

Çocuk Diş Hekimliğinde Klinik Uygulamalarda Dijital Teknolojiler

Zübeyde Uçar Gündoğar¹

Özet

Dijital teknolojiler, çocuk diş hekimliğinde tanıdan tedaviye uzanan tüm klinik süreçlerde köklü bir dönüşüm başlatmıştır. İntraoral tarayıcılar, bilgisayar destekli tasarım ve bilgisayar destekli üretim (CAD/CAM) sistemleri ile üç boyutlu (3B) yazıcılar aracılığıyla sağlanan dijital iş akışları, geleneksel yöntemlerin sınırlılıklarını aşarak önemli kazanımlar sunmaktadır. Geleneksel ölçü tekniklerinin çocuk hastalarda yarattığı kooperasyon problemleri ve anatomik sınırlamalar, intraoral tarayıcılar ile büyük ölçüde ortadan kaldırılmış; literatürde dijital ölçülerin hem tolere edilebilme hem de ölçümsel güvenilirlik açısından üstünlüğü ortaya konmuştur. Yer tutucular, protezler ve restorasyonların kişiye özel dijital üretimi, biyouyumluluk, marjinal adaptasyon ve üretim süresi açısından klinik avantaj sağlamaktadır. Endodontik tedavilerde dijital planlama ile konik ışınlı bilgisayarlı tomografi ve 3B yazıcı teknolojileri kullanılarak oluşturulan yönlendirme şablonları, karmaşık anatomik varyasyonlarda güvenli erişim sağlarken; rejeneratif endodontide ise 3B biyoyazıcılar doku mühendisliğine dayalı kişiselleştirilmiş tedavilere zemin hazırlamaktadır. Tüm bu ilerlemeler, dijital teknolojilerin çocuk diş hekimliğinde klinik standartlara entegrasyon potansiyelini ortaya koyarken; bu dönüşümün sürdürülebilirliği, maliyet-etkin çözümler, altyapı uyumu ve kapsamlı kullanıcı eğitimi gibi alanlarda atılacak stratejik adımlara bağlı olacaktır.

1. Giriş

Dijital diş hekimliği, ilk kez 1970'li yılların sonlarında bilgisayarlı tomografi (BT) cihazlarının kullanıma girmesiyle sağlık alanında kullanılmaya başlanmış ve diş hekimliğinde dijitalleşmenin ilk adımlarını oluşturmuştur. Bu gelişmeyi takiben, 1982 yılında klinik kullanım için ilk bilgisayar destekli tasarım ve bilgisayar destekli üretim (CAD/CAM)

1 Dr. Öğr. Üyesi, Gaziantep Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi, ORCID:0000-0002-3402-5332

sisteminin geliştirilmesiyle dijital teknolojilerin klinik pratiğe entegrasyonu somutlaşmış ve yaygınlaşmaya başlamıştır (1). Başlangıçta yalnızca CAD/CAM sistemleri, dijital görüntüleme araçları ve hasta yönetim yazılımlarını içeren bu dönüşüm; günümüzde yapay zekâ (AI), artırılmış gerçeklik (AR), üç boyutlu (3B) yazıcılar, robot destekli uygulamalar, telediş hekimliği ve biyomalzemeler gibi çok sayıda yenilikçi teknolojiyi kapsamaktadır. Dijital uygulamaları destekleyen donanım ve yazılımlar, kullanıcılara daha kaliteli ve ekonomik çözümler sunmak amacıyla sürekli geliştirilmektedir (2,3). Bu teknolojiler tanı ve tedavi süreçlerini iyileştirmenin ötesinde; hasta memnuniyetini artırma, tedavi süresini kısaltma, komplikasyonları azaltma ve hizmete erişimi kolaylaştırma gibi çok yönlü avantajlar sunmaktadır (1).

Amerikan Klinik Pediatrik Diş Hekimliği Derneği (AAPD) çocuk diş hekimliğini; bebeklikten ergenliğe kadar olan bireyler ile özel sağlık gereksinimi olan çocuklara birincil ve kapsamlı koruyucu ve tedavi edici ağız sağlığı hizmetleri sunan, yaşa dayalı bir uzmanlık alanı şeklinde tanımlamaktadır (4). Son yıllarda dijital teknolojiler, tıbbın birçok alanında olduğu gibi çocuk diş hekimliğinde de tanı, tedavi ve hasta yönetimi süreçlerinde önemli değişimlere yol açmıştır. Özellikle düşük doz radyasyonla çalışan dijital radyografi sistemleri, çocuk hastalar açısından daha güvenli bir görüntüleme alternatifi sunmaktadır. İntraoral tarayıcılar, geleneksel ölçü alma işleminin oluşturduğu rahatsızlığı ortadan kaldırarak hasta konforunu artırmıştır. 3B yazıcılar, sabit ve hareketli aygıtların kişiye özel ve hızlı üretimini mümkün kılmakta; aynı zamanda tedavi öncesi çocuklara işlemleri anlatmak için görsel ve etkileşimli bir iletişim aracı olarak da işlev görmektedir. Telediş hekimliği uygulamaları ise özellikle sağlık hizmetine erişimin kısıtlı olduğu bölgelerde sanal konsültasyonlar ve uzaktan teşhis imkânı sunarak çocuk hastalara kesintisiz bakım sağlamaktadır (5). Dijitalleşme yalnızca klinik uygulamaları değil, aynı zamanda hem çocuklara yönelik eğitici içerikleri hem de diş hekimlerinin mesleki gelişimini kapsayan bir dönüşümü beraberinde getirmiştir. Etkileşimli yazılımlar, mobil uygulamalar ve sanal platformlar dental anksiyeteyi azaltmakta, çocuklarda koruyucu alışkanlıkların gelişmesini desteklemekte ve mesleki eğitimde simülasyon temelli öğrenme olanakları sunmaktadır (3).

Bu kitap bölümü, ağız içi tarayıcılar (IOS), CAD/CAM ile 3B yazıcı teknolojilerinin çocuk diş hekimliğindeki klinik uygulamalara entegrasyonunu kapsamlı biçimde ele almaktadır. Dijital teknolojilerin tanı, tedavi planlaması ve çeşitli klinik işlemlerde sağladığı avantajlar ayrıntılı olarak değerlendirilmiş; pedodontide dijital dönüşümün mevcut durumu ve geleceğe yönelik potansiyeli tartışılmıştır.

2. Geleneksel Klinik Yöntemlerin Sınırlılıkları ve Dijital Teknolojilere Geçiş

Çocuk diş hekimliği pratiğinde temel hedef, özel sağlık gereksinimleri olan çocuklar da dahil olmak üzere tüm çocuklara en uygun diş sağlığı hizmetini sunmaktır. Geleneksel klinik işlemler; çocuk hastalarda iş birliğini zorlaştıran, işlem süresini uzatan ve klinisyen için hem fiziksel hem de psikolojik olarak zorlayıcı süreçleri beraberinde getirebilmektedir.

Hareketli yer tutucular, reçine esaslı parsiyel protezler, kişiye özel ağız koruyucular, oklüzal splintler, protetik kronlar, miyofonksiyonel apareyler ve alışkanlık kırıcı apareyler gibi dental protezlere ihtiyaç duyan çocuk hastalarda ölçü alma işlemi uygulanmaktadır. Bu işlem çocuk hastada kusma refleksi, yabancı cisim aspirasyonu ve boğulma riski gibi solunumla ilgili endişeler ve kooperasyon problemleri gibi birçok davranışsal engelle karşılaşılmasına neden olmaktadır (6). Ayrıca, geleneksel ölçü tekniklerinin ağız içi anatomik yapıların detaylı aktarımında sınırlı kalması, tekrar ölçü alma gerekliliği, zaman kaybı ve laboratuvar işlemlerinde hata riskini artırmaktadır. Diğer yandan, bu süreçler çoğu zaman birden fazla klinik randevu gerektirmekte, bu da hem çocuk hasta hem de ebeveynler açısından zorluk yaratmaktadır (7). Çocuk hastalarda ağız ve diş problemlerinin yönetimi için kullanılan dental protez ve apareylerin geleneksel üretim yöntemleri de klinik ve teknik bazı sınırlılıklar içermektedir. **Geleneksel protez ve aparey üretim süreçleri**, uzun süren laboratuvar aşamaları, uyum sorunları ve prova gereksinimleri nedeniyle tedavi sürecini uzatmaktadır(6).

