanla dijital ölçü tekniklerine ve bilgisayar destekli tasarım ve üretim (CAD/CAM) teknolojilerine bırakmaktadır. Bir diş hekimi muayenesi sonucunda doğru tanıyı koyabilmek ve tüm bilgileri ışığında doğru bir karar vererek uygun tedavi planlamasını yapacak yeteneğe sahip olmalıdır (Lee, Kim, Jeong, & Choi, 2018). Sınırlı bir süre içerisinde hekimin vereceği karar yapacağı tedavinin uzun dönem başarısını etkileyen önemli ve ilk basamaktır (Casalegno et al., 2019). Yapay zekâ uygulamaları hem tanı sürecinde hızlı ve doğru karar verebilmek, hem de laboratuvar aşamalarının daha hassas, tekrarlanabilir ve değiştirilebilir akışı ile hekime optimum çözümler sunmaktadır (Gao et al., 2025).

Günümüzde yapay zekâ tabanlı uygulamaları diş hekimliği kapsamında incelediğimizde radyolojik değerlendirmeler (Duong et al., 2021), ortodontik tedavi planlaması (Monill-González, Rovira-Calatayud, d'Oliveira, & Ustrell-Torrent, 2021) ve periodontal hastalıkların analizi (Scott, Biancardi, Jones, C Andrew, 2023), kök-kanal anatomisinin belirlenmesi (Lai, Dunlap, Gluskin, Nehme, & Azim, 2023) gibi dental uygulamalarda kullanıldığı bilinmektedir.

Bu bölümün amacı protetik diş hekimliğinde yapay zekâ ve yapay zekâ tabanlı dijital iş akışlarını güncel literatür ışığında sistematik bir şekilde ele almaktır. Bu bölümde yapay zekâ uygulamalarının protetik tedavi aşamalarında klinik düzeyde tanı ve tedavi süreçlerinde entegrasyonu kapsamlı bir şekilde değerlendirilecektir.

¹ Dr. Dt., Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi Protetik Diş Tedavisi, ORCID: 0000 0002 9198 8469

² Doç. Dr., Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi Protetik Diş Tedavisi, ORCID: 0000-0003-2035-8686

1. Protetik Diş Hekimliğinde Dijitale Geçiş

Konvansiyonel iş akışlarından dijital iş akışına geçiş

Geleneksel protetik diş hekimliğinde ölçü alımındaki zorluklar, model üretiminin fiziki olması sebebiyle oluşabilecek muhtemel hatalar ve maliyet artışı, laboratuvar aşamalarının kapsamlı olması ve uzun sürmesi, teknisyen-diş hekimi iletişimine dayalı süreçlerdeki problemler konvansiyonel iş akışlarında değişiklik ihtiyacını doğurmuştur (Seth, Bawa, & Gotfredsen, 2024). Teknolojik gelişmeler diş hekimliği alanında gün geçtikçe artmaktadır. Dijital dental işlemler sürekli olarak standardize edilmekte ve rutin tedavi protokollerinin bir parçası haline gelmektedir (Bernauer, Müller, Zitzmann, & Joda, 2020). Dijital iş akışına ait sistemler ile hata kaynakları minimize edilmiş olur, geleneksel yöntemlerle çözülemeyecek kadar karmaşık problemler çözülebilir hale gelir, tanı ve tedavi süreleri önemli ölçüde azalmış olur (Abdulkarim, Alharamlah, Abubshait, Alotaibi, & Abouonq, 2024).

CAD/CAM teknolojilerinin gelişimi

Protetik diş hekimliğinde bilgisayar destekli tasarım/bilgisayar destekli üretim (CAD/CAM) rutin dental uygulamalarda yerini almıştır (Shan, Tay, & Gu, 2021). CAD/CAM ile yapay zekâ entegrasyonu, hasta başında kullanımını sağlamaktadır (Raith et al., 2017). Zamandan ve enerjiden tasarruf etmek adına bilgisayarda, hastanın tercihlerine göre tasarıma olanak tanıyan bir tasarım ve üretim ünitesi bulunmaktadır. CAD/CAM sistemi ile iki ve üç boyutlu modeller oluşturulur ve bunlar daha sonra sayısal olarak kontrol edilen mekanikler olarak kullanılır. CAD/CAM ile, intraoral tarama, eklemeli üretim ve 3D baskı gibi frezeleme teknolojileri kullanılarak restorasyonların üretimi gerçekleştirilir (Vera, Corchado, Redondo, Sedano, & García, 2013). CAD/CAM ile manuel laboratuvar prosedürleri azaltılarak veya ortadan kaldırılarak diş teknisyeni ve diş hekiminin protezin tekrarlanabilirliğini ve doğruluğunu sağlamasına olanak sağlanır (Pasricha & Aggarwal, 2021).

2. Yapay Zekâ Kavramı ve Diş Hekimliğindeki Temel Yaklaşımlar

2.1. Yapay zekâ, makine öğrenmesi ve derin öğrenme

Yapay zekâ, problem çözme gibi insanın bilişsel becerilerini taklit edebilen herhangi bir makine veya teknolojiyi ifade eder, yapay zekanın bir alt alanı olan makine öğrenmesi (ML), verilerden öğrenerek çıkarımlar yapmayı içermektedir (Kermany et al., 2018). ML, sistemin yeni veri örneklerinin davranışını tahmin etmek için belirli bir veri kümesindeki belirli istatistiksel kalıpları öğrendiği yapay zekanın özel bir dalıdır (Revilla-León et al., 2023b). Makine öğrenimi algoritmalarında denetimli ve denetimsiz eğitim türleri kullanılır. Denetimli eğitim yoluyla sınıflandırma (belirli bir veri noktasının kategorisini belirlemek)

ve regresyon (bir dizi bağımsız ve bağımlı değişken arasında sayısal bir ilişki bulmak) gibi görevler, gerçekleştirilir. Kümeleme ve boyutluluğun azaltılması gibi görevler genellikle, amacın belirli bir veri kümesindeki önemli özellikleri yakalamak olduğu denetimsiz eğitim yoluyla gerçekleştirilir. Makine öğreniminin bir alt alanı olan derin öğrenme (DL) yaklaşımları, son yıllarda görüntü işleme, nesne algılama ve sınıflandırma dahil olmak üzere çeşitli alanlarda dikkate değer ilerlemeler göstermiştir. DL mimarilerinin bu kadar ilgi görmesinin temel nedeni; resimler, sinyaller, videolar ve metinler dahil olmak üzere çeşitli veri türlerinden otomatik olarak öğrenme yetenekleridir (Ozsari, Güzel, Yılmaz, & Kamburoğlu, 2023). DL, sinir ağlarını eğitmek için bir geri yayılım algoritması aracılığıyla çalışır. Konvolüsyonel sinir ağları (CNN), özellikle görüntü işleme ve radyolojik veri setlerinin analizi için kullanılan DL'nin özel bir parçasıdır (Brahmi, Jdey, & Drira, 2024).

2.2. Klinik Diş Hekimliğinde Yapay Zekâ Destekli Algoritmik Sistemler

Yapay zekâ tabanlı sistemler ve makine öğrenimi algoritmaları ile tasarım ve protetik planlama süreçleri optimize edilir (Tosun, 2025). Sistemdeki veriler ile planlanan tedavi kişiselleştirilir, tasarım önerileri üretilir ve klinikte hekime yol gösterici planlama oluşturulur (Bernauer, Zitzmann, & Joda, 2021). Örneğin klinik karar destek sistemi (CDSS) gibi sağlık profesyonellerine tanı ve tedavi planlaması gibi karar verme görevlerinde yardımcı olmak üzere tasarlanmış uygulamalar klinikte kullanılabilmektedir (Park, Lee, Kim, & Kim, 2012). Tanı ve tedavi planlama dışında materyal çeşitliliğinin çok fazla olduğu diş hekimliği alanında tedavi kararı vermeden önce hastanın tedavi alternatiflerine ilişkin tercihleri de dikkate alınabilir (Espelid et al., 2006).

Klinikte hekime algoritmalar aracılığıyla doğru tedavi seçimi yapma olanağı sağlayan sistemlerden biri de dijital gülüş tasarımı uygulaması olup uygun şekilde kalibre edilmiş fotoğraflarla başlayarak, bir hastanın rehabilitasyonunu simüle eden kapsamlı bir iş akışı sağlar (Cervino, Fiorillo, Arzukanyan, Spagnuolo, & Ciccù, 2019).

3. Protetik Diş Hekimliğinde Yapay Zekâ Tabanlı Dijital İş Akışları

3.1. Dijital veri toplama (intraoral tarayıcılar, CBCT, yüz tarama)

Yapay zekâ, çok büyük veri kümelerini inceleyerek insan gözünden kaçabilecek örüntüleri ortaya çıkarabilmekte; bu özelliği sayesinde görüntüleme temelli tanı süreçlerinde, literatürde de belirtildiği üzere, geleneksel yaklaşımlara kıyasla daha yüksek doğruluk ve daha hızlı sonuçlar sağlayabilmektedir (Nazemian et al., 2023).

Konik ışınlı bilgisayarlı tomografi (CBCT) taramalar implant planlama aşamasında altın standarttır (Altalhi et al., 2023). Pratisyen diş hekimleri, ayrıntılı

implant planlaması ve anatomik yapıların tanımlanması amacıyla CBCT taramalarını değerlendirmek için gerekli bilgi birikimi ve yeteneğe sahip olmayabilir. Yapay zeka bu sorunun çözümüne katkı sağlamaktadır (Oliveira-Santos et al., 2023).

3.2. Dijital verilerin bir araya getirilmesi ve dijital hasta modeli

Dijital iş akışı sürecinde kaynağı farklı olan dijital veriler sistematik olarak birleştirilir. İntraoral taramalar, konik ışınlı bilgisayarlı tomografi (CBCT) ve yüz yüzey taramaları gibi hastaya ait üç boyutlu anatomik veriler birleştirilerek oluşturulan sanal temsile dijital hasta modeli denir (Li, Bi, Yang, & Liu, 2021). Dijital hasta modeli, ağız dışı yumuşak doku, kraniyofasiyal sert doku, kalan dişler (ağız içi yumuşak doku dahil) ve dinamik oklüzyon gibi dijital 3 boyutlu tanı verilerini entegre eder (Solaberrieta, Garmendia, Minguez, Brizuela, & Pradies, 2015). Dijital hasta modeli kullanımı ile hasta da süreç içerisine dahil edilmiş olur, bilgi paylaşımı ve hasta-hekim, hekim-teknisyen iletişim süreçleri de daha aktif ve etkin yönetilir (Abduo & Rasaie, 2025).

4. Yapay Zekâ ile Tanı ve Tedavi Planlaması

4.1. Otomatik teşhis ve analiz sistemleri

İmplant diş hekimliğinde, yapay zekâ; periapikal ve panoramik radyograflardan implant tipini belirlemek için kullanılmaktadır (Lee, Kim, Lee, & Jeong, 2020). Klinik uygulamada implant tespiti için farklı sistemler bulunmaktadır. İlk sistem, diş hekimlerinin radyografi görüntülerinin web sitesi görüntüsüyle eşleşip eşleşmediğini kontrol etmesi gereken, farklı implant markalarına ait radyograflardan oluşan bir veri tabanı içeren bir web sitesi (www.whatimplantistthat.com) kullanır ('What implant is that?', 2023). Bir diğer sistem ise implant özellikleri hakkında yapılan bir anket ile diş hekimlerinin implantı tanımlamak için cevapları veri tabanı ile eşleştirmesini gerektirir (Michelinakis, Sharrock, & Barclay, 2006). Bununla birlikte, bu sistemlerin her ikisi de klinisyenin radyografik görüntüyü veri tabanı ile eşleştirmesini gerektirir, böylece tanımlama sürecinde insan hatası unsuru artar. Yapay zekanın avantajı, diş hekimi yerine bilgisayarın implantı tanımlamasıdır. DL ailesinin CNN'leri, bir kimlik oluşturarak görüntüleri tanımlayabilir. Kullanılan implant sistemleri dünyanın farklı yerlerinde değişiklik gösterdiği için her implant için doğru bir veri tabanı oluşturmak günümüzün ihtiyacıdır. Doğruluğun doğrulanması için bölgesel bazlı bir DL modelinin oluşturulması da oldukça önemlidir (Altalhi et al., 2023).

4.2. Kişiselleştirilmiş protetik tedavi planlaması

Hastaya ait intraoral taramalar, yüz yüzey taramaları ve radyolojik görüntüler gibi veri setleri dijital formatlarda elde edilir. Bu veriler DICOM ve STL

formatındaki standartlaştırılmış formatlara dönüştürülür. İmplant cerrahisi esnasında intraoral tarama ve CBCT taramasının alınmasının ardından, doku kalınlığına, kemik tipine/ kalınlığına, çıkış profiline ve hastanın bireysel tıbbi geçmişine bağlı olarak yapay zeka, iki taramayı otomatik olarak birleştirir, restorasyon tasarlanır ve ardından uygun implant pozisyonu belirlenir. Daha sonra cerrahi rehber oluşturularak en uygun implant pozisyonu için cerrahi gerçekleştirilebilir (Chen, Stanley, & Att, 2020).

5. Protetik Restorasyon Tasarımında Yapay Zekâ Uygulamaları

5.1. Diş üstü ve implant üstü restorasyon tasarımları

Yapay zekâ modelleri, diş preparasyonlarında bitim hattının haritalanması veya bilgisayar destekli tasarım (CAD) yöntemleri kullanılarak diş restorasyonlarının otomatik tasarımı için diş anatomisi seçimi gibi farklı protez uygulamalarında kullanılmaktadır (Zhang, Dai, Tian, Yuan, & Yu, 2019). Diş üstü sabit protez planlama aşamasında metal altyapının başarılı bir şekilde dökümü için en uygun parametreleri belirlemek için kullanılmaktadır (Matin, Hadzistevic, Vukelic, Potran, & Brajlili, 2017). İmplant üstü sabit protez tasarımlarında abutment dişeti bitim hattı belirlenmesi de yapay zeka modelleri ile oluşturulabilmektedir (Lerner, Mouhyi, Admakin, & Mangano, 2020). Hareketli protezlerde dişsiz çenelerin otomatik sınıflandırılması, yapay zeka destekli ölçü kaşığı seçimi ve makine öğrenimine dayalı hareketli bölümlü protez iskeleti tasarımı için geliştirilen yapay zeka algoritmaları mevcuttur (Hussein & Hussein, 2022; Kim, Oh, & Kim, 2024). Yapay zekada derin öğrenmenin pratik uygulamalarıyla ilişkili olan kennedy sınıflandırmasına ait önerilen modeller sınıflama tipini belirlemekle birlikte maksiller veya mandibular alveolar kret hakkında kesin bilgiler içerir bu da çene yüz protez planlamaları için önemlidir (Bauer, Gau, Guell, Eblenkamp, & Loeffelbein, 2016).

