

DİJİTAL DİŞ HEKİMLİĞİNDE EKLEMELİ ÜRETİM: 3D BASKI TEKNOLOJİSİ

Editör

Dr. Öğr. Üyesi Elif Reyhan DURAK



**DİJİTAL DİŞ HEKİMLİĞİNDE
EKLEMELİ ÜRETİM:
3D BASKI TEKNOLOJİSİ**

Editör

Dr. Öğr. Üyesi Elif Reyhan DURAK



***Dijital Diş Hekimliğinde Eklemeli Üretim:
3D Baskı Teknolojisi***
Editör: Dr. Öğr. Üyesi Elif Reyhan DURAK

Genel Yayın Yönetmeni: Berkan Balpetek
Kapak ve Sayfa Tasarımı: Duvar Design
Baskı: Ağustos 2025
Yayıncı Sertifika No: 49837
ISBN: 978-625-5698-12-4

© Duvar Yayınları
853 Sokak No:13 P.10 Kemeraltı-Konak/İzmir Tel: 0
232 484 88 68

www.duvar yayinlari.com
duvarkitabevi@gmail.com

İÇİNDEKİLER

1. Bölüm 5

Diş Hekimliğinde

3D Baskı Teknolojileri ve Kullanım Alanları

Alpaslan Can ÇELİK, Furkan KOZAKOĞLU

2. Bölüm 22

3D Yazıcıların Restoratif ve

Protetik Diş Hekimliğindeki Kullanım Alanları

Alpaslan Can ÇELİK, Furkan KOZAKOĞLU

3. Bölüm 35

Diş Hekimliğinde 3 Boyutlu Yazıcı Türleri

Furkan KOZAKOĞLU, Alpaslan Can ÇELİK

4. Bölüm 44

Diş Hekimliğinde 3 Boyutlu Baskı İçin Kullanılan Materyaller

Furkan KOZAKOĞLU, Alpaslan Can ÇELİK

Bölüm 1

Diş Hekimliğinde 3D Baskı Teknolojileri ve Kullanım Alanları

Alpaslan Can ÇELİK¹, Furkan KOZAKOĞLU²

Eklemeli Üretim Sistemlerinin ve 3D Yazıcıların Gelişimi

Bilgisayar destekli tasarım (CAD) ve bilgisayar destekli üretim (CAM) teknolojilerinin diş hekimliğinde kullanımında son yıllarda kayda değer gelişmeler yaşanmıştır (1). Bu gelişmeler yeni materyallerin ortaya çıkmasını, iş akışının dijitalleşmesini ve otomasyonunu sağlamıştır (2). Geleneksel laboratuvar prosedürleri, günümüzde “dijital iş akışı” ile yer değiştirmeye başlamıştır. Bu iş akışı; dijital tarayıcılar ile taranan nesnenin geometrisinin dijital dosyaya dönüştürülmesi ve veri eldesi; verilerin işlenmesi ve bilgisayar destekli tasarım (CAD); hacimsel verinin bilgisayar destekli üretimi (CAM) şeklinde üç ana unsurdan oluşmaktadır (3). Yakın zamana kadar diş hekimliğinde CAM süreci, subtraktif imalat süreci ile neredeyse aynı anlama gelmekteydi.

Subtraktif (eksiltmeli üretim) sürecinde, özel aletler kullanılarak bir bloktan freze yöntemi ile nesne elde edilir ancak restorasyon detayları kullanılan en küçük frez çapına bağlıdır ve bu bir dezavantaj oluşturur. Subtraktif üretim, işlenemeyen materyal ve frezeleme araçlarında deformasyon ve israfa neden olur; ayrıca materyalde çeşitli defektler oluşturarak stres bölgeleri oluşmasına yol açar (4). Bilgisayar kontrollü frezeleme ile materyal kaybı %90’ı bulabilir (5). Ayrıca subtraktif teknikte, karmaşık geometrilerin üretiminde çeşitli sınırlamalar mevcuttur.

¹ Uzm. Dt. ,Selçuk Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi Restoratif Diş Tedavisi Anabilim Dalı, ORCID: 0009-0008-9542-8566

² Uzm. Dt. , Selçuk Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi Restoratif Diş Tedavisi Anabilim Dalı, ORCID: [0000-0001-9908-0511](https://orcid.org/0000-0001-9908-0511)

Kullanılan aletlerin tekrar tekrar kullanılması sonucu aşınması da, üretilen parçalarda çatlak oluşumuna yol açabilmektedir (2).