Geleneksel klinik uygulamalarda yaşanan zorluklar, dijital teknolojilerin klinik uygulamalara entegrasyonunu teşvik etmiştir. Dijital ölçü sistemleri, CAD/CAM yazılımları ve 3B yazıcı teknolojileri; geleneksel yöntemlerin zayıf yönlerini ortadan kaldırarak, daha hızlı, konforlu ve hasta dostu çözümler sunmaktadır (8–10).

3. Çocuk Diş Hekimliğinde Dijital Tarama, Tasarım ve Üretim Sistemleri

3.1. Ağız İçi Tarayıcılar (Intraoral Scanner-IOS)

Ağız içi tarayıcılar (IOS), ağız içi yapıların doğrudan optik ölçülerini kaydetmek amacıyla kullanılan cihazlardır. IOS sistemleri; kamera, görüntüleme ekranı ve yazılım arabiriminden oluşan entegre birimlerle çalışır. Bu cihazlar, taranacak nesneye lazer veya yapılandırılmış ışık gibi bir ışık kaynağı yansıtarak çalışır. IOS'un temel amacı, bir nesnenin (örneğin diş ya da dental ark) 3 boyutlu geometrisini yüksek doğrulukla

kaydetmektir (11). İntraoral tarayıcı sistemleri hem görüntüleme hem de dijital tasarım süreçlerinde yüksek doğruluk ve işlem kolaylığı sunarak dijital diş hekimliğinin temelini oluşturmaktadır.

İntraoral dijital tarayıcıların gelişimi, bilgisayar destekli tasarım ve üretim (CAD/CAM) teknolojilerindeki ilerlemeyle eş zamanlı olarak gerçekleşmiştir. 1984 yılında CEREC sisteminin tanıtılması, dijital ölçülemeye geçişte önemli bir dönüm noktası olmuş ve klinik uygulamalarda dijital teknolojilerin benimsenmesini hızlandırmıştır. Bu süreç, kökenini 1970'li yıllarda Dr. François Duret'in geliştirdiği CAD/CAM konseptinden almaktadır. 1985'te ilk ticari ağız içi tarayıcılar, laboratuvar ortamında hassas restorasyon üretimi amacıyla kullanılmaya başlanmıştır. 2001 yılında Cadent firması, OrthoCAD® sistemiyle 3B dijital modelleme, sanal ortodontik planlama ve indirekt braket yerleştirme uygulamalarını dijitalleştirmiştir. 2006'da geliştirilen iTero® sistemi, 2008 itibarıyla tam ark tarama özelliğine ulaşmış ve 2009'da iOC® adını almıştır. 2011 yılında ise Cadent'in Align Technology tarafından satın alınmasıyla bu sistem, Invisalign aparatlarının üretiminde fiziksel ölçü yerine dijital taramaların kullanılmasına olanak sağlamıştır (12). Bu teknolojik gelişmeler, dijital ölçü sistemlerinin yalnızca yetişkinlerde değil, çocuk hastalarda da konforlu, hızlı ve daha az invaziv çözümler sunmasının önünü açmıştır.

İntraoral tarayıcılar, dijital ölçülerin elde edilmesini sağlayan iki ana bileşenden oluşur: veri toplama ünitesi ve tasarım yazılımı. Bu sistemde kullanılan elde taşınabilir kamera ucu (wand), diş yüzeylerinden yansıyan ışığı algılayarak verileri toplar ve bunları özel bir yazılıma sahip bilgisayara aktarır. Tarayıcı ağız içine yerleştirilip dişler üzerinde nazikçe hareket ettirildiğinde, dişlerin boyutu ve şekli otomatik olarak kaydedilir. Elde edilen görüntüler anlık olarak ekranda izlenebilir, yakınlaştırılabilir ve gerekirse düzenlenebilir. Tarayıcılar, ışığı noktasal ya da ağ yapısında projekte ederek çalışır. (13,14). Dijital ölçülerin en yaygın kullanılan formatı STL (Standard Tessellation Language) dosyasıdır. Bu dosya formatı, ağız içi yapıların üç boyutlu şeklini küçük üçgen yüzeyler aracılığıyla tanımlar ve dijital modellemede yüksek doğruluk sağlar. Ancak, yalnızca şekil bilgisini içerdiğinden renk, doku veya şeffaflık gibi detaylar için yeterli değildir. Bu tür özelliklerin kaydedilmesi amacıyla PLY (Polygon File Format) gibi gelişmiş dosya formatları da kullanılmaktadır. İntraoral tarayıcılar, ışık kaynağını diş yüzeyine yansıtarak bu yapıların görüntüsünü oluşturur. Elde edilen görüntüler, yazılım yardımıyla analiz edilerek ağız içi yapıların dijital modeli oluşturulur. Bu süreçte, yazılım yüzeydeki belirgin anatomik geçişleri (örneğin kenarlar, eğrilikler) tanımlar ve bu alanları temel alarak modelin derinlik bilgisini hesaplar. Ardından, tüm görüntüler birleştirilerek üç boyutlu dijital model

tamamlanır. Bu dijital modeller, restoratif planlamada kullanılmak üzere sistemin türüne göre farklı iş akışlarına aktarılabilir (6,11). Kullanılan sistemler; farklı donanım ve yazılımlarla uyumlu olan açık sistemler (ör. CS 3600, TRIOS), sadece kendi altyapısıyla çalışan kapalı sistemler (ör. Omnicam) ve her iki yapıyı kısmen destekleyen yarı açık sistemler olmak üzere üç gruba ayrılır (15).

3.2. Bilgisayar Destekli Tasarım ve Bilgisayar Destekli Üretim (CAD/CAM)

CAD/CAM teknolojisi, dental protezlerin tasarımı ve üretiminde bilgisayar yazılımlarının kullanılmasını sağlar. Bu sistem, özellikle protetik ve restoratif diş hekimliğinde önemli bir dönüşüm yaratmış, 1980'li yıllardan itibaren hızla gelişerek günümüzde birçok klinik ve laboratuvar sürecin dijitalleşmesini ve otomasyonunu mümkün kılmıştır. Geleneksel yöntemlerde karşılaşılan zaman kaybı ve düşük hassasiyet gibi sorunlar, CAD/CAM ile dijital ölçüm ve otomatik üretim süreçleri sayesinde büyük ölçüde aşılmıştır (16).

CAD/CAM teknolojisi, diş hekimliği uygulamalarına ilk olarak 1970'li yıllarda François Duret'in çalışmalarıyla girmiştir. Duret, 1983 yılında CAD yazılımı kullanarak ilk dental kuronu üretmiş ve bu alandaki öncü katkıları nedeniyle "modern dijital diş hekimliğinin babası" olarak anılmıştır. Aynı yıl Dr. Andersson, yüksek hassasiyetli kron üretimini mümkün kılan Procera yöntemini geliştirerek CAD/CAM'in restoratif alandaki kullanımını ileriye taşımıştır. Ayrıca, kompozit kaplamalı restorasyonlarda bu teknolojiyi kullanan ilk kişi olmuştur. 1984'te Dr. Duret'in geliştirdiği Sopha sistemi ise CAD/CAM'in evriminde önemli bir adım olmuştur (6,9). Klinik uygulamalara entegrasyon ise 1985'te Dr. Werner Mörmann ve Dr. Marco Brandestini'nin geliştirdiği CEREC sistemi ile sağlanmıştır. Bu sistem, optik tarayıcı ile frezeleme ünitesini entegre ederek, klinikte tek seansta restorasyon üretimine olanak tanıyan ilk ticari CAD/CAM platformu olmuştur (9,17). 1985'ten günümüze kadar Cerec, Cicero, Procera, Celay, DC-Zirkon ve Cercon gibi birçok CAD/CAM sistemi geliştirilmiştir (18) .

CAD/CAM teknolojisi, dijital diş hekimliğinde restoratif ve protetik işlemlerin gerçekleştirilmesini sağlayan üç temel bileşenden oluşur: dijital tarayıcı, tasarım yazılımı ve üretim ünitesi. İlk olarak, ağız içi veya masaüstü tarayıcılarla ağız içi yapılar optik olarak taranarak dijital verilere dönüştürülür. Bu veriler, CAD yazılımı ile hastanın estetik ve fonksiyonel ihtiyaçlarına göre sanal ortamda kişiselleştirilmiş olarak tasarlanır. Ardından, CAM ünitesi aracılığıyla bu dijital tasarım frezeleme ya da aşındırma yoluyla

fiziksel restorasyona dönüştürülür (19). Bu sistem, geleneksel yöntemlere kıyasla daha hızlı, daha hassas ve hasta konforunu artıran çözümler sunar. CAD/CAM sistemleri kullanım biçimlerine göre üç modele ayrılır: Klinik ortamda tek seansta üretim sağlayan hasta başı (chair side) sistemler (ör. CEREC, E4D), laboratuvar ortamında tarama ve üretimin yapıldığı sistemler (ör. CEREC inLab, Cercon), ve tasarımın lokal laboratuvarında, üretimin ise ileri teknoloji merkezlerde gerçekleştiği merkezi üretim sistemleri (ör. Procera, LAVA). Bu üretim modelleri, hekimin teknik altyapısına ve klinik gereksinimlerine göre farklı düzeyde esneklik sunmaktadır (20).