Tek bir görüntüden aynı anda birden fazla diş rahatsızlığını teşhis edebilme yeteneği, diş hekimlerinin tanısal yeterliliğini artırır.

5.2. Oklüzyon ve estetik ayarlamaları

Dijital iş akışları, protezlerin oklüzyon düzenlemesi ve estetik parametrelerin planlanması ve ayarlanmasında önemli avantajlar sunmaktadır. Geleneksel yaklaşımlarda oklüzyon ayarlamaları, genellikle manuel ölçümler, fiziksel artikülörler ve teknisyen deneyimine dayanırken, dijital süreçler üç boyutlu (3D) görüntüleme verileri, sanal artikülörler ve yapay zekâ destekli analizlerle bu süreci daha objektif, tekrarlanabilir ve öngörülebilir hale getirmektedir. Özellikle dijital oklüzyon simülasyonları, intraoral taramalar ve CBCT gibi multimodal verilerle entegre edilerek çene ilişkilerinin doğru modellenmesini sağlar, böylece protetik rehabilitasyonun fonksiyonel başarısı artırılır. Bu yaklaşım, vertikal oklüzyon boyutunun belirlenmesi ve mastikasyon

fonksiyonunun optimize edilmesi gibi kritik adımlarda yüksek güvenilirlik sunar (Bozhkova, 2016).

Dijital sistemler aynı zamanda estetik analiz ve tasarım süreçlerini de kapsamlı bir şekilde destekler. 3D sanal hasta modelleri üzerinde gerçekleştirilen estetik parametre analizleri hem dişlerin yüz ile ilişkisini hem de gülüş çizgisi ve simetri gibi özellikleri objektif ölçütlerle değerlendirebilir. Bu tür dijital estetik iş akışları, yüzün ve dişlerin referans noktalarına dayalı ölçümler aracılığıyla geleneksel 2D yaklaşımlara kıyasla daha yüksek hassasiyet sağlar ve yapay zekâ destekli anahtar nokta tanıma algoritmalarıyla hızlı ve doğru estetik veriler üretir (Ceylan, Özel, Memişoglu, Emir, & Şen, 2023). Bu sayede, tedavi planlaması aşamasında hem klinisyen hem de hasta beklentileri daha net bir şekilde karşılanır.

Yapay zekâ, bu dijital iş akışlarının etkinliğini daha da artırmaktadır. AI destekli yazılımlar, dijital tarama verilerinden öğrenerek optimum oklüzyonal temas bölgelerini ve ideal diş pozisyonlarını belirlemek için büyük veri setleri üzerinden modelleme yapabilir. AI ayrıca otomatik öneri sistemleri aracılığıyla alternatif tasarım seçenekleri sunarak klinik karar verme süreçlerini destekler ki bu da hasta memnuniyetini ve tedavi başarısını artırır. Klinik uygulamalarda diş rengi seçimi yapmak ve renk uyumu sağlamak için önerilen bir porselen seçimi sunmak üzere yapay zeka modelleri kullanılmaktadır (Wei, Peng, Li, & Wang, 2018).

Dijital gülüş tasarımı (digital smile design) gibi teknolojiler estetik hedeflerin objektif değerlendirilmesine olanak tanır ve hasta beklentileri ile klinik parametrelerin uyumunu optimize eder. Bu tür simülasyonlar, tedavi öncesinde hem hekim hem de hasta arasında daha etkili bir iletişim sağlar ve klinik karar verme sürecini güçlendirir (Ceylan et al., 2023).

5.3. Çene Yüz Protez Uygulamaları

Dijital teknoloji, ağız dışı implantların dijital olarak planlanmasına ve yerleştirilmesine, ayrıca çene yüz protezlerinin tasarlanmasına ve üretilmesine de olanak tanır. CAD/CAM teknolojilerinden önce, çene-yüz proteziyle yüz formunun yeniden yapılandırılması, mum kalıbının elle şekillendirilerek model elde edilmesini gerektiriyordu. Dijital iş akışı çene yüz protezlerinin dijital tasarımını da mümkün kıldı (Ciocca, Mingucci, Gassino, & Scotti, 2007). Çene yüz protezleri üretmek için CAD/ CAM teknolojisi kullanıldığında, hastanın yumuşak ve sert yapılarını yakalayan görüntüleme teknikleriyle (örn. MR ve CT) ortak bir tedavi süreci başlar. Bu veriler daha sonra bilgisayar yazılımları ile modele edilir (Jiao, Zhang, Huang, & Wang, 2004). Doğal yüz yapısı deforme olduğunda ise, dijital kütüphaneden seçilen bir formla çene yüz protezleri

oluşturmak için CAD/CAM teknolojilerinden yararlanılabilir (Singi, Sathe, Reche, Sibal, & Mantri, 2022). Bu yöntem geleneksel yöntemle göre daha az zaman alır.

6. Üretim Süreçlerinde Yapay Zekâ Uygulamaları

6.1. 3D yazıcılar ve freze sistemleri

CAD/CAM ve 3D baskı iş akışları protetik diş hekimliği uygulamalarını önemli ölçüde konvansiyonelden diital dönüşürdü (Dewan, 2023). Konvansiyonel protez yapımı diş hekimleri ve diş teknisyenleri tarafından kapsamlı bir çalışma gerektirirken, diital protezler kullanılan sisteme bağı olarak bir veya iki seansta tamamlanabilir (Cervino et al., 2023).

7. Yapay Zekâ Tabanlı Dijital İş Akışlarının Avantajları

7.1. Zaman ve maliyet etkinliği

Tek bir görüntüden aynı anda birden fazla diş rahatsızlığını teşhis edebilme ve tedavi planlamasına olanak sunan yapay zeka algoritmaları, diş hekimlerinin tanısal yeterliliğini arttırarak zamandan tasarruf sağlanmaktadır (Zubair, Babu, Ganesan, & Hariharan, 2025).

7.2. Klinik başarı ve hasta memnuniyeti

Diş hekimlerinin teşhis koymak, en iyi tedavi seçeneğine karar vermek, prognozu tahmin etmek için edindikleri tüm bilgileri kullanmaları gerekir. Ancak bazı durumlarda diş hekimleri sınırlı bir sürede doğru klinik kararı verebilecek yeterli bilgiye sahip değildir. Yapay zeka uygulamaları, hekimin doğru karar alabilmesi ve daha iyi performans gösterebilmeleri için hekimlere yardımcı olmaktadır (Khanagar et al., 2021b).

8. Dijital Sistemlerde Etik Yaklaşımlar

8.1. Veri güvenliği ve gizlilik

Yapay zeka uygulamalarında kapsamlı algoritmaların gerekliliği, algoritma hatalarından ortaya çıkan yanlış yorumlamaları da beraberinde getirebilir. Yapay zekanın sunduğu bilgileri analiz ederken klinisyenlerin sürekli olarak dikkatli olması gerekir (Mupparapu, Wu, & Chen, 2018). Makine öğrenimi çoğunlukla eğitim için veri gerektirir. 1996 Sağlık Sigortası Taşınabilirlik ve Sorumluluk Yasası (HIPAA) yasalarının çiğnenmesini önlemek için ihtiyatlı bir şekilde davranılmalıdır (Chen et al., 2020). Örneğin küresel bir diş implantı sınıflandırma sistemi oluşturabilmek için büyük veriler kullanılması gerektiğinden tıbbi etiğe bağlılık da dikkat edilmesi gereken önemli bir husustur (Altalhi et al., 2023).

Dijital iş akışları, öncelikle hastaya zarar vermeme ilkesi gözetilerek uygulanmalı; diş hekiminin hastaya karşı taşıdığı sorumluluk bilinci çerçevesinde

ve hastaya ait verilerin kullanımına ilişkin etik ve hukuki farkındalıkla ele alınmalıdır.

8.2. Klinik sorumluluk ve yapay zekânın sınırları

Tedavi prognozunun tahmini için yapay zeka kullanımına ait çalışmaların kısıtlı olması sebebiyle özellikle implantolojide tedavi sonuçlarının öngörülmesi konusunda literatür kısıtlıdır (Lyakhov et al., 2022). Sinir ağlarını kullanarak implant kaybı riskini tahmin eden alışmaların da kısıtlı olması bu noktada yapay zekanın sınırlı kaldığı noktaları şu an için göstermektedir (Huang et al., 2022).

9. Sonuç

Dijital iş akışları protetik diş hekimliğinde teknolojik bir gelişim olmakla birlikte hasta merkezli, kişiselleştirilmiş ve kanıta dayalı bir süreçtir. Dijitalleşen günümüz dünyasında, protetik tedavilerin klinik etkinliği, hasta memnuniyeti ve uzun dönem başarısının hızla gelişim göstereceği beklenmektedir. Bu bağlamda, dijital iş akışlarının bilimsel kanıtlarla desteklenmiş, etik ve standartlaştırılmış bir çerçevede klinik pratiğe entegrasyonu, modern protetik diş hekimliğinin sürdürülebilir gelişimi açısından kritik önem taşımaktadır.

KAYNAKLAR

- Abdulkarim, L. I., Alharamlah, F. S. S., Abubshait, R. M., Alotaibi, D. A., & Abouonq, A. O. (2024). Impact of Digital Workflow Integration on Fixed Prosthodontics: A Review of Advances and Clinical Outcomes. *Cureus*. doi:10.7759/cureus.72286
- Abduo, J., & Rasaie, V. (2025). Digital Workflows in Prosthodontics. *Australian Dental Journal*, 70(S1). doi:10.1111/adj.70005
- Altalhi, A. M., Alharbi, F. S., Alhodaithy, M. A., Almarshedy, B. S., Al-saaib, M. Y., Al jfshar, R. M., ... AL-harbi, N. H. (2023). The Impact of Artificial Intelligence on Dental Implantology: A Narrative Review. *Cureus*. doi:10.7759/cureus.47941
- Bauer, F. X., Gau, D., Guell, F., Eblenkamp, M., & Loeffelbein, D. J. (2016). Automated detection of alveolar arches for nasoalveolar molding in cleft lip and palate treatment. *Current Directions in Biomedical Engineering*, 2(1), 701–705. doi:10.1515/cdbme-2016-0152
- Bernauer, S. A., Müller, J., Zitzmann, N. U., & Joda, T. (2020). Influence of Preparation Design, Marginal Gingiva Location, and Tooth Morphology on the Accuracy of Digital Impressions for Full-Crown Restorations: An In Vitro Investigation. *Journal of Clinical Medicine*, 9(12), 3984. doi:10.3390/jcm9123984
- Bernauer, S. A., Zitzmann, N. U., & Joda, T. (2021). The Use and Performance of Artificial Intelligence in Prosthodontics: A Systematic Review. *Sensors*, 21(19), 6628. doi:10.3390/s21196628
- Bozhkova, T. P. (2016). The T-SCAN System in Evaluating Occlusal Contacts. *Folia Medica*, 58(2), 122–130. doi:10.1515/folmed-2016-0015
- Brahmi, W., Jdey, I., & Drira, F. (2024). Exploring the role of Convolutional Neural Networks (CNN) in dental radiography segmentation: A comprehensive Systematic Literature Review. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 133, 108510. doi:10.1016/j.engappai.2024.108510
- Casalegno, F., Newton, T., Daher, R., Abdelaziz, M., Lodi-Rizzini, A., Schürmann, F., ... Markram, H. (2019). Caries Detection with Near-Infrared Transillumination Using Deep Learning. *Journal of Dental Research*, 98(11), 1227–1233. doi:10.1177/0022034519871884
- Cervino, G., Fiorillo, L., Arzukanyan, A. V., Spagnuolo, G., & Cicciù, M. (2019). Dental Restorative Digital Workflow: Digital Smile Design from Aesthetic to Function. *Dentistry Journal*, 7(2), 30. doi:10.3390/dj7020030
- Cervino, G., Peditto, M., Portelli, M., Mili, A., Matarese, G., Fiorillo, L., ... Oteri, G. (2023). *The Use of AI for Prosthodontic Restoration: Predictable and*

- Safer Dentistry*. In *ASEC 2023* (p. 68). Basel Switzerland: MDPI. doi:10.3390/ASEC2023-15304
- Ceylan, G., Özel, G. S., Memişoğlu, G., Emir, F., & Şen, S. (2023). Evaluating the Facial Esthetic Outcomes of Digital Smile Designs Generated by Artificial Intelligence and Dental Professionals. *Applied Sciences*, 13(15), 9001. doi:10.3390/app13159001
- Chen, Y.-W., Stanley, K., & Att, W. (2020). Artificial intelligence in dentistry: current applications and future perspectives. *Quintessence International (Berlin, Germany : 1985)*, 51(3), 248–257. doi:10.3290/j.qi.a43952
- Ciocca, L., Mingucci, R., Gassino, G., & Scotti, R. (2007). CAD/CAM ear model and virtual construction of the mold. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 98(5), 339–343. doi:10.1016/S0022-3913(07)60116-4
- Dewan, H. (2023). Clinical Effectiveness of 3D-Milled and 3D-Printed Zirconia Prosthesis—A Systematic Review and Meta-Analysis. *Biomimetics*, 8(5), 394. doi:10.3390/biomimetics8050394
- Duong, D. L., Nguyen, Q. D. N., Tong, M. S., Vu, M. T., Lim, J. D., & Kuo, R. F. (2021). Proof-of-Concept Study on an Automatic Computational System in Detecting and Classifying Occlusal Caries Lesions from Smartphone Color Images of Unrestored Extracted Teeth. *Diagnostics*, 11(7), 1136. doi:10.3390/diagnostics11071136
- Espelid, I., Cairns, J., Askildsen, J. E., Qvist, V., Gaarden, T., & Tveit, A. B. (2006). Preferences over dental restorative materials among young patients and dental professionals. *European Journal of Oral Sciences*, 114(1), 15–21. doi:10.1111/j.1600-0722.2006.00282.x
- Gao, S., Wang, X., Xia, Z., Zhang, H., Yu, J., & Yang, F. (2025). Artificial Intelligence in Dentistry: A Narrative Review of Diagnostic and Therapeutic Applications. *Medical Science Monitor*, 31. doi:10.12659/MSM.946676
- Huang, N., Liu, P., Yan, Y., Xu, L., Huang, Y., Fu, G., ... Li, Y. (2022). Predicting the risk of dental implant loss using deep learning. *Journal of Clinical Periodontology*, 49(9), 872–883. doi:10.1111/jcpe.13689
- Hussein, M. O., & Hussein, L. A. (2022). Trueness of 3D printed partial denture frameworks: build orientations and support structure density parameters. *The Journal of Advanced Prosthodontics*, 14(3), 150. doi:10.4047/jap.2022.14.3.150
- Jiao, T., Zhang, F., Huang, X., & Wang, C. (2004). Design and fabrication of auricular prostheses by CAD/CAM system. *International Journal of Prosthodontics*, 17(4).