CAD dosyalarının üretiminde alternatif bir yöntem ise eklemeli üretim (additive manufacturing) süreçleridir (2). Eklemeli üretim tekniği, yani 3D baskı ya da hızlı prototipleme, dijital iş akışında subtraktif üretime alternatif olarak önerilmiştir (6). Bu üretim yaklaşımı, 3D dijital verilerden , katmanlar hâlinde, polimerler (rezinler ve termoplastikler), mum, metaller ve seramikler gibi farklı hammaddeler kullanılarak yapıların üretilmesini içerir. Eklemeli üretim; karmaşık boyut ve geometrilere sahip nesnelerin üretilmesi, malzeme israfının %40'a kadar azaltılabilmesi ve frez uçlarının sağlayabileceğinden daha ince detayların yeniden üretilmesi gibi birçok avantaj sunmaktadır (7).

Terim olarak 3D baskı genellikle nesneleri tek seferde bir katman olacak şekilde oluşturan, nesneyi oluşturmak için çok sayıda katman ekleyen bir üretim yaklaşımını tanımlamak için kullanılır. Bu süreç daha doğru bir şekilde katmanlı üretim (additive manufacturing) olarak tanımlanır ve hızlı prototipleme olarak da adlandırılır (8). İlk CAD programlarının geliştirilmesiyle birlikte 1980'lerden itibaren 3D baskı alanında deneyler yapılmış, 1986'da Chuck Hull, stereolitografik baskı için aldığı patentle 3D yazıcıların mucidi olarak tarihe geçmiştir (2).

Mühendislik alanında lisans derecesine sahip olan Hull, Kaliforniya'daki Ultra Violet Products şirketinde fotopolimerlerden plastik nesnelerin üretimi üzerine çalışıyordu (9). Hull daha sonra 3D Systems adlı şirketi kurmuş ve bu şirket, "stereolitografi cihazı" olarak bilinen ilk 3D yazıcıyı geliştirmiştir. 1988'de 3D Systems, ilk ticari 3D yazıcı olan SLA-250'yi piyasaya sürmüştür. O tarihten sonra, DTM Corporation, Z Corporation, Solidscape ve Objet Geometries gibi birçok şirket de ticari uygulamalar için 3D yazıcılar geliştirmiştir (9).

Farklı eklemeli süreçlere ait patentlerin koruma altında olması yüksek maliyetlere yol açmış ve bu teknolojilerin hızla yaygınlaşmasını engellemiştir. Ancak önemli patentlerin birkaç yıl önce sona ermesiyle birlikte, eklemeli üretim yöntemlerinin ticari ve endüstriyel kullanımı daha düşük maliyetlerle artmış ve gelişmiştir (2).

Stereolitografi, bir CAD dosyasındaki verileri yorumlamak için .stl dosya formatını kullanır; böylece bu talimatların elektronik olarak 3D yazıcıya iletilmesini sağlar. Şeklin yanı sıra, .stl dosyasındaki talimatlar basılacak nesnenin rengi, dokusu ve kalınlığı gibi bilgileri de içerebilir (9).

3D baskının temelinde, bir 3D CAD dosyasında nesnenin yüzeyinin eksiksiz bir tanımı bulunur. Bu nesne, genellikle STL (Stereolithography, Standard Transformation Language, Surface Tessellation Language veya Standard Triangulation Language) formatında kapalı formatta bir dosya olarak sunulur. STL formatı, 3D cisimlerin yüzeyini üçgenler aracılığıyla tanımlar. Eğrisel yüzeyler çokgenlerle yaklaşık olarak modellenir. Çokgen sayısı arttıkça hata azalır ve yüzey daha yüksek çözünürlükle tanımlanır. Baskı öncesinde CAM yazılımı STL dosyasını yatay katmanlara (xy düzleminde) ayırır (slicing). Bu dilimlerden elde edilen G kodu, yazıcıya gönderilecek makine komutlarını içerir. Katman kalınlığı azaldıkça nesnenin yüzeyi daha pürüzsüz olur ancak baskı süresi uzar. Yazıcının çözünürlüğü, katman kalınlığı ve özellikle z-ekseni hassasiyeti ile belirlenir. Eklemeli üretim yüzeylerinde basamaklı bir görünüm karakteristiktir (2).