Dijital diş hekimliğinde kullanılan üretim sistemleri, farklı teknolojik yaklaşımlar sunmaktadır. Cercon sistemi, CAD bileşeni olmadan çalışır ve mum model üzerinden zirkonya köprüler üretir. Everest sistemi, alçı modelleri 20 μ m hassasiyetle tarayarak beş eksenli üretim ünitesiyle yüksek morfolojik detay ve kenar uyumu sağlar. Lava sistemi, dayanıklılığı yüksek itriyumla stabilize tetragonal zirkonya (YTZP) kullanımıyla öne çıkar. CEREC sistemi, dijital olarak tasarlanan restorasyonları frezeleme yöntemiyle üretirken; E4D sistemi ise benzer şekilde lazer tarayıcı, tasarım modülü ve freze ünitesinden oluşan entegre yapısıyla klinik içi, aynı gün restorasyon üretimine olanak tanır. Bu sistemler, dijital uygulamalarda hızlı, estetik ve yüksek hassasiyetli sonuçlar elde edilmesini sağlar (18)

3.3. Üç Boyutlu (3B) Yazıcılar

Üç boyutlu (3B) yazıcı teknolojisi, dijital olarak tasarlanan modellerin çeşitli malzemelerin katman katman birleştirilmesiyle fiziksel nesnelere dönüştürülmesini sağlayan yenilikçi bir üretim yöntemidir. Polimerler, metaller, seramikler ve hatta canlı hücreler gibi çok çeşitli materyallerle çalışabilen bu teknoloji; rejeneratif tıp, doku mühendisliği, biyomühendislik, medikal cihaz üretimi ve farmasötik uygulamalar gibi birçok sağlık alanında yaygınlaşmıştır. Diş hekimliğinde, bu teknoloji özellikle geleneksel “kazıma esaslı” (subtraktif) üretim tekniklerinin sınırlamalarını aşmak amacıyla öne çıkmaktadır. Subtraktif yöntemlerde; yüksek malzeme israfı, sınırlı tasarım esnekliği ve üretim sürecindeki zorluklar dikkat çekerken, 3B baskı teknolojisi karmaşık anatomik yapıların hassas ve verimli bir şekilde üretilmesine olanak tanır. Bu sayede 3B yazıcılar, hem klinik başarıyı artıran hem de dijital iş akışlarıyla uyumlu, çağdaş bir çözüm sunmaktadır (21).

3B yazıcı teknolojisinin temelleri 1980’li yıllara, o dönemde “hızlı prototipleme” (rapid prototyping) olarak adlandırılan kavrama dayanmaktadır. 1980 yılında Hideo Kodama, fotopolimerizasyon temelli ilk prototipleme sistemini önererek bu alandaki öncülerden biri olmuştur.

1983'te Charles Hull, "stereolitografi" adını verdiği ilk 3B yazıcı sürecini geliştirerek bu teknolojinin mucidi kabul edilmiştir. Ardından 1987'de Carl Deckard, seçici lazer sinterleme (Selective Laser Sintering - SLS) yönteminin patentini almıştır. 1988'de Hull, 3D Systems şirketini kurarak ilk ticari stereolitografi cihazı olan SLA-250'yi üretmiştir. 1992 yılında Emanuel Sachs, "3B yazıcı" (3D printing) terimini literatüre kazandırmıştır. 1990'lı ve 2000'li yıllarda yaşanan teknolojik ilerlemelerle birlikte farklı 3B yazıcı teknikleri geliştirilmiş; 2012 yılı itibarıyla ise bu cihazlar daha erişilebilir hale gelerek diş hekimliği uygulamalarına da uyarlanmıştır (22).

Diş hekimliğinde 3B yazıcı uygulamaları, hasta kaynaklı fiziksel bir modelin veya dijital verinin elde edilmesiyle başlar. Bu veri, genellikle intraoral tarayıcılar, bilgisayarlı tomografi (BT) veya manyetik rezonans görüntüleme (MRG) gibi ileri görüntüleme yöntemleriyle toplanır. Elde edilen dijital veriler uyumlu CAD (Bilgisayar destekli tasarım) yazılımları ile işlenerek hastanın ihtiyacına yönelik özgün tasarımlar oluşturulur. Hazırlanan dijital model, genellikle STL (Standard Tessellation Language) formatına dönüştürülerek yazdırma işlemine uygun hale getirilir (23).

3B yazıcı teknolojileri, kullanılan baskı tekniği ve malzeme türüne bağlı olarak diş hekimliğinde farklı klinik uygulamalara hizmet etmektedir. En yaygın yöntemlerden biri olan stereolitografi (SLA), fotosensitif reçine ve fotopolimerler kullanılarak UV ışığı ile kütleme esasına dayanır; bu teknik geçici dolgular, cerrahi kılavuzlar, döküme uygun kuron-köprü alt yapıları ve dental modellerin üretiminde tercih edilmektedir. Fused Deposition Modelling (FDM), ısıtılarak eritilen termoplastiklerin (PC, PLA, PEEK, ABS) katman katman biriktirilmesiyle çalışır; anatomik modeller, yer tutucular, preklinik eğitim materyalleri ve implant protezleri gibi alanlarda kullanılır. Selective Laser Sintering (SLS), titanyum, paslanmaz çelik, kobalt-krom gibi metal tozlarını lazer ile eritip kaynaştırarak metal kuronlar, köprüler ve implant yapılarının üretimine olanak tanır. Poly-jet printing ve Direct Light Processing (DLP) ise yüksek hassasiyet gerektiren modellerin üretimi için fotopolimer bazlı malzemelerle çalışır; yüz ve çene protezleri, cerrahi stentler ve karmaşık anatomik modeller bu teknikle üretilir. Electron Beam Melting (EBM), vakum ortamında metal tozlarını elektron demetiyle eriterek şekillendirirken, Powder Binder Printing pigmentli bağlayıcı sıvılarla toz partiküllerini birleştirerek katmanlı yapı oluşturur. Son olarak, biyoyazıcılar (bioprinters); kolajen, alginat, hiyaluronik asit gibi biyomalzemelerle ve canlı hücrelerle çalışarak, rejeneratif diş hekimliği ve doku mühendisliği uygulamalarında kullanılan biyomimetik iskelet yapılar üretmektedir (22,24,25).

4. Çocuk Diş Hekimliğinde Dijital Teknolojilerin Klinik Kullanımı

4.1. Çocuk Hastalarda Dijital Ölçü Sistemlerinin Kullanımı

Geleneksel ölçü teknikleri, çocuk hastalarda bulantı refleksi, kooperasyon eksikliği, sınırlı ağız açıklığı, ve işlem süresinin uzunluğu gibi çeşitli nedenlerle hem klinisyen hem de hasta açısından zorluk oluşturabilmektedir. Son yıllarda diş hekimliğinde ölçü alma süreçlerinde dijital teknolojilerin entegrasyonu ile önemli bir dönüşüm yaşanmaktadır. Teknolojik gelişmeler, hem erişkin hem de çocuk hastalarda geleneksel ölçü süreçlerinin daha konforlu ve tolere edilebilir hale gelmesini sağlamaktadır. İntraoral tarayıcılar, diş ve oral dokuların üç boyutlu görüntülerini dijital olarak kaydeden cihazlardır. Ark taramasının gerektiğinde molalar verilerek sürdürülebilmesi, özellikle çocuk hastalarda önemli bir avantaj sunar. Ayrıca bu sistemler, fiziksel model saklama ihtiyacını ortadan kaldırarak dijital ortamda veri arşivlenmesine olanak tanımakta; üç boyutlu kayıtların hızlı erişimi sayesinde klinikler arası paylaşım ve hasta ile iletişim süreçlerini kolaylaştırmaktadır (26,27).