- Kermany, D. S., Goldbaum, M., Cai, W., Valentim, C. C. S., Liang, H., Baxter, S. L., ... Zhang, K. (2018). Identifying Medical Diagnoses and Treatable Diseases by Image-Based Deep Learning. *Cell*, 172(5), 1122-1131.e9. doi:10.1016/j.cell.2018.02.010
- Khanagar, S. B., Al-chaideb, A., Maganur, P. C., Vishwanathaiah, S., Patil, S., Baeshen, H. A., ... Bhandi, S. (2021a). Developments, application, and performance of artificial intelligence in dentistry – A systematic review. *Journal of Dental Sciences*, 16(1), 508–522. doi:10.1016/j.jds.2020.06.019
- Khanagar, S. B., Al-chaideb, A., Maganur, P. C., Vishwanathaiah, S., Patil, S., Baeshen, H. A., ... Bhandi, S. (2021b). Developments, application, and performance of artificial intelligence in dentistry – A systematic review. *Journal of Dental Sciences*, 16(1), 508–522. doi:10.1016/j.jds.2020.06.019
- Kim, S., Oh, K. C., & Kim, J.-H. (2024). Accuracy of Mandibular Removable Partial Denture Frameworks Fabricated by 3D Printing and Conventional Techniques. *Materials*, 17(13), 3148. doi:10.3390/ma17133148
- Lai, G., Dunlap, C., Gluskin, A., Nehme, W. B., & Azim, A. A. (2023). Artificial Intelligence in Endodontics. *Journal of the California Dental Association*, 51(1). doi:10.1080/19424396.2023.2199933
- Lee, J.-H., Kim, D.-H., Jeong, S.-N., & Choi, S.-H. (2018). Detection and diagnosis of dental caries using a deep learning-based convolutional neural network algorithm. *Journal of Dentistry*, 77, 106–111. doi:10.1016/j.jdent.2018.07.015
- Lee, J.-H., Kim, Y.-T., Lee, J.-B., & Jeong, S.-N. (2020). A Performance Comparison between Automated Deep Learning and Dental Professionals in Classification of Dental Implant Systems from Dental Imaging: A Multi-Center Study. *Diagnostics*, 10(11), 910. doi:10.3390/diagnostics10110910
- Lerner, H., Mouhyi, J., Admakin, O., & Mangano, F. (2020). Artificial intelligence in fixed implant prosthodontics: a retrospective study of 106 implant-supported monolithic zirconia crowns inserted in the posterior jaws of 90 patients. *BMC Oral Health*, 20(1), 80. doi:10.1186/s12903-020-1062-4
- Li, Q., Bi, M., Yang, K., & Liu, W. (2021). The creation of a virtual dental patient with dynamic occlusion and its application in esthetic dentistry. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 126(1), 14–18. doi:10.1016/j.prosdent.2020.08.026
- Lyakhov, P. A., Dolgalev, A. A., Lyakhova, U. A., Muraev, A. A., Zolotayev, K. E., & Semerikov, D. Y. (2022). Neural network system for analyzing statistical factors of patients for predicting the survival of dental implants. *Frontiers in Neuroinformatics*, 16. doi:10.3389/fninf.2022.1067040

- Matin, I., Hadzistevic, M., Vukelic, D., Potran, M., & Brajlilh, T. (2017). Development of an expert system for the simulation model for casting metal substructure of a metal-ceramic crown design. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 146, 27–35. doi:10.1016/j.cmpb.2017.05.004
- Michelinakis, G., Sharrock, A., & Barclay, C. W. (2006). Identification of dental implants through the use of Implant Recognition Software (IRS). *International Dental Journal*, 56(4), 203–208. doi:10.1111/j.1875-595X.2006.tb00095.x
- Monill-González, A., Rovira-Calatayud, L., d'Oliveira, N. G., & Ustrell-Torrent, J. M. (2021). Artificial intelligence in orthodontics: Where are we now? A scoping review. *Orthodontics & Craniofacial Research*, 24(S2), 6–15. doi:10.1111/ocr.12517
- Mupparapu, M., Wu, C.-W., & Chen, Y.-C. (2018). Artificial intelligence, machine learning, neural networks, and deep learning: Futuristic concepts for new dental diagnosis. *Quintessence International (Berlin, Germany : 1985)*, 49(9), 687–688. doi:10.3290/j.qi.a41107
- Nazemian, S., Boggs, S. T., Jimenez Ciriaco, E., Abu Shakra, H., Jung, E. Y., Lotfalikhan-Zand, Y. B., ... Bashirelahi, N. (2023). What every dentist needs to know about the use of artificial intelligence in dentistry. *General Dentistry*, 71(3), 23–27.
- Oliveira-Santos, N., Jacobs, R., Picoli, F. F., Lahoud, P., Niclaes, L., & Groppo, F. C. (2023). Automated segmentation of the mandibular canal and its anterior loop by deep learning. *Scientific Reports*, 13(1), 10819. doi:10.1038/s41598-023-37798-3
- Ozsari, S., Güzel, M. S., Yılmaz, D., & Kamburoğlu, K. (2023). A Comprehensive Review of Artificial Intelligence Based Algorithms Regarding Temporomandibular Joint Related Diseases. *Diagnostics*, 13(16), 2700. doi:10.3390/diagnostics13162700
- Park, S. G., Lee, S., Kim, M.-K., & Kim, H.-G. (2012). Shared decision support system on dental restoration. *Expert Systems with Applications*, 39(14), 11775–11781. doi:10.1016/j.eswa.2012.04.074
- Pasricha, N., & Aggarwal, K. (2021). Digitalization of Conventional Removable Prosthesis: Cad-cam Dentures. *UNIVERSITY JOURNAL OF DENTAL SCIENCES*, 7(2). doi:10.21276/ujds.2021.7.2.29
- Raith, S., Vogel, E. P., Anees, N., Keul, C., Güth, J.-F., Edelhoff, D., & Fischer, H. (2017). Artificial Neural Networks as a powerful numerical tool to classify specific features of a tooth based on 3D scan data. *Computers in Biology and Medicine*, 80, 65–76. doi:10.1016/j.combiomed.2016.11.013

- Revilla-León, M., Gómez-Polo, M., Vyas, S., Barmak, B. A., Galluci, G. O., Att, W., & Krishnamurthy, V. R. (2023a). Artificial intelligence applications in implant dentistry: A systematic review. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 129(2), 293–300. doi:10.1016/j.prosdent.2021.05.008
- Revilla-León, M., Gómez-Polo, M., Vyas, S., Barmak, B. A., Galluci, G. O., Att, W., & Krishnamurthy, V. R. (2023b). Artificial intelligence applications in implant dentistry: A systematic review. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 129(2), 293–300. doi:10.1016/j.prosdent.2021.05.008
- Scott, J., Biancardi, A. M., Jones, O., & Andrew, D. (2023). Artificial Intelligence in Periodontology: A Scoping Review. *Dentistry Journal*, 11(2), 43. doi:10.3390/dj11020043
- Seth, C., Bawa, A., & Gotfredsen, K. (2024). Digital versus conventional prosthetic workflow for dental students providing implant-supported single crowns: A randomized crossover study. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 131(3), 450–456. doi:10.1016/j.prosdent.2023.03.031
- Shan, T., Tay, F. R., & Gu, L. (2021). Application of Artificial Intelligence in Dentistry. *Journal of Dental Research*, 100(3), 232–244. doi:10.1177/0022034520969115
- Singi, S. R., Sathe, S., Reche, A. R., Sibai, A., & Mantri, N. (2022). Extended Arm of Precision in Prosthodontics: Artificial Intelligence. *Cureus*. doi:10.7759/cureus.30962
- Solaberrieta, E., Garmendia, A., Minguez, R., Brizuela, A., & Pradies, G. (2015). Virtual facebow technique. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 114(6), 751–755. doi:10.1016/j.prosdent.2015.06.012
- Tosun, İ. (2025). Protetik Diş Hekimliği Yapay Zekâ Uygulamaları: Günümüz ve Gelecek. In *Protetik Diş Hekimliği Yapay Zekâ Uygulamaları: Günümüz ve Gelecek. Türkiye Klinikleri Endodontics-Special Topics* (2nd ed., Vol. 11, pp. 61–68).
- Vera, V., Corchado, E., Redondo, R., Sedano, J., & García, Á. E. (2013). Applying soft computing techniques to optimise a dental milling process. *Neurocomputing*, 109, 94–104. doi:10.1016/j.neucom.2012.04.033
- Wei, J., Peng, M., Li, Q., & Wang, Y. (2018). Evaluation of a Novel Computer Color Matching System Based on the Improved Back-Propagation Neural Network Model. *Journal of Prosthodontics*, 27(8), 775–783. doi:10.1111/jopr.12561
- What implant is that? (2023, October 8).
- Zhang, B., Dai, N., Tian, S., Yuan, F., & Yu, Q. (2019). The extraction method of tooth preparation margin line based on S-Octree CNN. *International Journal*

for Numerical Methods in Biomedical Engineering, 35(10).
doi:10.1002/cnm.3241

Zubair, A., Babu, A. D. K. B. S., Ganesan, L., & Hariharan, A. (2025). Artificial Intelligence in Prosthodontics: Revolutionizing Removable Partial Denture Design and Fabrication. *Oral Health Research and Clinical Evidence*, 2(2), 86–89. doi:10.4103/ORCL.ORCL_15_25



BÖLÜM 3

Cad Cam Sistemleri ile Uyumlu Geçici Restorasyon Üretimi

Betül İyigün¹ & Tuğçe Koyu²

CAD/CAM TEKNOLOJİLERİNİN DIŞ HEKİMLİĞİNDE YERİ

Diş hekimliğinde ölçü alma yöntemleri protetik diş hekimliğinin temeli olup, teknolojiye yaşanan gelişmelerle birlikte dijital çözümler giderek geleneksel uygulamaların yerini almaktadır. Bu değişimin temel bileşenlerinden biri olan CAD/CAM (Computer-Aided Design/Computer-Aided Manufacturing) teknolojileri, optik tarayıcılarla elde edilen verilerin bilgisayar ortamında üç boyutlu dijital modellere dönüştürülmesi ve bu modeller üzerinden restorasyonların üretilmesine dayanmaktadır (Güngör, Yılmaz & Çelikkol, 2022).

Dijital dönüşümün odak noktasında yer alan CAD/CAM sistemleri, restoratif ve protetik tedavilerde hem klinik hem de laboratuvar süreçlerini hız, standartlaşma ve marjinal uyum açısından önemli ölçüde geliştirmiştir (Blatz et al., 2019; Rexhepi et al., 2023). Yapılan sistematik derlemeler, bu teknoloji kullanılarak işlenen seramik, zirkonya ve hibrit blok materyallerin dayanıklılık ve estetik performans bakımından başarılı sonuçlar sunduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, uzun dönem klinik başarının malzeme seçimi, bağlantı yöntemleri ve üretim sürecindeki parametrelerle yakından ilişkili olduğu vurgulanmaktadır (Małyś et al., 2025). Klinik çalışmalar, hasta memnuniyetinin genel olarak yüksek olduğunu ortaya koysa da, marjinal uyumsuzluk ve bağlantı problemleri en sık karşılaşılan başarısızlık nedenleri arasında yer almaktadır (Rexhepi et al., 2023). Son yıllarda CAD/CAM iş akışlarına yapay zekâ uygulamalarının dahil edilmesi ise otomasyonu artırarak kişiye özel tedavi planlamalarının geliştirilmesine katkı sağlamakta ve teknolojinin gelecekteki kullanım potansiyelini daha da güçlendirmektedir (Yeslam, 2024).