Subtraktif yöntemlere kıyasla eklemeli yöntemler malzeme tasarrufu sağlar ve daha karmaşık geometrilerin üretimine olanak tanır. Bu nedenle eklemeli üretim yöntemi, diş hekimliği alanında uygun bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. Eklemeli imalat, subtraktif üretim yöntemlerinin dezavantajlarını ortadan kaldırma potansiyeline sahiptir (10-12). Bununla birlikte, üç boyutlu sistemlerin gelişimini sınırlandıran bazı faktörler de vardır. Özellikle estetik görünüm, aşınma direnci ve boyutsal doğruluk, 3D baskının tam işlevsel parçaların üretiminde yaygın bir şekilde kullanılmasının önünde önemli engeller oluşturmaktadır. Bu sınırlamalar, 3D baskı teknolojisinin prototipleme ve kısa süreli kullanım alanlarından endüstriyel ve klinik anlamda daha kalıcı çözümlere geçişini yavaşlatmaktadır. (1). Eklemeli teknolojilerin gelişimi ve klinik uygulanabilirliği, üretim sürecindeki çeşitli değişkenlerin (yapım açısı/yönü, support boyutu ve dağılımı, basılan parçaların platform üzerindeki konumu (7)) kontrol edilmesine; ayrıca yazıcılar ve baskı malzemelerine ilişkin parametrelerin geliştirilmesine bağlıdır (1). Bu değişkenler; baskı doğruluğu,

dayanıklılık, yüzey morfolojisi ve bakteriyel yanıt gibi birçok özelliği etkilemektedir (13, 14).

1990’larda tıp alanında üç boyutlu modellerin üretilmesi, tanı ve cerrahi planlamanın geliştirilmesi, cerrahi risklerin azaltılması gibi girişimlerle başlayan bu teknoloji, günümüzde diş hekimliğinin birçok alanına yayılmıştır (8, 15-18).

3D Baskı ve Diş Hekimliğindeki Kullanım Alanları

Mekanik açıdan bakıldığında, 3D yazıcılar genellikle oldukça basit robotik cihazlardır. Cihaz, nesnelerin sanal bir ortamda tasarlanmasına olanak tanıyan bilgisayar destekli tasarım (CAD) yazılımı olmadan hiçbir şey ifade etmez. Bilgisayar destekli tasarım (CAD) yazılımları, endüstriyel tasarım, mühendislik ve üretim alanlarında uzun süredir yaygın olarak kullanılmaktadır. Günümüzde ise bu yazılımlar, diş hekimliği laboratuvarlarında da standart hale gelmiş, hatta birçok diş hekimliği muayenhanesinde de kullanılmaktadır. Bilgisayar teknolojisi ve yazılım uygulamalarındaki gelişmeler, 3D baskıyı bugün bulunduğu noktaya getiren teknolojik değişimin önemli bir parçasıdır (6).

3D baskının değerli olabilmesi için, basılacak nesneleri oluşturabilmemiz gerekir; CAD yazılımı nesneleri sıfırdan oluşturmamıza olanak tanır (19, 20), ancak diş hekimliği ve cerrahide ayrıca bilgisayarlı tomografi (CT) verileri, konik ışınlı bilgisayarlı tomografi (CBCT) verileri ve ağız içi veya laboratuvar tarayıcıları ile hacimsel veriler kolayca elde edilebilir. Özellikle CBCT ve tarama teknolojisindeki son gelişmeler, restoratif diş hekimliğinde ve implantolojide önemli değişimlere neden olmuştur.

Eksiltmeli üretim (21) (subtractive manufacturing), uzun süredir diş hekimliğinde kullanılmaktadır. Eksiltme esaslı üretim, materyalden eksiltme yapılarak bir nesne oluşturulmasıdır. Kron altyapıları ve köprü iskeletlerinin freze kullanılarak şekillendirilmesinde CAD-CAM kullanımı artık modern diş teknolojisi ile eşanlamlıdır (20). Modern diş hekimliğinde, CAD-CAM ile uyumlu ve geleneksel değerli metal döküm alaşımlarının yerini alan materyaller uzun süredir kullanılmaktadır (22). Bu teknoloji, çalışılması zor olan materyallerin kullanılmasını

kolaylaştırır ve iş gücü yoğun el yapımı üretim tekniklerini ortadan kaldırır veya modifiye eder (23), böylece diş teknisyeninin el becerilerini üretim sürecinin daha yaratıcı yönlerine, örneğin porselenin tabakalanarak estetik işler oluşturulmasına olanak tanır.