Çocuk hastalarda dijital ölçü yöntemlerinin konfor düzeyine etkisini değerlendiren güncel çalışmalar, dijital sistemlerin geleneksel aljinat ölçülere göre belirgin avantajlar sunduğunu göstermektedir. Luzzi ve ark. tarafından yürütülen çalışmada, aljinat ve dijital ölçü yöntemleri çocuk hastalarda konfor ve tercih açısından karşılaştırılmıştır. Ölçü deneyimi olmayan 50 ortodontik hasta çalışmaya dahil edilmiş; her iki yöntem uygulandıktan sonra bulantı hissi, nefes alma zorluğu ve genel tercihleri içeren bir anket uygulanmıştır. Dijital ölçü sırasında bulantı ve solunum problemi yaşama oranı daha düşük bulunmuş, katılımcıların yaklaşık %75'i dijital yöntemi daha konforlu bulmuştur (28). Benzer şekilde, Serrano-Velasco ve arkadaşlarının yürüttüğü çapraz tasarımlı randomize kontrollü bir çalışmada, 10-14 yaş aralığındaki çocuk ve ergen bireylerde konvansiyonel tam ark ölçü yöntemi ile iki farklı dijital tarayıcı (iTero™ ve Primescan™) hasta konforu açısından karşılaştırılmıştır. Görsel analog skala (VAS) ile değerlendirilen hasta geri bildirimleri doğrultusunda, her üç ölçü yöntemi arasında istatistiksel olarak anlamlı farklar bulunmuş; dijital yöntemlerin, özellikle orta ergenlik dönemindeki bireylerde, konfor açısından geleneksel yöntemle göre açık şekilde üstün olduğu rapor edilmiştir. Bu bulgular, dijital ölçülerin çocuk hastalar açısından daha tolere edilebilir ve tercih edilen bir yöntem olduğunu göstermektedir (29).

Dijital ölçü sistemlerinin çocuk diş hekimliğinde tercih edilmesinde konfor ve hasta iş birliği kadar, elde edilen modellerin ölçüsel doğruluğu da klinik başarı açısından önemlidir. Patel ve ark. tarafından yürütülen

randomize çapraz tasarımlı çalışmada, 8–12 yaş arası çocuklarda dijital ve geleneksel ölçü yöntemleri; ölçüm doğruluğu, işlem süresi, ağrı, bulantı refleksi ve hasta konforu açısından karşılaştırılmıştır. Üst ve alt çenede interkanin ve intermolar genişlikler ile alt kesici dişlerin mezial-distal ölçümleri değerlendirilmiştir. Dijital ölçüler, özellikle işlem süresi, konfor ve bulantı refleksi açısından anlamlı derecede üstün bulunmuştur. Ayrıca bazı ölçüm parametrelerinde (örneğin üst çene intermolar genişliği ve alt kesici dişlerin mezial-distal genişliği) dijital yöntem daha hassas sonuçlar vermiştir (30). Onbaşı ve ark. tarafından yürütülen in vivo bir çalışmada, tam ark dijital ve konvansiyonel ölçülerin doğruluk düzeyleri karşılaştırılmıştır. CEREC Omnicam ve Trios 3 tarayıcılarıyla alınan dijital ölçüler ile polieter ve polivinilsiloksan esaslı konvansiyonel ölçülerden elde edilen modeller, referans dökümlerle karşılaştırılarak ortalama yüzey sapmaları değerlendirilmiştir. Bulgular, dijital tarayıcıların özellikle anterior bölgede yüksek doğruluk sağladığını; ancak posterior bölgede lokal sapmaların daha belirgin olduğunu ortaya koymuştur. Tam ark doğruluğu açısından dijital sistemlerin geleneksel yöntemlerle karşılaştırılabilir düzeyde performans sunduğu belirtilmiş, ancak posterior bölge restorasyonlarında dikkatli kullanım önerilmiştir (31). Bu bulgular, çocuk hastalarda dijital ölçülerin yalnızca konfor değil, aynı zamanda ölçümsel güvenilirlik açısından da güçlü bir alternatif olabileceğini desteklemektedir.

Bununla birlikte, dijital sistemlerin günlük klinik kullanımı hâlâ bazı sınırlamalarla karşı karşıyadır. Yüksek ekipman ve yazılım maliyetleri, üçüncü taraf yazılım sağlayıcılarına olan bağımlılık, veri kaybı riski ve elektronik arızalar, bu teknolojilerin yaygınlaşmasının önündeki temel engeller arasında yer almaktadır (32). Ayrıca çocuk hastalarda ağız içi tarama süreci; tarayıcı probunun boyutu, vestibüler sulkusun anatomik yapısı, eksik ya da süregelen diş sürmeleri gibi yaşa bağlı faktörler ve klinisyenin deneyimi doğrultusunda daha uzun sürebilmektedir (33).

Tüm bu sınırlamalara rağmen, intraoral tarayıcıların çocuk diş hekimliğinde hasta kooperasyonunu artırması, ölçü sürecini basitleştirmesi ve dijital protetik iş akışlarını desteklemesi açısından önemli avantajlar sunduğu açıktır. Ancak bu teknolojilerin rutine entegrasyonunun sürdürülebilir olabilmesi için maliyet etkinliği, altyapı uyumluluğu ve kullanıcı eğitimine yönelik stratejik planlamaların yapılması gerekmektedir.

4.2. Çocuk Diş Hekimliğinde Yer Tutucuların Dijital Tasarım ve Üretimi

Süt dişlerinin erken kaybı, ark uzunluğunun azalmasına ve komşu dişlerin yer değiştirmesine neden olarak çocuk hastalarda maloklüzyon, çapraşıklık ve yer darlığı gibi ortodontik problemlere zemin hazırlamaktadır (34). Bu olumsuz sonuçların önlenmesinde yer tutucular klinik olarak önemli bir rol oynar. Ancak geleneksel yöntemlerle üretilen yer tutucular; korozyon, kırılma, estetik yetersizlik, diş etiyle uyumsuzluk ve uzun üretim süreleri gibi çeşitli sınırlamalara sahiptir. Günümüzde dijital teknolojilerin diş hekimliğine entegrasyonu, bu alanda da yenilikçi çözümler sunmaktadır. Son yıllarda, ağız içi tarayıcılar ile elde edilen yüksek hassasiyetli dijital ölçüler sayesinde, CAD/CAM sistemleri ve 3B yazıcı teknolojileri kullanılarak biyouyumlu materyallerle kişiye özel yer tutucuların dijital olarak tasarlanıp üretilmesi mümkün hâle gelmiştir. Böylelikle ölçü alma süreci hem çocuk hem de klinisyen açısından kolaylaşmakta, üretim süresi kısalmakta ve elde edilen restorasyonların klinik doğruluğu artmaktadır (6). Dijital yer tutucular olarak tanımlanan bu yeni nesil aparatlar; estetik, yüksek dayanıklılık, pürüzsüz yüzey yapısı, hafiflik ve hızlı üretim gibi avantajlar sunmaktadır. Ayrıca, diş eti dokularında travmaya neden olmamaları da klinik açıdan önemli bir üstünlük sağlamaktadır (35).

Dijital yer tutucuların üretiminde kullanılan başlıca materyaller arasında polietilen eter keton (PEEK), polimetil metakrilat (PMMA), zirkonya (BruxZir), Trilon polimer ve titanyum yer almaktadır. PEEK; kemik benzeri elastik modülü, yüksek sıcaklık ve kimyasal direnci, toksik olmaması ve estetik avantajları nedeniyle özellikle metal alerjisi olan bireylerde tercih edilmektedir. PMMA ise hafif, estetik ve biyouyumlu bir termoplastik olup, CAD/CAM süreçlerine entegre edilerek mekanik dayanıklılığı ve marjinal adaptasyonu artırılmıştır. Zirkonya (BruxZir), yüksek kırılma direnci, düşük termal genleşmesi ve geniş renk skalasıyla estetik ve dayanıklı bir seçenek sunmaktadır. Trilon, fiberle güçlendirilmiş rezin kompozitten üretilen, metal içermeyen, hafif ve onarılabilir bir polimerdir. Manyetik rezonans görüntüleme (MRI) gibi özel klinik durumlara sahip hastalar için uygun bir alternatiftir. Titanyum ise yüksek mukavemet ve biyouyumluluğu ile öne çıkan, 3B yazıcılarla üretilen yer tutucularda zaman ve üretim açısından pratiklik sağlamasıyla dikkat çekmektedir (25).