CAD/CAM SİSTEMLERİNİN TANIMI VE ÇALIŞMA PRENSİBİ

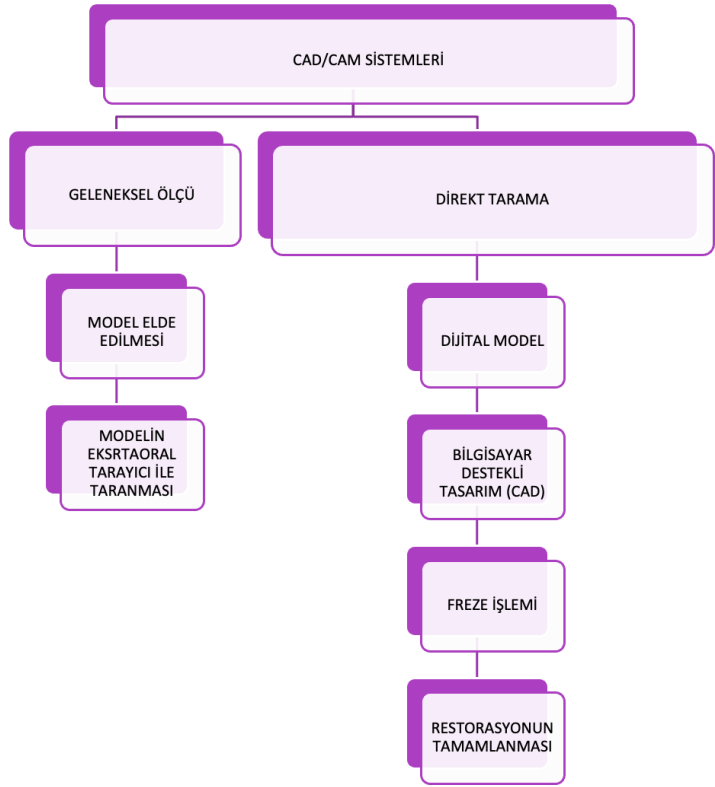
CAD/CAM sistemleri, bilgisayar destekli tasarım (CAD) ve bilgisayar destekli üretim (CAM) olmak üzere iki temel aşamadan oluşur.

¹ Protetik Diş Tedavisi Anabilim Dalı, Diş Hekimliği Fakültesi, Kütahya Sağlık Bilimleri Üniversitesi, Kütahya/TÜRKİYE, ORCID: 0009-0004-0366-0327

² Protetik Diş Tedavisi Anabilim Dalı, Diş Hekimliği Fakültesi, Kütahya Sağlık Bilimleri Üniversitesi, Kütahya/TÜRKİYE, ORCID: 0000-0002-2235-7540

- **CAD aşaması**, dijital tarama verilerinin bilgisayar ortamına aktarılması ve üç boyutlu modelin tasarlanması sürecidir.
- **CAM aşaması** ise bu dijital tasarımın frezeleme (kazıma, eksiltmeli üretim) veya üç boyutlu yazıcılar aracılığıyla fiziksel bir restorasyona dönüştürülmesidir.

Bu sistemlerde diş hekimi, hastanın ağzından doğrudan (intraoral) veya model üzerinden (ekstraoral) tarama yaparak ölçü verilerini elde eder. Bu veriler CAD yazılımına aktarılır, tasarımı yapılır ve ardından frezeleme (kazıma, eksiltmeli üretim) cihazı veya üç boyutlu yazıcı olmak üzere 2 farklı yöntemle restorasyon üretilebilir (Güngör, Yılmaz & Çelikkol, 2022).



Şekil 1. CAD/CAM Sistemlerinin Şematik Gösterimi (Güngör, Yılmaz & Çelikkol, 2022)

CAD/CAM SİSTEMLERİNİN AVANTAJLARI

CAD/CAM sistemlerinin diş hekimliği uygulamalarına girmesiyle birlikte hem klinik hem de laboratuvar aşamalarında çeşitli avantajlar ortaya çıkmıştır:

- **Zaman verimliliği:** Dijital ölçü alma ve üretim süreçleri, geleneksel yöntemlere kıyasla daha kısa sürede tamamlanabilmekte ve tedavi süresini azaltmaktadır (Alghazzawi, 2016).
- **Hasta konforu:** Geleneksel ölçü kaşıkları ve ölçü materyallerinin kullanılmaması sayesinde hastalarda görülen bulantı refleksi ve rahatsızlık hissi önemli ölçüde azalmaktadır (Yüzbaşıoğlu ve ark., 2014).
- **Standart üretim ve kalite kontrol:** Dijital üretim süreçlerinin belirli protokoller çerçevesinde yürütülmesi, insan kaynaklı hataların azalmasına ve üretimde daha tutarlı sonuçlar elde edilmesine katkı sağlamaktadır (Miyazaki ve ark., 2009).
- **Enfeksiyon riskinin azalması:** Fiziksel ölçü materyalleri ve alçı modellerin kullanılmaması, klinik ile laboratuvar arasında kontaminasyon riskini düşürerek enfeksiyon kontrolüne katkı sağlar.
- **Teknisyen-hekim iş birliği:** Dijital ölçü ve tasarım dosyalarının laboratuvara anında iletilebilmesi, üretim sürecini hızlandırmakta ve klinisyen ile teknisyen arasındaki iletişimi daha etkin hale getirmektedir (Zimmermann ve ark., 2015).

DEZAVANTAJLAR VE SINIRLILIKLAR

CAD/CAM sistemleri pek çok avantaj sunmasına rağmen, uygulama sürecinde karşılaşılan bazı sınırlılıklar da bulunmaktadır:

- **Yüksek maliyet:** Donanım yatırımı, bakım giderleri ve yazılım lisans ücretleri, bu sistemlerin kullanımını ekonomik açıdan zorluklar yaratmaktadır (Ting Shu & Jian, 2015).
- **Kullanım deneyimi gereksinimi:** Dijital iş akışına uyum sağlamak ve yazılımları etkin biçimde kullanabilmek için belirli bir eğitim ve deneyim sürecine ihtiyaç duyulmaktadır (Agnini & Coachman, 2015).
- **Taranan alan sınırlamaları:** Özellikle tam ark taramalarında, görüntü birleştirme süreçlerinden kaynaklı olarak ölçü doğruluğunda sapmalar meydana gelebilmektedir (Ender & Mehl, 2015).
- **Optik yansıma ve yüzey kaynaklı sorunlar:** Ağız içindeki parlak, nemli veya yüksek yansıtıcılığa sahip yüzeyler, tarama sırasında ölçüm doğruluğunu olumsuz etkileyebilmektedir (Dutton ve ark., 2020).

CAD/CAM SİSTEMLERİNDE DOĞRULUK (ACCURACY)

Bir CAD/CAM sisteminin klinik başarısı, büyük ölçüde elde edilen dijital ölçülerin doğruluk düzeyine bağlıdır. Doğruluk, tarama sonucunda elde edilen ölçü değerleri ile ölçülen yapının gerçek boyutları arasındaki farkın mümkün olduğunca az olması şeklinde tanımlanmaktadır.

Yapılan çalışmalar, tek diş restorasyonları ve kısa köprü uygulamalarında dijital ölçülerin doğruluk açısından geleneksel yöntemlerle benzer sonuçlar ortaya koyduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, tam ark restorasyon söz konusu olduğunda konvansiyonel ölçü tekniklerinin hâlen daha güvenilir sonuçlar sunduğu bildirilmektedir (Ahlholm ve ark., 2018; Ender, Zimmermann & Mehl, 2019).

GÜNÜMÜZDE KULLANILAN POPÜLER İNTRAORAL TARAYICILAR

Dijital diş hekimliği uygulamalarında intraoral tarayıcılar, geleneksel ölçü alma yöntemlerine alternatif oluşturan en önemli teknolojik gelişmeler arasında yer almaktadır. Bu cihazlar, CAD/CAM sistemleriyle entegre biçimde çalışarak hastanın ağız içi yapılarının üç boyutlu dijital modellerinin oluşturulmasını sağlar. Günümüzde ise birçok üretici firma, farklı teknik özelliklere ve ölçüm hassasiyetlerine sahip intraoral tarayıcı modelleri geliştirerek klinik kullanım için çeşitli seçenekler sunmaktadır (Güngör, Yılmaz & Çelikkol, 2022).

CEREC® (SIRONA DENTAL SYSTEMS, ALMANYA)

CEREC sistemi, diş hekimliğinde kullanılan ilk dijital tarama sistemlerinden biri olarak kabul edilmektedir. Sistem içerisinde en yaygın kullanılan modeller arasında Omnicam ve Primescan yer almaktadır.

Primescan, Omnicam modelinin geliştirilmiş bir versiyonu olup daha yüksek görüntü kalitesi ve daha hızlı veri toplama kapasitesi sunmaktadır. CAD/CAM sistemleriyle entegre şekilde çalışabilmesi sayesinde, restorasyonların tasarım ve üretim süreçleri klinik ortamda aynı seansta tamamlanabilmekte ve böylece tedavi süresi önemli ölçüde kısalmaktadır (Retrouvey & Abdallah, 2021; Güngör ve ark., 2022).



Şekil 2. CEREC® (SIRONA DENTAL SYSTEMS, ALMANYA) görüntüsü

TRIOS® (3SHAPE, DANİMARKA)

Trios serisi, yüksek tarama doğruluğu, güvenilir marjinal uyum ve renk eşleşmesindeki başarısı ile dijital ölçü sistemleri arasında öne çıkar.

- Trios 3, Trios 4, Trios 5 ve Trios 6 modelleri klinik kullanımda en yaygın tercih edilen versiyonlardır.

- Trios 5, Trios 3'e göre daha uzun batarya ömrü, daha hafif ve ergonomik gövde tasarımı ile geliştirilmiş yazılım entegrasyonları sunarak klinik kullanım konforunu artırmaktadır.

- Trios 6, artırılmış tarama çözünürlüğü, gelişmiş görüntü işleme algoritmaları, yapay zekâ destekli analiz sistemleri ve geliştirilmiş hijyenik tasarımı ile klinik iş akışını hızlandıran serinin en güncel modelidir. Ayrıca gelişmiş görüntü analizi sayesinde tanısal değerlendirmelerde operatöre ek destek sağlayabilmektedir.

Renkli tarama kabiliyeti sayesinde estetik restorasyon planlamasında önemli avantaj sağlar (Mangano ve ark., 2019; 3Shape Technical Documentation, 2025; Solomou, 2025).



Şekil 3. TRIOS® (3SHAPE, DANİMARKA) 3,4,5,6'nın görüntüsü

ITERO® (CADENT LTD., İSRAİL)

iTero tarayıcı serisi; Element 1, Element 2, Element Flex ve Element 5D olmak üzere dört farklı modelden oluşmaktadır.

Serinin en güncel modeli olan iTero Element 5D, yüksek çözünürlüklü üç boyutlu görüntüleme kapasitesine ek olarak optik koherens tomografi teknolojisini de içermekte ve bu sayede daha ayrıntılı dijital kayıt elde edilmesine olanak sağlamaktadır. Ayrıca Invisalign sistemleriyle uyumlu çalışabilmesi nedeniyle, özellikle ortodontik tedavi planlamasında yaygın olarak tercih edilmektedir (Medina-Sotomayor, Pascual-Moscardo & Camps, 2019).



Şekil 4. ITERO® (CADENT LTD., İSRAİL) görüntüsü

LAVA™ C.O.S (3M ESPE, ABD)

Lava tarayıcı sistemleri, kendine özgü tarama ve işleme mekanizmasıyla çalışan dijital ölçü sistemleri arasında yer almaktadır. Bu sistemler, tam ark taramalarında üst ve alt çeneyi dijital ortamda oklüzyona getirebilme özelliğine sahiptir. Yapılan çalışmalarda, marjinal bölgedeki ölçüm doğruluğunun yaklaşık 120 µm düzeyinde olduğu bildirilmiştir (Medina-Sotomayor ve ark., 2019).

Trios, CEREC ve iTero gibi güncel intraoral tarayıcı sistemleri ise hızlı tarama kapasitesi, renkli görüntü elde edebilme ve bulut tabanlı veri paylaşımı gibi özellikleri sayesinde sektörde yaygın biçimde tercih edilmektedir. Ancak tüm bu gelişmelere rağmen, özellikle tam ark taramalarında doğruluk kayıpları ve cihaz maliyetlerinin yüksek olması gibi bazı sınırlılıkların hâlen devam ettiği bildirilmektedir (Güngör ve ark., 2022).



Şekil 5. LAVA™ C.O.S (3M ESPE, ABD) görüntüsü

CAD/CAM SİSTEMLERİNDE GEÇİCİ RESTORASYONLARIN ÜRETİM SÜRECİ

1. Dijital Ölçü Alma (İntraoral Tarama)

CAD/CAM sistemleri kullanılarak geçici restorasyon üretiminde ilk adımı dijital ölçü alma süreci oluşturur. Bu aşamada, ağız içi tarayıcılar (intraoral scanner) yardımıyla dişler ve çevre yumuşak dokular üç boyutlu olarak dijital ortama aktarılır. Dijital tarama yöntemi, geleneksel ölçü alma tekniklerine kıyasla daha konforlu bir uygulama sunarken, ölçü materyallerinde oluşabilecek deformasyon ya da boyutsal değişim gibi hataların da önüne geçmektedir (Miyazaki & Hotta, 2011). Tarama işlemi sırasında cihazlar optik ya da lazer temelli teknolojiler kullanarak görüntü elde eder ve oluşturulan veriler genellikle

STL, PLY veya OBJ dosya formatlarında CAD yazılımına aktarılır (Rekow & Thompson, 2007).

2. Tasarım (CAD — Computer Aided Design)

Tarama işlemiyle elde edilen veriler CAD yazılımına aktarıldıktan sonra restorasyonun dijital tasarım süreci başlar. Bu aşamada yazılım, restorasyonun anatomik formu ile oklüzal ve proksimal ilişkilerini otomatik olarak önerebilmekte; klinisyen ise bu tasarımı estetik ve fonksiyonel gereksinimlere göre düzenleyebilmektedir (Mounajjed, Layton & Azar, 2016). Geçici restorasyonlar, tek kronlardan çok üyeli köprü restorasyonlarına kadar farklı klinik ihtiyaçlara uygun biçimde tasarlanabilmektedir.

CAD yazılımları, tasarım sürecinde çeşitli klinik parametrelerin kontrol edilmesine de olanak tanır. Bunlar arasında marjinal uyum ve siman aralığının ayarlanması, oklüzal temas noktalarının düzenlenmesi ve proksimal kontakların belirlenmesi yer almaktadır.

Bu aşama, üretim sürecinde elde edilecek restorasyonun uyumu ve başarısını doğrudan etkilediği için CAD/CAM iş akışının en kritik basamaklarından biri olarak kabul edilmektedir (Rekow & Thompson, 2007).

. Üretim (CAM — Computer Aided Manufacturing)

CAD aşamasında tamamlanan dijital tasarım, üretimin gerçekleştirildiği CAM birimine aktarılır ve bu aşamada geçici restorasyonun fiziksel üretimi gerçekleştirilir. Üretim süreci temel olarak iki farklı yöntemle uygulanabilmektedir:

- **Frezeleme (Kazıma, eksiltmeli üretim):** Bu yöntemde, endüstriyel koşullarda polimerize edilmiş geçici restorasyon blokları (örneğin PMMA) frezeleme (kazıma, eksiltmeli üretim) cihazları kullanılarak aşındırılır ve restorasyon formu elde edilir.
- **3D baskı (Eklemeli üretim):** Bu yöntemde ise ışıqla polimerize olan reçine bazlı materyaller kullanılarak restorasyon, katmanlar halinde oluşturulur.

frezeleme (kazıma, eksiltmeli üretim) yöntemi, boyutsal stabilite ve yüksek marjinal uyum açısından avantaj sağlarken (Gao ve ark., 2020), 3D baskı yöntemi materyal kaybının daha az olması ve aynı anda birden fazla restorasyon üretimine olanak tanınması gibi avantajlar sunmaktadır (Alharbi, Osman & Wismeijer, 2016).

Üretim işlemi tamamlandıktan sonra restorasyonun yüzeyi düzeltilir ve cilalanır. Ardından klinik ortamda prova edilerek marjinal uyum, oklüzal

temaslar ve estetik uyum değerlendirilir. Gerekli düzenlemeler yapıldıktan sonra restorasyon geçici siman kullanılarak ağıza yerleştirilir.

GEÇİCİ RESTORASYONLARIN TANIMI VE ÖNEMİ

Geçici restorasyonlar, daimi protezlerin hazırlanma sürecinde dişlerin korunması, estetik görünümün sürdürülmesi, fonksiyonun devam ettirilmesi ve periodontal dokuların sağlığının korunması amacıyla uygulanan geçici protetik restorasyonlardır. Bu restorasyonların yalnızca kısa süreli çözümler olarak değerlendirilmemesi önemlidir; çünkü diş preparasyonu sonrasında açığa çıkan mine ve dentin dokularını dış etkenlerden koruyarak pulpal hassasiyetin önlenmesine katkı sağlar, çiğneme fonksiyonunun sürdürülmesine yardımcı olur ve hastanın estetik beklentilerini geçici olarak karşılar (Kaya & Eğilmez, 2025).

Ayrıca geçici restorasyonlar, daimi protezlerin marjinal uyumu, oklüzal ilişkileri ve estetik sonuçlarının klinik olarak değerlendirilebilmesine olanak tanıyan biyomekanik bir “simülasyon modeli” işlevi görmektedir. Bu nedenle klinik başarının sağlanmasında, kullanılan geçici restorasyonların hem yeterli mekanik dayanıklılığa sahip olması hem de biyolojik dokularla uyumlu olması büyük önem taşımaktadır (Huettig et al., 2016).

Yumuşak Doku Şekillendirmenin Protetik Başarıya Etkisi

Protetik tedavilerde estetik ve fonksiyonel başarının sürdürülebilir olmasında yumuşak dokunun doğru biçimde şekillendirilmesi kritik bir rol oynar. Uygun biçimde yönlendirilen yumuşak doku, restorasyon çevresinde doğal bir çıkış profili oluşmasını sağlar, gingival konturun düzenlenmesine katkıda bulunur ve plak retansiyonunu azaltarak periodontal sağlığın korunmasına yardımcı olur. Özellikle anterior bölgede, doğal diş görünümünün sağlanmasında yumuşak doku formunun belirleyici olduğu bilinmektedir.

İyi biçimde şekillendirilmiş yumuşak dokular, interdental papilla kaybını önlemeye yardımcı olur, gingival çekilme riskini azaltır ve protezin ağız içindeki görünümünün doğal dişlerle uyumlu olmasını sağlar. Bu nedenle yumuşak doku yönetimi, yalnızca estetik bir gereklilik değil, aynı zamanda uzun dönem klinik başarının önemli bir parçasıdır.

Özelleştirilmiş Geçici Restorasyonlarla Doku Şekillendirme

Hastaya özgü olarak tasarlanan geçici kronlar kullanılarak ideal estetik ve biyolojik konturlar oluşturulabilmektedir. Bu yöntem, yumuşak dokunun nihai restorasyona uygun biçimde yönlendirilmesine olanak tanıırken, kalıcı protez aşamasında doku formunun bire bir aktarılmasını da mümkün kılar (Gomez-Meda ve ark., 2020; Chauhan ve ark., 2025).

İmplant Destekli Geçici Restorasyonlarla Doku Şekillendirme

İmplant üstü geçici restorasyonlar, peri-implant yumuşak dokunun çıkış profilinin belirlenmesinde önemli bir rol oynar. Bu geçici restorasyonlar sayesinde papilla oluşumu desteklenebilir ve peri-implant mukozanın stabilitesi optimize edilebilir. Böylece hem estetik hem de biyolojik açıdan daha başarılı uzun dönem sonuçlar elde edilebilmektedir (Linkevicius & Apse, 2008; Berglundh ve ark., 1991).

GEÇİCİ RESTORATİF MATERYALLERİN SINIFLANDIRILMASI

Geçici restorasyonlarda kullanılan materyaller, kimyasal içerikleri, polimerizasyon yöntemleri ve üretim tekniklerine göre farklı gruplar altında sınıflandırılmaktadır. Genel olarak bu materyaller üç ana başlık altında incelenebilir:

1. Akrilik Esaslı Materyaller

Bu grup, geçici restorasyonlarda uzun süredir kullanılan klasik materyalleri içermektedir.

- **Polimetil metakrilat (PMMA):** Yüksek estetik özelliklere sahip olması, biyouyumluluğu ve kolay işlenebilirliği nedeniyle yaygın biçimde tercih edilmektedir.
- **Polietil metakrilat (PEMA):** Polimerizasyon sırasında daha düşük ısı açığa çıkarması avantaj sağlarken, mekanik dayanıklılığı PMMA'ya göre daha sınırlı kalmaktadır, bu nedenle geçici kron yapımında kullanılmamaktadır.

2. Kompozit Esaslı Materyaller

Bu grupta yer alan materyaller, özellikle kısa süreli geçici restorasyonlarda tercih edilmektedir.

- **Bis-akril kompozit reçineler:** İyi renk stabilitesi ve yüksek kırılma direnci sunmaları nedeniyle klinik uygulamalarda sıkça kullanılmaktadır.

3. Modern Rezin Esaslı Sistemler

Güncel materyal geliştirme çalışmalarıyla ortaya çıkan bu sistemler, geliştirilmiş mekanik özellikleriyle dikkat çekmektedir.

- **UDMA (poliüretan dimetakrilat) ve polivinil metakrilat içeren hibrit sistemler,** daha yüksek esneklik ve dayanıklılık sunmaları nedeniyle gelişmiş geçici restorasyon materyalleri arasında değerlendirilmektedir (Burns ve ark., 2003; Kaya & Eğilmez, 2025).

CAD/CAM SİSTEMLERİNDE KULLANILAN GEÇİCİ RESTORASYON MATERYALLERİ

CAD/CAM teknolojilerinin gelişmesiyle birlikte diş hekimliğinde kullanılan geçici restorasyon materyalleri, hem mekanik dayanıklılık hem de optik özellikler açısından önemli ilerlemeler göstermiştir. Geleneksel akrilik esaslı materyallerin yerini, dijital üretim süreçlerine uyumlu ve endüstriyel koşullarda polimerize edilmiş PMMA (polimetil metakrilat), PEEK (polieter-eter-keton), bis-akril kompozitler ve 3D baskı reçineleri gibi daha gelişmiş materyaller almaya başlamıştır (Kaya & Eğilmez, 2025).

Bu materyaller; mekanik dayanım, biyouyumluluk, renk stabilitesi ve üretim tekniklerine uyum açısından birbirinden farklı performans özellikleri sergilemektedir. Dijital diş hekimliğinde CAD/CAM iş akışlarının yaygınlaşmasıyla birlikte, geçici restorasyonların üretiminde özellikle endüstriyel olarak polimerize edilmiş yüksek yoğunluklu reçine bloklar tercih edilmeye başlanmıştır. Bu grupta en sık kullanılan materyal ise polimetil metakrilat (PMMA) temelli bloklardır (Kaya & Eğilmez, 2025).

PMMA (Polimetil Metakrilat)

PMMA bloklar, diş hekimliğinde geçici restorasyon üretiminde en sık tercih edilen materyaller arasında yer almaktadır (Anusavice ve ark., 2013; Rosenstiel ve ark., 2016). Polimetil metakrilat esaslı bu bloklar, endüstriyel koşullarda yüksek basınç altında polimerize edilerek üretildikleri için geleneksel akrilik materyallere kıyasla daha iyi mekanik özellikler ve dayanıklılık göstermektedir (Anusavice ve ark., 2013).

PMMA, düşük yoğunluğu, biyouyumluluğu, estetik görünümü ve kolay işlenebilirliği sayesinde geçici restorasyon üretiminde yaygın biçimde kullanılmaktadır. CAD/CAM teknolojileri ile üretilen PMMA blokları, geleneksel toz-sıvı sistemlerine kıyasla daha yüksek polimerizasyon derecesi, daha homojen mikroyapı, daha düşük artık monomer içeriği ve daha iyi renk stabilitesi sunmaktadır (Al-Dwairi ve ark., 2020). Bu gelişmiş materyal özellikleri, CAD/CAM yöntemiyle üretilen PMMA restorasyonların kırılma direncini ve yüzey sertliğini artırarak uzun süreli boyutsal stabilite sağlamasına katkıda bulunmaktadır (Perea-Lowery ve ark., 2020).

PMMA'nın mekanik ve optik performansını geliştirmek amacıyla çeşitli katkı maddeleri de kullanılmaktadır. Örneğin, %3–5 oranında eklenen zirkonya nanoparçacıkları bükülme dayanımı ve kırılma tokluğunu artırmaktadır (Zidan ve ark., 2019). Benzer şekilde, grafen oksit ilavesi materyalin mekanik yorgunluk direncini ve elastisite modülünü iyileştirebilmektedir (Selva-Otaolaurruchi ve ark., 2023). Ayrıca çok katmanlı PMMA blokları, restorasyonda daha doğal bir

renk geçişi sağlarken, mekanik dayanım açısından tek katmanlı yapılara göre daha düşük performans gösterebilmektedir (Ciocan ve ark., 2021).

CAD/CAM sistemleriyle uyumlu olan PMMA bloklar, piyasadaki en ekonomik blok seçenekleri arasında yer almakta ve kolay frezelenebilmeleri ile üretim süresini kısaltmaktadır. Ayrıca frezeleme (kazıma, eksiltmeli üretim) sonrasında yüksek yüzey parlaklığı elde edilebilmesi, klinik kullanım açısından önemli bir avantaj sağlamaktadır (Güth ve ark., 2016; Spitznagel ve ark., 2018). Bu özellikleri nedeniyle kısa ve orta süreli geçici restorasyon uygulamalarında kliniklerde en yaygın kullanılan materyaller arasında bulunmaktadır (Rosenstiel ve ark., 2016; Spitznagel ve ark., 2018).

Bununla birlikte, kompozit esaslı materyaller ve PEEK gibi alternatiflerle karşılaştırıldığında PMMA'nın mekanik dayanımının daha düşük olduğu bildirilmektedir (Güth ve ark., 2016; Stawarczyk ve ark., 2012). Ayrıca materyalin zamanla su emilimine uğraması, uzun süreli kullanımda renk stabilitesinde azalmaya yol açabilmektedir (Anusavice ve ark., 2013; Spitznagel ve ark., 2018).

PMMA bloklar günümüzde tek kron geçici restorasyonlar, köprü geçicileri, implant üstü geçici restorasyonlar ve uzun süreli provisional restorasyonların üretiminde yaygın biçimde kullanılmaktadır (Rosenstiel ve ark., 2016; Stawarczyk ve ark., 2012).

KOMPOZİT REÇİNE CAD/CAM BLOKLAR

Bazı klinik durumlarda, özellikle daha dayanıklı ya da uzun süre kullanılacak geçici restorasyon gereksinimlerinde kompozit reçine içerikli CAD/CAM bloklar tercih edilmektedir (Spitznagel ve ark., 2018; Güth ve ark., 2016). Kompozit esaslı CAD/CAM blokların, PMMA bloklara kıyasla daha yüksek mekanik dayanım gösterdiği bildirilmektedir (Stawarczyk ve ark., 2012; Güth ve ark., 2016).

Bu materyaller, aşınma direnci bakımından da PMMA'ya göre daha iyi performans sergileyerek fonksiyon sırasında yüzey stabilitesini daha uzun süre koruyabilmektedir (Anusavice ve ark., 2013; Spitznagel ve ark., 2018). Ayrıca kompozit içerikli bloklar, daha iyi yüzey kalitesi ve cilalanabilirlik sunarak özellikle estetik beklentinin yüksek olduğu geçici restorasyonlarda avantaj sağlamaktadır (Rosenstiel ve ark., 2016). Bu özellikler nedeniyle kompozit CAD/CAM bloklar, uzun süreli geçici restorasyon uygulamalarında sıklıkla tercih edilmektedir (Spitznagel ve ark., 2018).

Kompozit reçine bloklar günümüzde uzun süreli geçici restorasyonlarda, implant vakalarında kullanılan geçici protezlerde ve fonksiyon ile estetiğin

değerlendirilmesine yönelik test restorasyonlarının hazırlanmasında yaygın biçimde kullanılmaktadır (Rosenstiel ve ark., 2016; Güth ve ark., 2016).