Dijital yer tutucuların üretiminde sıklıkla kullanılan PEEK polimeri ile CAD/CAM sistemleri aracılığıyla hazırlanan aparatların klinik etkinliği literatürde geniş biçimde incelenmiştir. AboulAzın ve arkadaşlarının yürüttüğü randomize kontrollü bir çalışmada, CAD/CAM ile üretilmiş

PEEK esaslı yer tutucular ile geleneksel band-halka yer tutucular karşılaştırılmış; her iki grup arasında dişeti sağlığı ve plak birikimi açısından fark gözlenmezken, PEEK grubunda hasta konforu anlamlı düzeyde daha yüksek bulunmuştur (36). Benzer şekilde, dijital iş akışı kullanılarak üretilen PEEK yer tutucuların değerlendirildiği pilot bir çalışmada, dijital tarama ve CAD yazılımı ile kişiye özel apareylerin tasarlandığı, CAM sistemiyle üretildiği ve 9 aylık takipte bu aygıtların çocuk hastalarca konforlu, estetik ve biyouyumlu bulunduğu rapor edilmiştir (37). Ayrıca, Guo ve arkadaşlarının in vitro çalışmasında lazer destekli tarama ile CAD yazılımı kullanılarak PEEK materyalinden çıkarılabilir yer tutucular (RSM) tasarlanmış; bu dijital apareylerin konvansiyonel yöntemlere kıyasla daha iyi doku uyumu sağladığı ve ortalama doku boşluğunun daha düşük olduğu belirlenmiştir (38).

CAD/CAM sistemlerinin yanı sıra, yer tutucu üretiminde giderek daha fazla ilgi gören bir diğer dijital yaklaşım ise 3B yazıcı teknolojileridir. Bu kapsamda Thakur ve ark. tarafından yürütülen randomize klinik bir çalışmada, 3B yazıcı ile üretilen band loop yer tutucular ile geleneksel yer tutucular karşılaştırılmıştır. Titanyum bazlı metal toz kullanılarak mikro lazer sinterleme yöntemiyle üretilen yer tutucular, 9 ay süresince 6–12 yaş arası çocuklarda değerlendirilmiştir. Çalışma sonucunda, 3B yazıcı grubunda anlamlı şekilde daha yüksek bir başarı oranı (%77,4) elde edilmiş; dişeti sağlığı her iki grupta benzer bulunmuştur. Hasta memnuniyetinin %90'ın üzerinde olması ve dijital sistemlerin sağladığı uyum ve dayanıklılık, bu yöntemin geleneksel yer tutuculara klinik açıdan güçlü bir alternatif olabileceğini göstermektedir (39). Nedeljkovic ve ark. tarafından yürütülen randomize kontrollü çalışmada, erken süt molar kaybı sonrasında kullanılan fonksiyonel yer tutucuların klinik etkinliği değerlendirilmiştir. Yer tutucular, iki farklı üretim yöntemiyle (3B yazıcı ile üretilmiş metal: Co-Cr alaşımı ve CAD/CAM ile frezelenmiş kompozit) hazırlanmıştır. Toplam 28 çocuğun dahil edildiği çalışmada, apareyler 1., 3. ve 6. aylarda takip edilmiş; maksimum oklüzal kuvvet ve çiğneme etkinliği ölçülmüştür. Her iki grupta da çiğneme fonksiyonlarında anlamlı iyileşme görülmüş; oklüzal kuvvet açısından fark bulunmamıştır. Ancak 6. ay sonunda, 3B yazıcı ile üretilmiş metal yer tutucuların klinik olarak daha üstün olduğu bildirilmiştir (40).

Tüm bu bulgular, dijital olarak üretilmiş yer tutucuların hem pasif hem de fonksiyonel kullanımda geleneksel yöntemlere kıyasla eşdeğer hatta üstün performans gösterebildiğini ortaya koymaktadır. Dijital ölçüleme, kişiselleştirilmiş tasarım ve hızlı üretim süreçleriyle desteklenen bu sistemlerin, çocuk diş hekimliğinde yer tutucu tedavilerine yeni bir standart getirmesi olası görünmektedir.

4.3. Çocuk Diş Hekimliğinde Dijital Restoratif ve Protetik Yaklaşımlar

Çocuk hastalarda restoratif tedavilerin başarısı; çürük yaygınlığı, dişin yapısal durumu, çocuğun yaşı ve kooperasyon düzeyi gibi birçok faktöre bağlıdır. Özellikle çok yüzeyli çürükler, pulpa tedavisi uygulanmış dişler ve gelişimsel mine/dentin defektleri gibi durumlarda, geleneksel restorasyonlar yetersiz kalabilmekte; bu gibi olgularda tam örtücü kronlar daha güvenilir bir tedavi seçeneği sunmaktadır. Geleneksel olarak çocuk diş hekimliğinde paslanmaz çelik kronlar (PÇK) en yaygın kullanılan restorasyonlardır. Estetik gereksinimlerin ön planda olduğu vakalarda ise pre-veneered PÇK'ler, zirkonya ve bioflex kronlar gibi alternatif prefabrike seçeneklere yönelinmektedir (41). Ancak bu sistemler, kişiye özel uyum ve estetik beklentileri karşılamakta sınırlı kalabilmektedir. Son yıllarda, dijital teknolojilerin klinik uygulamalara entegrasyonu ile kişiselleştirilmiş dijital restorasyonlara olan ilgi artmıştır. CAD/CAM ve 3B yazıcı teknolojileriyle hazırlanan bu restorasyonlar; yüksek ölçü doğruluğu, biyouyumluluk, estetik ve dayanıklılık gibi pek çok avantaj sunmaktadır. Ayrıca, dijital verilerin arşivlenmesi sayesinde fiziksel modellere olan gereksinim ortadan kalkmakta; bu da klinik süreçlerin hızlanmasına ve kaynak kullanımının daha verimli hale gelmesine katkı sağlamaktadır (42,43).

Son yıllarda yapılan çalışmalar, CAD/CAM sistemleri ve 3B yazıcılarla üretilen restorasyonların çocuk hastalarda başarılı klinik sonuçlar verdiğini ortaya koymuştur. Huang ve ark., kişiye özel 3B baskılı rezin kronlar ile CAD/CAM ile hazırlanan rezin kronların hem estetik hem de marjinal uyum açısından PÇK'ya üstünlük sağladığını bildirmiştir (44). Benzer şekilde, Al-Halabi ve ark. tarafından gerçekleştirilen randomize klinik çalışmada, pulpa tedavisi uygulanmış ve yaygın çürük lezyonlarına sahip süt azı dişlerin restorasyonunda kullanılan 3B yazıcıyla üretilmiş fotopolimer rezin kronlar (PRC) ile CAD/CAM yöntemiyle üretilmiş PMMA esaslı kronlar karşılaştırılmıştır. On iki aylık takip sürecinde her iki sistem de yüksek marjinal uyum ve retansiyon sağlamış; ancak PRC grubunda daha az siman kaybı ve daha iyi gingival yanıt gözlemlenmiştir (45). Naik ve arkadaşlarının çalışmasında ise süt azı dişlerde kullanılan üç farklı estetik kron türü—CAD/CAM ile üretilen PMMA kronlar, 3B baskılı PRC ve prefabrike zirkonya kronlar—dokuz ay süreyle değerlendirilmiştir. En yüksek retansiyon oranı ve marjinal uyum 3B yazıcı ile üretilmiş PRC kronlarda gözlenirken, bunu zirkonya ve PMMA kronlar izlemiştir. Bu sonuçlar, 3B yazıcı ile hazırlanmış kronların, hem biyolojik uyum hem de retansiyon açısından prefabrike sistemlere göre daha avantajlı olabileceğini göstermektedir (46).

Geniş çürük lezyonlarına sahip süt azı dişlerinin restorasyonunda, CAD/CAM ile üretilen onley restorasyonlar; yüksek marjinal adaptasyon, dayanıklılık ve estetik açıdan etkili bir tedavi alternatifi olarak öne çıkmaktadır. Dursun ve ark., süt azı dişlerde derin çürüklerin tedavisinde, dijital tarama ve frezeleme işlemi ile doğrudan klinikte üretilen CAD/CAM kompozit onleylerin uygulanabilirliğini bildirmiştir. Bu restorasyonlar, minimal invaziv hazırlık, üstün estetik ve biyouyumluluk gibi avantajlar sunarken, aynı zamanda dişeti travmasını azaltmakta ve hasta/ebeveyn memnuniyetini artırmaktadır. Ancak yüksek ekipman maliyeti ve yazılım sınırlılıkları dezavantaj oluşturmaktadır (47). Benzer şekilde, Mittal ve ark. tarafından yapılan prospektif çalışmada, endodontik tedavi görmüş süt azı dişlerde indirekt kompozit onleylerin üç yıllık klinik performansı, PÇK'lerle karşılaştırılmıştır. Her iki restorasyon benzer retansiyon, marjinal bütünlük ve gingival uyum göstermiştir; ancak onleyler daha kısa klinik süre ve yüksek hasta/ebeveyn memnuniyeti sağlamıştır (48).