PEEK / YÜKSEK POLİMER BLOKLAR

PEEK ve benzeri yüksek performanslı polimer bloklar, CAD/CAM sistemlerinde özellikle yüksek mekanik dayanım gerektiren restorasyonların üretiminde tercih edilen materyaller arasında yer almaktadır (Stawarczyk ve ark., 2012; Spitznagel ve ark., 2018). Bu materyaller, yüksek mekanik direnç ve biyouyumluluk özellikleri sayesinde özellikle implant üstü uzun süreli geçici restorasyonlar ve altyapı uygulamaları için uygun seçenekler sunmaktadır (Rosenstiel ve ark., 2016; Güth ve ark., 2016).

PEEK materyaller, düşük su emilimi ve buna bağlı olarak renk değişimine karşı yüksek direnç göstermeleri sayesinde uzun süreli klinik kullanımda materyal stabilitesini koruyabilmektedir (Anusavice ve ark., 2013). Bununla birlikte, estetik özellikler açısından değerlendirildiğinde, PEEK materyallerin kompozit reçine ve PMMA esaslı materyallere kıyasla daha sınırlı seçenekler sunduğu bildirilmektedir (Spitznagel ve ark., 2018).

Ayrıca, PEEK blokların frezelenmesi diğer polimer esaslı bloklara göre daha zor olup, materyal maliyetinin de daha yüksek olması klinik kullanım açısından bazı sınırlılıklar oluşturmaktadır (Stawarczyk ve ark., 2012; Güth ve ark., 2016).

3D BASKI REÇİNELERİ (EKLEMELİ ÜRETİM)

Yeni nesil geçici restorasyon materyalleri arasında yer alan bu sistemler, üretim süreçlerinin daha pratik olması ve maliyet açısından avantaj sağlamaları nedeniyle giderek daha fazla tercih edilmektedir. Bununla birlikte, mekanik dayanım açısından değerlendirildiğinde frezelenerek üretilen PMMA restorasyonlara kıyasla daha düşük direnç gösterebildikleri bildirilmektedir (Jain ve ark., 2022).

CAD/CAM GEÇİCİ MATERYALLERİN OPTİK VE MEKANİK ÖZELLİKLERİ

Mekanik Özellikler:

Frezelenerek üretilen PMMA restorasyonların, geleneksel akrilik materyallere kıyasla daha yüksek eğilme dayanımı, yüzey sertliği ve kırılma direnci sergilediği bildirilmektedir (Wechkunanukul ve ark., 2024). Ayrıca materyal yapısına eklenen zirkonya katkıları ve endüstriyel üretim sürecinin sağladığı homojen mikroyapı, restorasyon içerisinde mikro çatlak oluşma riskini azaltarak mekanik dayanımın artmasına katkı sağlamaktadır (Zidan ve ark., 2019).

Optik Özellikler:

CAD/CAM yöntemiyle üretilen PMMA materyalleri, yüksek translusens ve düşük opalesans özellikleri sayesinde doğal diş görünümüne oldukça yakın estetik sonuçlar sunabilmektedir. Ayrıca bu materyallerin renk stabilitesi yüksek olup, kahve, çay ve şarap gibi renklendirici ajanlara karşı da önemli ölçüde direnç gösterdiği bildirilmektedir (Alp ve ark., 2019).

Eğilme ve Kırılma Dayanımı:

- **PMMA:** CAD/CAM yöntemiyle üretilen PMMA materyalleri, geleneksel akriliklere kıyasla daha homojen bir polimer yapıya sahip olduğundan eğilme dayanımı genellikle **120–150 MPa** aralığında bildirilmektedir (Al-Dwairi ve ark., 2020).
- **PEEK:** Yaklaşık **180–200 MPa** eğilme dayanımıyla, CAD/CAM ile kullanılan geçici restorasyon materyalleri arasında en yüksek mekanik dayanım değerlerine sahip materyallerden biridir (Papathanasiou ve ark., 2020).
- **Bis-akril materyaller:** Eğilme dayanımı genellikle **80–120 MPa** aralığında olup, kırılma direncinin PMMA materyallere kıyasla daha düşük olduğu bildirilmektedir (Haselton ve ark., 2002).
- **3D baskı reçineleri:** Ortalama eğilme dayanımı **70–100 MPa** arasında değişmektedir. Katmanlı üretim yapısı nedeniyle mikroçatlak oluşumuna daha yatkın oldukları bildirilmektedir (Jain ve ark., 2022).

Sertlik (Vickers / Shore):

- **PEEK:** CAD/CAM materyalleri arasında en yüksek yüzey sertliği değerlerine sahip materyallerden biri olarak kabul edilmektedir.
- **PMMA:** CAD/CAM üretim sürecinde endüstriyel olarak polimerize edilmesi sayesinde geleneksel akrilik materyallere kıyasla daha yüksek yüzey sertliği göstermektedir (Perea-Lowery ve ark., 2020).
- **3D baskı reçineleri:** Katmanlı üretim süreci nedeniyle katman sınırlarında daha düşük yoğunluklu ve nispeten daha yumuşak bölgeler oluşabilmektedir.

Renk stabilitesi ve translusens özellikler açısından değerlendirildiğinde:

- **PMMA:** Homojen polimer yapısı sayesinde renk stabilitesi en yüksek materyaller arasında yer almakta ve kahve, çay gibi boyayıcı ajanlara karşı yüksek direnç göstermektedir (Alp ve ark., 2019).

- **Çok katmanlı PMMA:** Katmanlar arası renk geçişleri sayesinde doğal diş görünümüne en yakın translusens etkiyi sağlayabilmektedir.
- **Bis-akril materyaller:** Başlangıçta iyi renk stabilitesi sunmasına rağmen, uzun süreli kullanımlarda sararma görülebilmektedir.
- **3D baskı reçineleri:** Fotopolimer yapıdaki materyallerin oksidatif bozulmaya yatkın olması nedeniyle zamanla renk değişimi görülme olasılığı daha yüksektir.
- **Frezelenmiş PMMA:** CAD/CAM yöntemiyle frezelenerek üretilen PMMA restorasyonlar, materyalin homojen yapısı sayesinde en düşük yüzey pürüzlülüğü değerlerini göstermekte ve yüksek yüzey parlaklığı sağlayabilmektedir.
- **3D baskı reçineleri:** Katmanlı üretim süreci nedeniyle yüzey düzgünlüğü daha düşük olup, klinik kullanım öncesinde genellikle ek polisaj işlemi gerektirmektedir (Wechkunanukul ve ark., 2024).

Biyouyumluluk ve Klinik Performans:

- **PMMA:** Artık monomer miktarının düşük olması sayesinde doku irritasyonu ve alerjik reaksiyon oluşma riski oldukça düşüktür.
- **PEEK:** Metal içermemesi ve kimyasal olarak inert yapısı nedeniyle en yüksek biyouyumluluk düzeyine sahip materyaller arasında yer almaktadır (Papathanasiou ve ark., 2020).
- **3D baskı reçineleri:** Fotopolimerizasyon sonrası yeterli kürlenme sağlanmadığında sitotoksik etki oluşturma riski bulunabilmektedir (Jain ve ark., 2022).

Klinik uygulamalarda PMMA ve PEEK materyallerinin uzun süreli geçici restorasyonlarda daha stabil sonuçlar sunduğu, buna karşılık 3D baskı reçinelerinin daha çok kısa süreli restorasyon uygulamalarında tercih edildiği bildirilmektedir.

Geçici restorasyonlar, klinik fonksiyonun sürdürülmesi ve estetik değerlendirme açısından daimi restorasyonların başarısında önemli bir rol oynamaktadır. CAD/CAM teknolojisiyle üretilen PMMA ve benzeri materyaller, geleneksel yöntemlerle hazırlanan restorasyonlara kıyasla daha yüksek mekanik dayanım, daha iyi optik stabilite ve üstün biyouyumluluk özellikleri sunmaktadır. Bununla birlikte, polimerizasyon büzülmesi ve uzun dönem yüzey aşınması gibi bazı materyal sınırlılıkları hâlen geliştirilmesi gereken alanlar arasında yer almaktadır (Kaya & Eğilmez, 2025).

CAD/CAM teknolojisinde kullanılan geçici restorasyon materyalleri, farklı klinik gereksinimlere cevap verecek şekilde çeşitlendirilmiştir:

- **PMMA**, estetik performans, renk stabilitesi ve kolay işlenebilirlik açısından en dengeli materyallerden biri olarak kabul edilmektedir.
- **PEEK**, yüksek mekanik dayanımı sayesinde uzun süreli geçici restorasyonlarda avantaj sağlarken, estetik özellikler bakımından daha sınırlı kalmaktadır.
- **Bis-akril reçineler**, kısa süreli ve yüksek estetik beklenti bulunan restorasyonlarda sıklıkla tercih edilmektedir.
- **3D baskı reçineleri**, hızlı ve ekonomik üretim imkânı sunmasına rağmen mekanik dayanım açısından daha sınırlı performans göstermektedir.

Gelecekte hibrit kompozit yapılar ile nano-doldurucu içeren PMMA varyantlarının geliştirilmesiyle bu materyallerin mekanik ve optik performanslarının daha da artırılacağı öngörülmektedir (Selva-Otaolauruchi ve ark., 2023).

CAD/CAM FREZELEME (KAZIMA, EKSİLTME Lİ ÜRETİM) VE 3D BASKI İLE ÜRETİLEN GEÇİCİ RESTORASYON MATERYALLERİ: ÜRÜN ÖRNEKLERİ, MALZEME ÖZELLİKLERİ VE KLİNİK ENDİKASYONLAR

1. PMMA CAD/CAM GEÇİCİ BLOKLAR:

1. Telio CAD (Ivoclar, Liechtenstein)
2. CAD-Temp (VITA Zahnfabrik, Almanya)
3. Temp Basic (Zirkonzahn, İtalya)
4. PMMA Blocks (Yamahachi Dental, Japonya)
5. PMMA Blocks (Aidite, Çin)
6. breCAM Temp (Bredent, Almanya)
7. PMMA Blocks (Huge Dental, Çin)

PMMA CAD/CAM bloklar, bilgisayar destekli tasarım ve üretim (CAD/CAM) sistemlerinde frezeleme (kazıma, eksiltmeli üretim) ile geçici restorasyonlar için kullanılan **endüstriyel olarak çapraz bağlı PMMA disk ve bloklardır**. Bu bloklar, ön işleme sırasında homojen polimerizasyon sayesinde düşük su emilimi, iyi renk stabilitesi ve pürüzsüz yüzey sağlarlar. Örnekler arasında Ivoclar **Telio® CAD**, VITA **CAD-Temp®**, Zirkonzahn **Temp Basic**,

Aidite PMMA bloklar, Bredent **breCAM PMMA** ve Huge Dental PMMA bloklar yer almaktadır. (Telio CAD üretici dokümanı; IvoBase CAD & Temp Basic referansı).

1.1 Telio CAD (Ivoclar, Liechtenstein)

Ivoclar Vivadent tarafından üretilen **Telio CAD** bloklar, çapraz bağlı polimetil metakrilat (PMMA) esaslıdır ve CAD/CAM sistemlerinde *tek dişten çok üniteye kadar* geçici restorasyonların frezelenmesi için tasarlanmıştır. Üretici teknik dokümanlarına göre bu bloklar **6 aya kadar uzun süreli geçici restorasyonlar** için endikedir ve endüstriyel üretim sayesinde yüksek yüzey homojenliği, hızlı cilalanabilirlik ve iyi renk stabilitesi sağlar.



Şekil 6. Telio CAD (Ivoclar, Liechtenstein) görseli

1.2 CAD-Temp (VITA Zahnfabrik, Almanya)

VITA CAD-Temp® blok ve diskler, VITA Zahnfabrik tarafından geliştirilen *yüksek çapraz bağlı akrilik polimer ve mikro-dolgulu* geçici restorasyon bloklarıdır. Üretici teknik dokümanına göre uzun süreli geçici köprü ve kron restorasyonları (genellikle **yaklaşık 1 yıla kadar**) için uygundur ve partikül takviyeli yapısıyla aşınma direnci ve renk stabilitesi sunar.

1.3 Temp Basic (Zirkonzahn, İtalya)

Zirkonzahn tarafından sunulan **Temp Basic** PMMA CAD/CAM bloklar, protetik literatürde güncel CAD/CAM geçici materyaller arasında gösterilmektedir. Bu bloklar standart PMMA özelliği taşır ve CAD/CAM frezeleme (kazıma, eksiltmeli üretim) ile geçici kron ve köprü restorasyonlarında kullanılmaktadır.

1.4 PMMA Blocks (Aidite, Çin)

Aidite PMMA Multilayer CAD/CAM bloklar, estetik geçici restorasyonlar için çok katmanlı PMMA yapısı ile üretilir ve incisalden servikale doğru doğal gölgelenme efektleri sağlar. Ürün kataloglarına göre iyi cilalanabilirlik, düşük su emilimi ve uzun süreli renk stabilitesi gibi özellikleri vardır.

1.5 BreCAM Temp (Bredent, Almanya)

Bredent'in **breCAM PMMA** blokları, tüm açık CAD/CAM sistemlerle uyumlu PMMA malzemedir. Üretici broşüründe belirtildiği üzere yüksek bükülme dayanımı, uzun süreli kron ve köprü geçicileri ile estetik gölgelendirme sunar ve 1-2 yıla kadar klinik kullanım süresi sağlayabilecek şekilde tasarlanmıştır.

1.6 PMMA Blocks (Huge Dental, Çin)

Huge Dental PMMA bloklar, CAD/CAM frezeleme (kazıma, eksiltmeli üretim) için çapraz bağlı PMMA diskler olarak sunulur ve dental geçici kron/köprü üretiminde kullanılır. Üretici teknik verilerine göre yüksek eğilme dayanımı, düşük su emilimi ve geniş boyut/seçenek skalası mevcuttur.



Şekil 7. Vita CAD-Temp MultiColor ve Ivoclar Telio CAD görseli

2. Yüksek Dayanımlı Polimer Bloklar (PEEK)

Yüksek performanslı polimerler arasında yer alan PEEK (Polietereterketon) esaslı CAD/CAM bloklar, yüksek mekanik dayanım gerektiren protetik restorasyonlarda kullanılan gelişmiş materyaller arasındadır (Stawarczyk ve ark., 2012; Schwitalla ve Müller, 2013).

Bu grupta klinik kullanımda yaygın olarak **BBioHPP (Bredent, Almanya)** ve **PEEK (Zirkonzahn, İtalya)** blokları tercih edilmektedir.

2.1 BioHPP (Bredent, Almanya)

BioHPP, PEEK esaslı ve seramik mikro doldurucular ile güçlendirilmiş yüksek performanslı bir polimer olup çok yüksek mekanik dayanım göstermektedir (Schwitalla ve Müller, 2013).

Materyal, düşük yoğunluğu sayesinde hafif bir yapı sunarken kemik elastikiyetine yakın elastik modülü sayesinde çiğneme kuvvetlerinin dengeli biçimde iletilmesine katkı sağlar (Stawarczyk ve ark., 2012).

Bu nedenle özellikle implant üstü alt yapı restorasyonlarında ve uzun süreli protetik çözümlerde tercih edilmektedir (Schwitalla ve Müller, 2013).

2.2 PEEK (Zirkonzahn, İtalya)

Zirkonzahn tarafından geliştirilen PEEK esaslı CAD/CAM bloklar, yüksek mekanik dayanım gerektiren protetik restorasyonlarda kullanılan yüksek performanslı polimer materyaller arasında yer almaktadır (Stawarczyk ve ark., 2012; Schwitalla ve Müller, 2013).

Materyal, yüksek mekanik direncinin yanı sıra kemik elastikiyetine yakın elastik modülü sayesinde oklüzal kuvvetlerin daha dengeli biçimde iletilmesine katkı sağlayabilmektedir (Stawarczyk ve ark., 2012).

Bu özellikleri sayesinde özellikle implant üstü restorasyon altyapılarında ve uzun süreli protetik rehabilitasyonlarda tercih edilmektedir (Schwitalla ve Müller, 2013).

Klinik Avantaj

PEEK ve BioHPP altyapılar, uzun süreli implant restorasyonlarında stres absorbe edici özellikleri sayesinde kırık ve materyal yorgunluğu riskinin azaltılmasına yardımcı olabilmektedir (Stawarczyk ve ark., 2012).

3. Kompozit Reçine CAD/CAM Bloklar

Kompozit reçine esaslı CAD/CAM bloklar, seramik doldurucular içeren yüksek performanslı resin matriks yapıları sayesinde hem kalıcı restorasyonlarda hem de uzun süreli geçici restorasyon uygulamalarında kullanılabilir. Bu materyal grubunda yer alan başlıca örnekler arasında Lava Ultimate (3M, ABD), Cerasmart (GC, Japonya), Block HC (Shofu, Japonya) ve Katana Avencia (Kuraray, Japonya) gibi CAD/CAM blok sistemleri bulunmaktadır (Awada & Nathanson, 2015; Spitznagel ve ark., 2018).

Rezin-matris hibrit blok materyallerin temel avantajı, çiğneme kuvvetlerini kısmen absorbe ederek restorasyon ve karşıt diş üzerindeki stres yoğunlaşmasını azaltabilmeleridir (Spitznagel ve ark., 2018). Bu nedenle aşağıdaki klinik durumlarda tercih edilebilmektedir:

- Oklüzal ilişkinin uzun süre değerlendirilmesi gereken vakalar
- Bruxism şüphesi olan hastalarda geçici restorasyonlar
- İmplant üstü geçici restorasyonlar
- Minimal invaziv indirekt restorasyonlar
- İnley ve onley restorasyonlar (Awada ve Nathanson, 2015).

3.1 Cerasmart (GC, Japonya)

GC firması tarafından geliştirilen Cerasmart materyali, esas olarak kalıcı restorasyonlar için üretilmiş olmakla birlikte, birçok klinik uygulamada uzun süreli geçici restorasyonların hazırlanmasında da kullanılmaktadır (Awada ve Nathanson, 2015). Materyal, kompozit reçine matriksi içerisinde homojen biçimde dağıtılmış nano-seramik doldurucular içeren hibrit bir yapı sunmaktadır (Spitznagel ve ark., 2018).

Bu hibrit yapı sayesinde Cerasmart, yüksek aşınma direnci göstererek fonksiyon sırasında yüzey bütünlüğünü uzun süre koruyabilmektedir (Awada ve Nathanson, 2015). Ayrıca materyalin kırılmaya karşı dirençli olması ve elastik özellikleri sayesinde çiğneme kuvvetleri altında stres absorbe edici bir davranış sergileyebildiği bildirilmektedir (Spitznagel ve ark., 2018).

Yüksek estetik kalite sunması ve doğal diş dokusuna yakın yüzey özellikleri göstermesi, materyalin hem anterior hem de posterior bölgelerde kullanılabilmesine olanak sağlamaktadır (Awada ve Nathanson, 2015). Bunun yanı sıra kolay cilalanabilir yapısı, klinik uygulamalarda işlem süresinin kısılmasına katkıda bulunarak önemli bir pratik avantaj sunmaktadır (Spitznagel ve ark., 2018).

Klinik Avantaj

Bu özellikleri sayesinde Cerasmart materyali, özellikle fonksiyon ve oklüzal ilişkilerin uzun süreli değerlendirilmesi gereken klinik vakalarda geçici restorasyonların hazırlanmasında sıklıkla tercih edilmektedir (Awada ve Nathanson, 2015).



Şekil 8. Cerasmart (GC, Japonya) görseli

3.2 Lava Ultimate (3M, ABD)

Lava Ultimate, 3M firması tarafından geliştirilen ve CAD/CAM sistemleriyle kullanılan reçine nano-seramik (RNC) yapıda bir restoratif blok materyalidir. Materyal, reçine matriks içerisinde homojen biçimde dağılmış yüksek oranda nano-seramik doldurucular içermektedir (Awada ve Nathanson, 2015).

Bu kompozit yapı sayesinde materyal, geleneksel cam seramiklere kıyasla daha elastik bir davranış sergileyerek oklüzal yükler altında stres absorbe edici özellik gösterebilmektedir (Spitznagel ve ark., 2018). Ayrıca yüzey parlaklığını uzun süre koruyabilmesi ve karşıt dişte daha düşük aşındırıcı etki göstermesi klinik açıdan avantaj olarak bildirilmektedir (Awada ve Nathanson, 2015).

Materyalin işlenebilirliğinin yüksek olması ve frezeleme (kazıma, eksiltmeli üretim) işlemi sonrası minimal yüzey işlemi gerektirmesi klinik uygulamalarda zaman tasarrufu sağlamaktadır (Spitznagel ve ark., 2018). Ancak klinik gözlemler sonucunda özellikle tam kuron restorasyonlarında adeziv bağlantı başarısının sınırlı olabileceği bildirilmiş ve bu nedenle materyalin daha çok inley, onley ve veneer restorasyonlarında tercih edilmesi önerilmektedir (Awada ve Nathanson, 2015).

3.3 Block HC (Shofu, Japonya)

Shofu tarafından geliştirilen Block HC materyali, reçine matriks içerisinde yüksek oranda seramik dolgu partikülleri içeren hibrit CAD/CAM blok materyalidir (Spitznagel ve ark., 2018). Materyal, seramik içerikli kompozit yapısı sayesinde hem dayanıklılık hem de elastikiyet özelliklerini birlikte sunmayı amaçlamaktadır (Awada ve Nathanson, 2015).

Block HC'nin oklüzal yükler altında stres absorbe edebilmesi ve karşıt dişte daha düşük aşınmaya neden olması klinik açıdan avantaj sağlayan özellikler arasında yer almaktadır (Spitznagel ve ark., 2018). Ayrıca frezeleme (kazıma, eksiltmeli üretim) sırasında kolay işlenebilmesi ve yüzey polisajının hızlı şekilde yapılabilmesi klinik süreçleri kolaylaştırmaktadır (Awada ve Nathanson, 2015).

Materyal, anterior ve posterior bölgelerde inley, onley, veneer ve kuron restorasyonlarının hazırlanmasında kullanılabilmekte olup, fonksiyonel yüklerin orta düzeyde olduğu vakalarda başarılı sonuçlar sunmaktadır (Spitznagel ve ark., 2018).

3.4 Katana Avencia (Kuraray, Japonya)

Kuraray firması tarafından geliştirilen Katana Avencia blokları, yüksek yoğunlukta seramik dolgu partiküllerinin reçine matriks içerisine entegre edilmesiyle elde edilen hibrit seramik yapıda CAD/CAM materyalleridir (Awada ve Nathanson, 2015).

Bu üretim teknolojisi sayesinde materyal, yüksek mekanik dayanım ile birlikte elastik özellikler sergileyerek çiğneme kuvvetleri altında stres dağılımını destekleyebilmektedir (Spitznagel ve ark., 2018). Ayrıca materyalin yüzey parlaklığını uzun süre koruyabilmesi ve cilalanabilirliğinin yüksek olması estetik restorasyonlarda tercih edilmesine katkı sağlamaktadır (Awada ve Nathanson, 2015).

Katana Avencia materyali, özellikle posterior bölgelerde fonksiyonel yüklerin yoğun olduğu durumlarda kullanılabilmekte ve hem estetik hem de mekanik performansı birlikte sunması nedeniyle klinikte giderek daha fazla tercih edilmektedir (Spitznagel ve ark., 2018).

Özellik	Lava Ultimate	Cerasmart	Block HC	Katana Avencia
Materyal tipi	Rezin nano-seramik	Hibrit seramik	Hibrit seramik	Hibrit seramik
Elastik davranış	Yüksek	Yüksek	Orta-yüksek	Yüksek
Aşınma direnci	Yüksek	Yüksek	Orta-yüksek	Yüksek
Polisajlanabilirlik	Çok iyi	Çok iyi	İyi	Çok iyi
Karşıt diş aşındırıcılığı	Düşük	Düşük	Düşük	Düşük
frezeleme (kazıma, eksiltmeli üretim) kolaylığı	Yüksek	Yüksek	Çok yüksek	Yüksek
Estetik performans	Yüksek	Yüksek	Orta-yüksek	Yüksek
Posterior kullanım	Sınırlı önerilir	Uygun	Uygun	Uygun
Uzun süreli geçici restorasyon	Uygun	Çok uygun	Uygun	Uygun

Tablo 1. Kompozit Reçine CAD/CAM Blokların Karşılaştırmalı materyal özellikleri

3D Baskı Reçineleri

1. Temporary CB Resin (Formlabs, ABD)

Formlabs tarafından geliştirilen Temporary CB Resin, SLA/LCD teknolojisiyle çalışan üç boyutlu yazıcılarda kullanılmak üzere üretilmiş, dış renginde bir crown & bridge (C&B) reçinesidir ve hem tek kron hem de çok üyeli geçici köprü restorasyonlarının üretiminde kullanılabilir (Formlabs, 2023).

Üretici tarafından sunulan teknik dokümanlarda, materyalin belirli sayıda üniteye kadar olan çok üyeli geçici köprülerin üretimine uygun olduğu, restorasyonlarda iyi bir marjinal adaptasyon sağladığı ve klinik kullanım için yeterli estetik ve mekanik performans sunduğu belirtilmektedir (Formlabs, 2023).

Ayrıca baskı sonrasında gerçekleştirilen yıkama ve post-cure işlemlerinin doğru şekilde uygulanmasının ve yazıcı parametrelerinin uygun biçimde ayarlanmasının, restorasyonların mekanik dayanımı ile renk stabilitesi üzerinde belirleyici olduğu vurgulanmaktadır (Revilla-León ve Özcan, 2019; Formlabs, 2023).

2. NextDent C&B MFH (NextDent / 3D Systems, Hollanda / ABD)

NextDent firması tarafından geliştirilen NextDent C&B MFH, mikro doldurucu partiküllerle güçlendirilmiş hibrit yapıya sahip bir 3D baskı reçinesi olup geçici kron ve köprü restorasyonlarının üretiminde kullanılmaktadır (NextDent, 2022).

Materyal yapısında bulunan doldurucu partiküller sayesinde aşınma direnci artırılmakta ve restorasyonlarda opaklık ile translusens özellikleri arasında dengeli bir optik görünüm elde edilebilmektedir (Revilla-León ve Özcan, 2019).

Bu reçine, uzun süreli geçici restorasyon uygulamaları için geliştirilmiş olup dental kullanım amacıyla Class IIa tıbbi cihaz sertifikasına sahip materyaller arasında yer almaktadır (NextDent, 2022).

3. PowerResins TEMP (PowerResins, ABD)

PowerResins tarafından geliştirilen TEMP reçinesi, SLA ve DLP teknolojisiyle çalışan dental üç boyutlu yazıcı sistemlerinde kullanılmak üzere üretilmiş, geçici kron ve köprü restorasyonlarının üretimine yönelik kompozit esaslı bir fotopolimer materyaldir. Materyal, tek kronların yanı sıra çok üyeli geçici köprü restorasyonlarının üretimine de olanak sağlayacak mekanik özellikler sunmaktadır (PowerResins, 2023).

Üretici tarafından sağlanan teknik bilgilerde, materyalin yüksek fleksural dayanım ve aşınma direnci sergileyerek ağız içi fonksiyonel yükler altında yeterli

klirik performans sağladığı bildirilmektedir. Ayrıca reğinenin leke oluşumuna karşı dirençli olduğu ve uzun süreli geçici restorasyonlarda estetik görünümin korunmasına katkı sağladığı belirtilmektedir (PowerResins, 2023).

PowerResins TEMP reğinesinin farklı VITA renk tonlarına uyumlu seğeneklerle sunulması, restorasyonların doğal diş dokusuyla daha uyumlu estetik sonuçlar vermesine olanak sağlamaktadır. Bununla birlikte, baskı sonrası uygulanan yıkama ve post-cure işlemlerinin doğru şekilde gerçekleştirilmesi, restorasyonların yüzey kalitesi ve mekanik performansı üzerinde belirleyici rol oynamaktadır (Revilla-León ve Özcan, 2019; PowerResins, 2023).

Bu özellikleri sayesinde materyal, özellikle aynı gün üretilen geçici kron ve köprü restorasyonlarında klinik iş akışını hızlandıran güvenilir bir seçenek olarak değerlendirilmektedir (PowerResins, 2023).