Çocuk ve genç hastalarda süt dişlerinin yanı sıra daimi diş restorasyonları da klinik olarak büyük önem arz etmektedir. Özellikle derin çürükler veya endodontik tedavi sonrasında madde kaybı fazla olan birinci daimi molarların uzun dönem başarısı için biyolojik uyumu yüksek, estetik ve konservatif çözümlere ihtiyaç duyulmaktadır. Geleneksel olarak bu dişler paslanmaz çelik kronlarla restore edilse de, günümüzde gelişmiş adeziv teknikler ve CAD/CAM destekli seramik materyallerin dayanıklılığının artmasıyla birlikte, endokronlar konservatif ve estetik bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. Taha ve Saad tarafından yürütülen randomize klinik çalışmada, 10–13 yaş aralığındaki çocuklarda endodontik tedavi görmüş birinci daimi azı dişlerinin restorasyonunda geleneksel PÇK'ler, CAD/CAM ile lityum disilikat cam seramikten ve güçlendirilmiş indirekt kompozitten üretilmiş endokronlar ile karşılaştırılmıştır. On iki aylık takip sürecinde, her iki endokron grubunda daha yüksek ebeveyn memnuniyeti, daha düşük plak birikimi ve daha stabil gingival indeks değerleri bildirilmiştir. Bu bulgular, endokronların çocuk hastalarda da güvenle uygulanabileceğini ve özellikle estetik kaygıların ön planda olduğu durumlarda PÇK'lere başarılı bir alternatif sunabileceğini ortaya koymaktadır (49).

Son yıllarda yalnızca yaygın çürük lezyonlarının değil, aynı zamanda gelişimsel kökenli diş sert doku defektlerinin restorasyonunda da dijital yaklaşımlar öne çıkmıştır. Molar insisör hipomineralizasyonu (MIH), amelogenesis imperfekta ve dentinogenesis imperfekta gibi yapısal bozukluklar, dişlerin dayanıklılığını ve adeziv sistemlere yanıtını olumsuz etkileyerek geleneksel restoratif yöntemlerle uzun dönem başarıyı sınırlandırmaktadır. Moussally ve ark. tarafından sunulan bir vaka raporunda

hipokalsifiye tipte amelogenesis imperfekta tanılı 17 yaşındaki bir hastaya dört seansta 28 tam seramik kronun chairside CAD/CAM yöntemiyle hazırlanarak uygulanması sayesinde ağrı, fonksiyon ve estetik problemleri hızlı ve etkili bir şekilde çözülmüş; hastada genel yaşam kalitesinde anlamlı bir iyileşme bildirilmiştir (50). Benzer şekilde, Swanson ve ark. tarafından sunulan olgu serisinde, amelogenesis imperfecta tanılı dört adölesan hastada estetik ve fonksiyonel rehabilitasyon amacıyla dijital iş akışlarıyla geçici anterior restorasyonlar uygulanmıştır. Hastaların fenotipik özellikleri ve klinik ihtiyaçlarına göre restorasyon tipi, materyal ve üretim yöntemi bireysel olarak belirlenmiş; CAD/CAM sistemleri ile dijital ölçü ve üretim teknolojilerinden etkin şekilde yararlanılmıştır (51). Eldchna ve ark. MIH tanısı almış 52 arka daimi dişi iki gruba ayırarak CAD/CAM teknolojiyle üretilmiş iki farklı restoratif materyali—monolitik zirkonya overlay ve IPS e.max CAD overlay—karşılaştırmıştır. On iki aylık takip sürecinde, her iki restorasyon tipi de estetik, fonksiyonel uyum ve biyolojik uygunluk açısından başarılı sonuçlar göstermiştir (52). Bu çalışmalar gelişimsel dental defektlerin erken daimi dişlenme döneminde dijital destekli yaklaşımlarla başarılı şekilde yönetilebileceğini ve bu sistemlerin genç hastaların karmaşık restoratif ihtiyaçlarına bireysel çözümler sunabildiğini göstermektedir.

Sonuç olarak, dijital teknolojiler çocuk diş hekimliğinde restoratif ve protetik uygulamalara yenilikçi, bireyselleştirilmiş çözümler sunmaktadır. CAD/CAM ve 3B yazıcı sistemleri, estetik, uyum ve hasta memnuniyeti açısından geleneksel yöntemlere güçlü bir alternatif oluşturmaktadır. Gelecekte bu yaklaşımların daha da yaygınlaşması beklenmektedir.

4.4. Çocuk Diş Hekimliğinde Dijital Endodontik Yaklaşımlar

Çocuk hastalarda endodontik tedaviler, anatomik varyasyonlar ve gelişimsel anomaliler nedeniyle erişim, kanal tespiti ve şekillendirme aşamalarında önemli zorluklar oluşturabilir. Bu zorlukların aşılmasında dijital teknolojiler etkili çözümler sunmaktadır. Özellikle konik ışınli bilgisayarlı tomografi (CBCT) ve 3B yazıcı teknolojileri kullanılarak kişiye özel yönlendirme şablonları hazırlanmakta, böylece güvenli kanal girişi sağlanmakta ve dentin kaybı ile kök perforasyonu gibi iatrojenik komplikasyonlar en aza indirilebilmektedir. CBCT tabanlı dijital planlamalarla oluşturulan modeller, karmaşık kök anatomisinin anlaşılmasını kolaylaştırmakta ve cerrahi endodontik işlemlerin (ör. apikal rezeksiyon) etkinliğini artırmaktadır (53). Krug ve arkadaşlarının sunduğu bir olguda, dentin displazisi tip I tanılı 12 yaşındaki bir hastada, kanal obliterasyonu ve apikal patolojiler nedeniyle endodontik tedavi planlanmış, konvansiyonel yaklaşım sırasında meydana gelen perforasyon sonrası geri kalan dişlerde dijital rehberli endodontik

yöntem tercih edilmiştir. CBCT ve yüzey tarayıcı verileri birleştirilerek 3B yazıcı ile kişiye özel kılavuzlar üretilmiş ve bu sayede minimal invaziv girişimlerle tüm kök kanalları başarılı şekilde bulunmuştur. Bir yıllık takipte tüm dişlerde apikal iyileşme sağlandığı bildirilmiştir (54). Benzer şekilde, Dabrowski ve ark.'nın çalışmasında da kanal kalsifikasyonu nedeniyle zorlaşan olgularda dijital planlamayla oluşturulan endodontik rehberlerin, iatrojenik hataları azaltarak kök kanal tedavisinin öngörülebilirliğini artırdığı gösterilmiştir (55). Bu bulgular, rehberli endodontinin hem çocuk hem erişkin hastalarda kişiselleştirilmiş ve güvenli bir yaklaşım sunduğunu ortaya koymaktadır.

Rejeneratif endodonti, özellikle genç daimi dişlerde doku mühendisliği prensiplerine dayalı biyolojik onarım süreçlerini hedefleyen yenilikçi bir yaklaşımdır. Rejeneratif endodontide 3B biyoyazıcı teknolojisi (bioprinting), doğal pulpa-dentin kompleksinin mimarisini taklit edebilen, hücre yerleşimini ve biyomalzeme bileşimini yüksek hassasiyetle kontrol etme olanağı sunarak büyük bir potansiyel taşımaktadır. Hidrojel bazlı biyomürekkepler kullanılarak kök kanalına özgü, kök hücreler ve biyolojik aktif moleküller içeren özelleştirilmiş doku iskeletleri üretilebilmekte; bu sayede rejeneratif süreçlerin etkinliği artmakta ve yeni dokuların kök kanal duvarlarıyla entegrasyonu kolaylaşmaktadır. Katmanlı üretim tekniği, hücrelerin ve büyüme faktörlerinin üç boyutlu ve organize biçimde yerleştirilmesine olanak tanıyarak kompleks dokuların biyomimetik olarak oluşturulmasına imkân verir (56,57)

Zhou ve ark. tarafından geliştirilen bir çalışmada, dental pulpa kök hücrelerini (DPSC) taşıyan ve GelMA-Dextran bazlı hidrojel ile oluşturulan gözenekli bir Dental Pulpa Yönlendirme Yapısı (DPGC) tasarlanmıştır. Bu biyobasılmış yapı, DPSC'lerin canlılığını, göçünü ve yayılımını artırırken aynı zamanda kapiller damar oluşumunu ve nörogenezi desteklemiştir. In vivo fare modelinde yapılan implantasyon sonrası, yapı içinde odontoblast benzeri hücreler ve yeniden damarlaşma gözlenmiş, böylece doğal pulpa dokusunun mimarisi başarıyla taklit edilmiştir. Bu bulgular, kişiye özel, yönlendirilmiş biyobasım stratejilerinin kök hücre temelli pulpa rejenerasyonunda umut verici bir alternatif oluşturabileceğini ortaya koymaktadır (58).