4. Flexcera Smile Ultra+ (Desktop Health/EnvisionTEC, ABD)

Flexcera Smile Ultra+, Desktop Health tarafından geliştirilen ve nanoseramik katkıli hibrit yapıya sahip dental 3D baskı reçineleri arasında yer almaktadır. Materyal, hem uzun süreli geçici hem de belirli klinik koşullarda kalıcı restorasyonların üretiminde kullanılabilecek şekilde tasarlanmıştır (Desktop Health, 2023).

Materyalin yüksek kırılma direnci ve nem stabilitesi sayesinde, ağız içi koşullarda boyutsal stabilitesini koruyabildiği ve fonksiyonel yükler altında yeterli dayanım sunduğu bildirilmektedir. Bunun yanında materyalin yarı saydam yapısı ve cilalanabilir yüzey özellikleri, anterior ve posterior restorasyonlarda estetik sonuçların elde edilmesine katkıda bulunmaktadır (Desktop Health, 2023).

Flexcera reçineleri geniş renk seçenekleri ile doğal diş dokusuna uyum sağlayabilmekte ve baskı sonrası polisaj işlemleriyle yüksek yüzey parlaklığı elde edilebilmektedir. Doğru post-cure prosedürlerinin uygulanması, restorasyonların mekanik özellikleri ve uzun dönem renk stabilitesi açısından önem taşımaktadır (Revilla-León ve Özcan, 2019).

Bu özellikleri nedeniyle Flexcera Smile Ultra+, özellikle uzun süreli geçici restorasyon gereksinimi bulunan klinik vakalarda tercih edilen gelişmiş 3D baskı materyalleri arasında yer almaktadır (Desktop Health, 2023).

5. VITA VIONIC® DENT RESIN (VITA Zahnfabrik, Almanya)

VITA Zahnfabrik tarafından geliştirilen VITA VIONIC® DENT RESIN, dental 3D baskı teknolojilerinde kullanılan ve özellikle protez diş elemanları ile geçici kron ve köprü restorasyonlarının üretimine yönelik geliştirilmiş bir fotopolimer reğinedir (VITA Zahnfabrik, 2023).

Materyalin yüksek aşınma direnci ve boyutsal stabilite sunması, ağız içi kullanım sırasında restorasyonların fonksiyonel performansını desteklemektedir. Ayrıca VITA renk sistemi ile uyumlu olarak geliştirilmiş olması, restorasyonların doğal dişlerle estetik uyum sağlamasına katkıda bulunmaktadır (VITA Zahnfabrik, 2023).

Üretici verilerine göre materyal, baskı sonrası uygun yıkama ve post-cure işlemleriyle yüksek yüzey kalitesi ve renk stabilitesi sergilemekte olup, çok üyeli geçici restorasyonların üretiminde de kullanılabilir. Bu durum, dijital protez ve geçici restorasyon üretim süreçlerinde klinik ve laboratuvar iş akışını kolaylaştırmaktadır (Revilla-León ve Özcan, 2019).

Bu özellikleri sayesinde VITA VIONIC reçinesi, hem estetik beklentilerin hem de fonksiyonel gereksinimlerin bulunduğu geçici restorasyon uygulamalarında güvenilir bir materyal seçeneği olarak değerlendirilmektedir (VITA Zahnfabrik, 2023).



Şekil 9. Temporary CB Resin (Formlabs, ABD) ve NextDent C&B MFH (NextDent / 3D Systems, Hollanda / ABD) görseli

YÖNTEMLERİN KARŞILAŞTIRILMASI	
Frezeleme (Kazıma, eksiltmeli üretim)	3D baskı (Eklemeli üretim)
• Daha yüksek mekanik dayanım sağlar. • Uzun süreli geçici restorasyonlarda daha stabildir. • Yüksek oklüzal kuvvetlere daha dayanıklıdır. • Yüzey parlaklığı ve polisaj kalıcılığı daha iyidir • Tek parça monolitik üretim • Yüksek homojenlik • Hızlı polisaj	• Restorasyon iç yüzey kalitesinde avantaj. • Aynı anda çok sayıda restorasyon hızlı üretilebilir. • Materyal kaybı minimaldir ve daha ekonomiktir. • Kişiye özel üretim süreci daha kolaydır. • Klinik ve laboratuvar iş akışını hızlandırır.

Tablo 2. CAD/CAM bloklardan frezeleme (kazıma, eksiltmeli üretim) yöntemiyle üretilen geçici restorasyonların Reçinelerden 3D baskı yöntemi ile üretilen geçici restorasyonlar ile karşılaştırılması

SONUÇ

Ticari PMMA ve akrilat-mikrodolgu CAD/CAM bloklar, özellikle **Telio CAD** (Ivoclar) ve **VITA CAD-Temp** (VITA Zahnfabrik) gibi ürünler, frezeleme iş akışında uzun süreli geçici restorasyonların üretimi için güvenilir seçenekler sunmaktadır. Üretici teknik dokümanlarında bu materyallerin mekanik dayanım, yüzey homojenliği ve iyi parlatılabilirlik özellikleri vurgulanmaktadır.

Buna karşılık, **Formlabs Temporary CB Resin** ve **NextDent C&B MFH** gibi 3D baskı reçineleri, özellikle küçük üretim serileri ve karmaşık anatomik restorasyonların hazırlanmasında zaman ve üretim esnekliği açısından önemli avantajlar sağlamaktadır.

Klinik uygulamada hangi yöntemin tercih edileceği; kullanılan cihazların uyumluluğu, restorasyonun planlanan kullanım süresi, estetik beklenti düzeyi ve laboratuvar ile klinik iş akışı tercihlerine bağlı olarak belirlenmelidir.

CAD/CAM frezeleme (kazıma, eksiltmeli üretim) uygulamalarında **Telio CAD** ve **VITA CAD-Temp**, uygulama kolaylığı ve klinik kullanım geçmişi nedeniyle sektörde öne çıkan blok materyalleri arasında yer almaktadır.

3D baskı reçineleri arasında ise **Formlabs Temporary CB Resin** ve **NextDent C&B MFH**, uzun süreli geçici restorasyonların üretimi amacıyla kullanılan ve CE sertifikasyonuna sahip ticari materyaller arasında bulunmaktadır.

Klinik kullanım öncesinde, üretici tarafından sağlanan kullanım talimatlarının (IFU), yazıcı veya freze cihazı uyumluluk listelerinin ve baskı veya frezeleme (kazıma, eksiltmeli üretim) sonrası uygulanan post-processing parametrelerinin dikkatle takip edilmesi restorasyon başarısı açısından önem taşımaktadır.

Genel olarak değerlendirildiğinde CAD/CAM geçici restorasyon materyalleri, dijital diş hekimliğinde restoratif süreçleri hızlandırmış ve restorasyon kalitesinin daha öngörülebilir hale gelmesini sağlamıştır. PMMA ve PEEK gibi materyaller uzun dönem biyomekanik stabilite sunarken, bis-akril ve 3D baskı reçineleri daha çok kısa süreli klinik çözümler için tercih edilmektedir. Klinik gereksinime uygun materyalin seçilmesi, geçici restorasyonun fonksiyonel ve estetik başarısını doğrudan etkilemektedir.

KAYNAKÇA

1. Ahlholm, P., Sipilä, K., Vallittu, P., Jakonen, M., & Kotiranta, U. (2018). Digital versus conventional impressions in fixed prosthodontics: A review. *Journal of Prosthodontics*, 27(1), 35–41.
2. Al-Dwairi, Z. N., Tahboub, K. Y., Baba, N. Z., & Goodacre, C. J. (2020). A comparison of the flexural and impact strengths and flexural modulus of CAD/CAM and conventional heat-cured polymethyl methacrylate (PMMA). *Journal of Prosthodontics*, 29(4), 341–349.
3. Alp, G., Johnston, W. M., & Yilmaz, B. (2019). Optical properties and surface roughness of prepolymerized poly(methyl methacrylate) denture base materials. *Journal of Prosthetic Dentistry*, 121(2), 347–352.
4. Anusavice, K. J., Shen, C., & Rawls, H. R. (2013). *Phillips' science of dental materials* (12th ed.). Elsevier.
5. Awada, A., & Nathanson, D. (2015). Mechanical properties of resin-ceramic CAD/CAM restorative materials. *Journal of Prosthetic Dentistry*, 114(4), 587–593. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2015.04.016>
6. Blatz, M. B., Vonderheide, M., & Conejo, J. (2019). Evolution of aesthetic dentistry. *Journal of Dental Research*, 98(12), 1294–1304.
7. Burns, D. R., Beck, D. A., & Nelson, S. K. (2003). A review of selected dental literature on contemporary provisional fixed prosthodontic treatment. *Journal of Prosthetic Dentistry*, 90(5), 474–497.
8. Ciocan, L. T., Ghitman, J., Vasilescu, V. G., & Iovu, H. (2021). Mechanical properties of polymer-based blanks for machined dental restorations. *Materials*, 14(23), 7293.
9. Ender, A., Zimmermann, M., & Mehl, A. (2019). Accuracy of complete and partial arch impressions of actual intraoral scanning systems in vitro. *International Journal of Computerized Dentistry*, 22(1), 11–19.
10. Formlabs. (2023). *Temporary CB resin: Technical data sheet and instructions for use*. Formlabs Inc.
11. Güth, J. F., Edelhoff, D., Schweiger, J., & Keul, C. (2016). CAD/CAM polymer restorations and fracture resistance. *Clinical Oral Investigations*, 20, 783–791. <https://doi.org/10.1007/s00784-015-1556-6>
12. Haselton, D. R., Diaz-Arnold, A. M., & Vargas, M. A. (2002). Flexural strength of provisional crown and fixed partial denture resins. *Journal of Prosthetic Dentistry*, 87(2), 225–228.
13. Huettig, F., Prutscher, A., Goldammer, C., Kreutzer, C. A., & Weber, H. (2016). First clinical experiences with CAD/CAM-fabricated PMMA-based

- fixed dental prostheses as long-term temporaries. *Clinical Oral Investigations*, 20, 161–168
14. ain, S., et al. (2022). Physical and mechanical properties of 3D-printed provisional crowns and fixed dental prosthesis resins compared to CAD/CAM milled and conventional provisional resins. *Polymers*, 14(13), 2691.
 15. Karaalioğlu, A. G. D. O. F., & Duymuş, Z. Y. (2008). Diş hekimliğinde uygulanan CAD/CAM sistemleri. *Atatürk Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi Dergisi*, 1, 25–32.
 16. Kaya, G., & Eğilmez, F. (2025). CAD-CAM ile üretilen sabit geçici restorasyonlarda kullanılan PMMA materyallerinin optik ve mekanik özellikleri. *Van Diş Hekimliği Dergisi*, 6(1), 36–45.
 17. Małysa, A., Jenčová, J., & Weźgowiec, J. (2025). Biocompatibility of CAD/CAM milled dental restorative materials: A systematic review from in vitro studies. *Materials*, 18(1).
 18. Mangano, F. G., Hauschild, U., Veronesi, G., Imburgia, M., Mangano, C., & Admakin, O. (2019). Trueness and precision of five intraoral scanners in impressions of single and multiple implants: A comparative in vitro study. *BMC Oral Health*, 19(1), 1–14.
 19. Medina-Sotomayor, P., Pascual-Moscardo, A., & Camps, I. (2019). Accuracy of four digital scanning systems on prepared teeth digitally isolated from a complete dental arch. *Journal of Prosthetic Dentistry*, 121(5), 811–820.
 20. 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.
 21. NextDent (3D Systems). (2022). *NextDent C&B MFH: Product data sheet*. 3D Systems.
 22. Papathanasiou, I., Kamposiora, P., Papavasiliou, G., & Ferrari, M. (2020). The use of PEEK in digital prosthodontics: A narrative review. *BMC Oral Health*, 20, 1–11.
 23. Perea-Lowery, L., Gibreel, M., Vallittu, P. K., & Lassila, L. (2020). Characterization of the mechanical properties of CAD/CAM polymers for interim fixed restorations. *Dental Materials Journal*, 39(2), 319–325.
 24. 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>

25. Rexhepi, I., Kelmendi, J., Kamberi, A., & Staka, G. (2023). Clinical applications and mechanical properties of CAD-CAM materials in restorative and prosthetic dentistry: A systematic review. *Journal of Functional Biomaterials*, 14(4), Article 173.
26. Rosenstiel, S. F., Land, M. F., & Fujimoto, J. (2016). *Contemporary fixed prosthodontics* (5th ed.). Elsevier.
27. Schwitalla, A. D., & Müller, W. D. (2013). PEEK dental implants: A review of the literature. *Journal of Oral Implantology*, 39(6), 743–749.
28. Selva-Otaolaurruchi, E. J., et al. (2023). Graphene-doped polymethyl methacrylate (PMMA) as a new restorative material in implant-prosthetics. *Journal of Clinical Medicine*, 12(4), 1269.
29. Spitznagel, F. A., Boldt, J., & Gierthmühlen, P. C. (2018). CAD/CAM provisional dental materials. *Journal of Advanced Prosthodontics*, 10, 89–97. <https://doi.org/10.4047/jap.2018.10.2.89>
30. Stawarczyk, B., Ender, A., Trottmann, A., Özcan, M., Fischer, J., & Hämmerle, C. H. F. (2012). Load-bearing capacity of CAD/CAM polymeric restorations. *Clinical Oral Investigations*, 16, 1669–1677. <https://doi.org/10.1007/s00784-011-0633-3>
31. Wechkunanukul, N., et al. (2024). Comparison of mechanical and surface properties between conventional and CAD/CAM provisional restorations. *European Journal of Dentistry*, 18(2).
32. Yeslam, H. E. (2024). Revolutionizing CAD/CAM-based restorative dental processes and materials with artificial intelligence: A concise narrative review. *PeerJ*, 12, e16843.
33. Zidan, S., et al. (2019). Investigating the mechanical properties of ZrO₂-impregnated PMMA nanocomposite for denture-based applications. *Materials*, 12(8), 1344.