Bununla birlikte, 3B biyoyazıcı teknolojilerinin rejeneratif endodonti alanındaki uygulamaları hâlen deneysel düzeydedir; bugüne kadar insan üzerinde gerçekleştirilmiş klinik vaka ya da randomize kontrollü çalışma bildirilmemiştir. Bu nedenle, bu teknolojinin pulpa rejenerasyonu için klinik kullanımı, biyomalzeme biyouyumluluğu, damarlaşma yeterliliği ve uzun dönem doku bütünlüğü gibi konularda daha ileri düzey araştırmalara

ihtiyaç duymaktadır. Günümüzdeki literatür, bu teknolojinin ileride kişiye özel rejeneratif tedavilerin temelini oluşturabileceğine işaret etmektedir; ancak mevcut durumda uygulama alanı laboratuvar ve hayvan modelleri ile sınırlıdır.

5. Dijital Pedodontinin Sınırları

Dijital pedodonti, klinik uygulamalarda önemli avantajlar sağlasa da, bu teknolojilerin yaygın ve etkin kullanımı bazı sınırlamaları da beraberinde getirmektedir. Öncelikle, dijital sistemlere geçiş süreci yüksek maliyetli yatırımlar gerektirir; cihazların ilk temini, periyodik bakımları ve yazılım güncellemeleri, özellikle küçük ve orta ölçekli klinikler için ciddi bir ekonomik yük oluşturmaktadır. Buna ek olarak, dijital ekipmanların etkin kullanılabilmesi için hekimler ve yardımcı sağlık personelinin ileri düzeyde eğitim alması gerekmektedir; bu da hem zaman hem de kaynak açısından ek planlama gerektirir. Teknolojik alt yapıya bağlı olarak gelişebilecek teknik aksaklıklar —örneğin yazılım çökmeleri veya cihaz arızaları— klinik işleyişte kesintilere neden olabilir ve tedavi süreçlerini olumsuz etkileyebilir. Ayrıca dijital donanıma sahip olmayan veya sınırlı kaynaklara sahip merkezlerde bu hizmetlerin uygulanabilirliği kısıtlı kalmakta; bu durum dijital sağlık hizmetlerine erişimde eşitsizlik yaratabilmektedir.

Son olarak, dijital teknolojilerin hızla evrilmesi, kliniklerin teknolojik olarak güncel kalabilmeleri için sürekli yatırım yapmalarını zorunlu hâle getirmektedir. Bu bağlamda, dijital diş hekimliği uygulamalarının sürdürülebilirliği açısından maliyet etkinliği, erişilebilirlik ve kullanıcı dostu yazılım-donanım entegrasyonu kritik rol oynamaktadır. Teknolojik yeniliklerin klinik pratiğe entegre edilmesinde, sadece teknolojik yeterlilik değil, aynı zamanda altyapı, eğitim ve ekonomik planlama da dikkate alınmalıdır.

6. Sonuç

Dijital teknolojilerin çocuk diş hekimliği uygulamalarda giderek daha fazla yer bulduğu görülmektedir. İntraoral tarayıcılar, CAD/CAM sistemleri ve 3B yazıcı teknolojileri çocuk hastalarda daha konforlu, estetik ve etkili tedavi imkânı sunmaktadır. Bu dijital yaklaşımlar yalnızca klinik başarıyı artırmakla kalmayıp, aynı zamanda çocuk hastaların diş hekimliğine yönelik tutum ve iş birliğini de olumlu yönde etkilemektedir. Ancak bu teknolojilerin farklı klinik uygulamadaki etkinliğini, uzun dönem başarısını ve maliyet-etkinliğini değerlendirmek için daha fazla klinik araştırmaya ihtiyaç duyulmaktadır.

Referanslar

1. Haidar ZS. Digital Dentistry: Past, Present, and Future. 2023 Jun 6;2(16).
2. Rekow ED. Digital dentistry: The new state of the art—Is it disruptive or destructive? *Dent Mater*. 2020 Jan;36(1):9–24.
3. Garcovich D, Lipani E, Aiuto R, Alvarado Lorenzo A, Adobes Martin M. Application of digital workflow and technologies in clinical paediatric dentistry: a scoping review. *Eur Arch Paediatr Dent*. 2024;25(5):731–66.
4. American Academy of Pediatric Dentistry. Overview. *The Reference Manual of Pediatric Dentistry*. 2024.
5. Spagnuolo G. The role of digital devices in dentistry: clinical trends and scientific evidences. *J Clin Med*. 2020.
6. Khan MK. Modern Digital Pediatric Dentistry with the Advent of Intraoral Sensors, Computer-Aided Design/Computer-Aided Manufacturing, and Three-dimensional Printing Technologies: A Comprehensive Review. *J Dent Res Rev*. 2022 Sep;9(3):195–201.
7. Yilmaz H, Aydin MN. Digital versus conventional impression method in children: Comfort, preference and time. *Int J Paediatr Dent*. 2019 Nov 1;29(6):728–35.
8. Sikdar R, Bag A, Shirolkar S, Gayen K, Sarkar S, Roychowdhury S. 3D printing: Its application in pediatric dental practice. *Acta Sci Dent Sci*. 2022.
9. Bhuyan L, Dhull KS, Pattnaik S, Devraj IM, Nishat R, Panda A. CAD-CAM in Pediatric Dentistry: A brief insight. *Bangladesh J Med Sci*. 2024 Mar 11;23(Special Issue):S38–42.
10. Serrano-Velasco D, Martín-Vacas A, Paz-Cortés MM, Giovannini G, Cintora-López P, Aragonese JM. Intraoral scanners in children: evaluation of the patient perception, reliability and reproducibility, and chairside time—A systematic review. *Front Pediatr*. 2023 Jul 7;11:1213072.
11. Mangano F, Gandolfi A, Luongo G, Logozzo S. Intraoral scanners in dentistry: a review of the current literature. *BMC Oral Health*. 2017 Dec 12;17(1).
12. Audiat MPT. Historical Evolution of Intraoral Scanners in Dentistry. 2021.
13. Panwar M, Gupta S, Singh U, Das A, Isha S. Role of Intraoral Scanners in Pediatric Dentistry. *Int J Med Dent Sci*. 2023 Mar 14:2071–6.
14. Eggmann F, Blatz MB. Recent Advances in Intraoral Scanners. *J Dent Res*. 2024 Dec 9;103(13):1349–57.

15. Braian M, Wennerberg A. Trueness and precision of 5 intraoral scanners for scanning edentulous and dentate complete-arch mandibular casts: A comparative in vitro study. *J Prosthet Dent*. 2019.
16. Maiti N, Mahapatra N, Patel D, Chanchad J, Shah AS, Rahaman SM, et al. Application of CAD-CAM in Dentistry. *Bioinformation*. 2024 May 31;20(5):547.
17. Mörmann WH. The evolution of the CEREC system. *J Am Dent Assoc*. 2006 Sep;137(9 Suppl):7S-13S.
18. Jain R, Takkar R, Jain G, Deora N, et al. CAD-CAM the future of digital dentistry: a review. *Ann Prosthodont Restor Dent*. 2(2):33.
19. Bhuyan L, Singh Dhull K, Pattnaik S, Mysore Devraj I, Nishat R, Panda A. CAD-CAM in Pediatric Dentistry: A brief insight. *Bangladesh J Med Sci*. 2024.
20. Susic I, Travar M. The application of CAD/CAM technology in Dentistry. *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*. 2017;200(1):012020.
21. Chen Y, Wei J. Application of 3D Printing Technology in Dentistry: A Review. *Polymers (Basel)*. 2025 Apr 1;17(7):886.
22. Greeshma B, Sandeep V, Rajavardhan K, Sindhura K, Madhupreethi T. A Review on Revolutionizing Pediatric Dental Treatments with 3D Printing Technology: Current Trends and Future Prospects. *J Orofac Res*. 2025.
23. Sikdar R, Bag A, Shirolkar S, Gayen K, Sarkar S, Roychowdhury S. 3D printing: Its application in pediatric dental practice. *Acta Sci Dent Sci*. 2022.
24. Tyagi R, Kalra N, Khatri A, Kulood MK, Garg N. Three-dimensional printing: Fine-tuning of the face of pediatric dentistry. *SRM J Res Dent Sci*. 2022.
25. Shaheen S, Sridevi E, Sankar AJS, Krishna VSS, Sridhar M, Sankar KS. Contemporary era of Three-dimensional printing in pediatric dentistry: An overview. *J Oral Res Rev*. 2023.
26. Burhardt L, Livas C, Kerdijk W, van der Meer W. Treatment comfort, time perception, and preference for conventional and digital impression techniques: A comparative study in young patients. *J Dent*. 2016.
27. Kalaivanan D, Kalimreddy P, Kodical SR, Ramasetty D. Three dimensional printing—from a pediatric dentist’s perspective. *Int J Pedodont Rehabil*. 2022.
28. Luzzi V, Di Carlo G, Crupi E, Quarta E, De Angelis F, Di Carlo S, et al. Traditional versus digital impression: compliance and preference in pediatric patients- review. *Ann Stomatol (Roma)*. 2022;13(1–4):3–8.

29. Serrano-Velasco D, Martín-Vacas A, Cintora-López P, Paz-Cortés MM, Aragonces JM. Comparative Analysis of the Comfort of Children and Adolescents in Digital and Conventional Full-Arch Impression Methods: A Crossover Randomized Trial. *Children (Basel)*. 2024 Feb 2;11(2):190.
30. Patel C, Barot GN, Patel MC, Nath KJ, Patel SP, Patel DK. Accuracy and Comfort in Digital and Conventional Impression in Pediatric Dental Patients: A Randomized Comparative Study. 2025.
31. Onbasi Y, Abu-Hossin S, Paulig M, Berger L, Wichmann M, Matta RE. Trueness of full-arch dental models obtained by digital and conventional impression techniques: an in vivo study. *Sci Rep*. 2022 Dec 1;12(1):1–9.
32. Fleming PS, Marinho V, Johal A. Orthodontic measurements on digital study models compared with plaster models: a systematic review. *Orthod Craniofac Res*. 2011 Feb;14(1):1–16.
33. Grünheid T, McCarthy SD, Larson BE. Clinical use of a direct chairside oral scanner: An assessment of accuracy, time, and patient acceptance. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*. 2014 Nov;146(5):673–82.
34. Tunison W, Flores-Mir C, ElBadrawy H, Nassar U, El-Bialy T. Dental arch space changes following premature loss of primary first molars: a systematic review. *Pediatr Dent*. 2008;30:297–302.
35. Dhanotra K, Bhatia R. Digitainers—Digital space maintainers: A review. *Int J Clin Pediatr Dent*. 2021.
36. AboulAzm NS, Sharaf AA, Dowidar KML, AbdelHakim AA. Effectiveness of CAD/CAM PEEK fabricated space maintainer in children: A randomized controlled clinical trial. *Alexandria Dent J*. 2023 Jul;48(2):203–10.
37. Ierardo G, Luzzi V, Lesti M, Voza I, Brugnoletti O, Polimeni A, Bossù M. Peek polymer in orthodontics: A pilot study on children. *J Clin Exp Dent*. 2017.
38. Guo H, Wang Y, Zhao Y, Liu H. Computer-aided design of polyetheretherketone for application to removable pediatric space maintainers. *BMC Oral Health*. 2020 Jul 10;20(1):1–10.
39. Thakur B, Bhardwaj A, Luke AM, Wahjunigrum DA. Effectiveness of traditional band and loop space maintainer vs 3D-printed space maintainer following the loss of primary teeth: a randomized clinical trial. *Sci Rep*. 2024 Dec 1;14(1):1–12.
40. Nedeljkovic A, Milosavljevic M, Mladenovic K, Janjic V, Schimmel M, Mladenovic R. Clinical outcomes of novel CAD/CAM-designed functional space maintainers produced via additive and subtractive methods: A randomized controlled trial. *J Dent*. 2025 Apr 1;155:105608.

41. Rahate I, Fulzele P, Thosar N. Comparative evaluation of clinical performance, child and parental satisfaction of Bioflx, zirconia and stainless steel crowns in pediatric patients. *F1000Res*. 2023;12.
42. Aktaş N, Ciftci V. Current applications of three-dimensional (3D) printing in pediatric dentistry: a literature review. *J Clin Pediatr Dent*. 2024 Sep 1;48(5):4–13.
43. Ille CE, Jivănescu A, Pop D, Stoica ET, Flueraş R, Talpoş-Niculescu IC, et al. Exploring the Properties and Indications of Chairside CAD/CAM Materials in Restorative Dentistry. *J Funct Biomater*. 2025 Feb 1;16(2):46.
44. Huang HY, Yang YT, Chuang CC, Shen YK, Chen MH, Lin WC. Evaluation of the clinical application of personalized 3D printing and CAD/CAM resin crowns to replace stainless steel crowns in paediatric dentistry. *Int J Paediatr Dent*. 2024 Nov;34(6):811–21.
45. Al-Halabi MN, Bshara N, Nassar JA, Comisi JC, Rizk CK. Clinical Performance of Two Types of Primary Molar Indirect Crowns Fabricated by 3D Printer and CAD/CAM for Rehabilitation of Large Carious Primary Molars. *Eur J Dent*. 2021 Jul;15(3):463–8.
46. Naik SV, Thakkar SV, Naik D, Chakraborty A, Usha G. Three-dimensional-printed Photopolymer Resin Crowns vs Computer-aided Milled Polymethyl Methacrylate Crowns with Prefabricated Zirconia Crowns for Primary Molars: A Randomized Clinical Trial. *Int J Clin Pediatr Dent*. 2025 Jul 25;18(5):506–13.
47. Dursun E, Monnier-Da Costa A, Moussally C. Chairside CAD/CAM Composite Onlays for the Restoration of Primary Molars. *J Clin Pediatr Dent*. 2018;42(5):349–.
48. Mittal H, Goyal A. Clinical performance of indirect composite onlays as esthetic alternative to stainless steel crowns for rehabilitation of a large carious primary molar. *J Clin Pediatr Dent*. 2016;40(5):345–.
49. Taha AI, Saad AE. Clinical and radiographic outcomes of endocrowns fabricated from two different CAD-CAM materials versus stainless steel crowns in restoring first permanent molars. *BMC Oral Health*. 2025 Dec 1;25(1).
50. Moussally C, Fron-Chabouis H, Charrière A, Maladry L, Dursun E. Full-mouth Rehabilitation of Hypocalcified-type Amelogenesis Imperfecta With Chairside Computer-aided Design and Computer-aided Manufacturing: A Case Report. *Oper Dent*. 2019 May 1;44(3):E145–58.
51. Swanson AK, Duqum IS, Heimisdóttir LH, Wright JT. Digital restorative workflows for developmental dental defects in young patients: A case series. *J Am Dent Assoc*. 2023 Apr 1;154(4):340–8.

52. Eldehna AM, Montaser AG, Alrafee SA, Abdelgawad A. Clinical outcome of CAD/CAM overlays of MIH affected young permanent molars. *Saudi Dent J.* 2023 Sep;35(6):699–706.
53. Decurcio DA, Bueno MR, Silva JA, Loureiro MAZ, Sousa-Neto MD, Estrela C. Digital Planning on Guided Endodontics Technology. *Braz Dent J.* 2021 Dec 6;32(5):23–33.
54. Krug R, Volland J, Reich S, Soliman S, Connert T, Krastl G. Guided endodontic treatment of multiple teeth with dentin dysplasia: a case report. *Head Face Med.* 2020 Dec 1;16(1):1–8.
55. Dąbrowski W, Puchalska W, Ziemlewski A, Ordyniec-Kwaśnica I. Guided Endodontics as a Personalized Tool for Complicated Clinical Cases. *Int J Environ Res Public Health.* 2022 Aug 1;19(16).
56. Mohd N, Razali M, Fauzi MB, Abu Kasim NH. In Vitro and In Vivo Biological Assessments of 3D-Bioprinted Scaffolds for Dental Applications. *Int J Mol Sci.* 2023 Aug 1;24(16):12881.
57. Etezadkeyhan P. Recent Advances in Regenerative Endodontics: Clinical Applications and Challenges. *J Oral Dent Health Nexus.* 2024 Oct 1;1(1):29–42.
58. Zhou N, Zhu S, Wei X, Liao X, Wang Y, Xu Y, et al. 3D-bioprinted hydrogels with instructive niches for dental pulp regeneration. *Int J Bioprint.* 2024 Feb 5;10(3):1790.