Elbette, bir diş hekimi her restoratif işlemi yaptığında, işlem o hastaya, o çeneye, o dişe veya o implanta özeldir. Rekonstrüksiyon veya restorasyon aynı zamanda yüksek hassasiyet gerektiren karmaşık bir geometriyi yeniden üretmeyi gerektirir (24). Çok eksenli CAD/CAM frezeleme işlemleri kısmen çözüm sunsa da (17), süreç görece yavaş ilerlemekte ve önemli ölçüde materyal kaybına neden olabilmektedir. Bu durum, materyalin bütün bir bloktan frezelenme zorunluluğu ile ilişkilidir ve elde edilen doğruluk; nesnenin karmaşıklığı, frez boyutu ve materyal özellikleri tarafından sınırlandırılmaktadır (25).

Tıbbi Modelleme

3D baskının cerrahideki en erken uygulamalarından biri olan tıbbi modelleme, anatomik bir “çalışma modeli” üretimi olarak düşünülebilir (26). Son yıllarda diş hekimliğinde yaygınlaşan bir başka önemli teknoloji bu durumu daha erişilebilir kılmıştır. Konik ışınlı bilgisayarlı tomografi (CBCT), diş hekimliği kliniklerinde yaygın olarak kullanılmakta (27, 28) ve implantoloji (29, 30) ile endodontide (31-33) tanı ve tedavi yaklaşımlarını önemli ölçüde değiştirmektedir. Bilgisayarlı tomografi (CT)’ye (benzer veriler sağlar ve daha yaygın kullanıma sahiptir) veya CBCT’ye kolay erişim, cerrahiden önce bir 3D yazıcıya hacimsel “görüntü” verisi sağlanmasını ve çenelerin ayrıntılı kopyalarının oluşturulmasını mümkün kılar. Bu, özellikle karmaşık ve alışılmadık anatomiyi dikkatlice incelemeyi ve cerrahi yaklaşımın cerrahiden önce planlanmasını veya uygulanmasını sağlar (34, 35). Bu gelişmeler, yeni prosedürlerin ve cerrahi yaklaşımların ortaya çıkmasına zemin hazırlamış (36) ve 3D baskı teknolojisi ya da geleneksel laboratuvar yöntemleriyle üretilen cerrahi kılavuzların kullanımı sayesinde cerrahilerin daha hızlı, daha minimal invaziv ve daha öngörülebilir hale gelmesini sağlamıştır (37, 38).

Tablo 1: 3D baskı teknolojilerinin kullanım alanları (39)

Uzmanlık Alanı	Uygulamalar	Teknoloji	Avantajlar
Protetik Diş Tedavisi	Kronlar ve sabit bölümlü protezler	SLA, DLP, fotopolimer püskürtme	Düşük maliyet; Süreyi azaltma; İyi uyum; Yüksek hassasiyet
	Tam protezler	SLA, DLP	Daha az laboratuvar basamağı; Yüksek doğruluk; Yakın uyum; Hasta uyumu iyi
	Hareketli bölümlü protezler	SLS, SLM, EBM	Üretim süresi ve maliyetini azaltma; Operasyon hatalarını en aza indirme; Yüksek doğruluk; İyi marjinal uyum; İyi mekanik özellikler
İmplantoloji	Cerrahi kılavuz	SLA, DLP, fotopolimer püskürtme	Operasyon hatalarını azaltma; Basit kullanım; Doğruluk/hassaslık
	Özel ölçü kaşığı	SLA, FDM	Yüksek verimlilik; Yüksek doğruluk
Ağız ve Çene-Yüz Cerrahisi	Cerrahi kılavuz ve şablon	SLA, DLP, fotopolimer püskürtme	Yüksek doğruluk; Operasyon süresini azaltma; Operasyon hatalarını/komplikasyonlarını en aza indirme
	Kişiyeye özel implantlar	SLS, fotopolimer püskürtme	Yüksek mekanik özellikler; Ayarlanabilir pürüzlülük
	Maksillofasiyal protezler	SLA, fotopolimer püskürtme, SLS, FDM	Hasta konforu; Hassas; Daha yüksek doğruluk ve daha iyi uyum
Ortodonti	Şeffaf plaklar (aligner)	SLA, DLP, FDM	Hassas; Öngörülebilir; Üretim süresini azaltma; Maliyet tasarrufu
	Ortodontik apareyler	SLA	İyi mekanik özellikler
Endodonti	Cerrahi kılavuz	SLA, fotopolimer püskürtme	Daha az invaziv; Zaman tasarrufu; Operasyon hatalarını/komplikasyonları azaltma
Periodontoloji	Sert ve yumuşak doku rejenerasyonu için iskele yapıları	LAB	Hassas; İskeletlerin kemik yüzeyleriyle daha yakın teması; Daha büyük miktarlarda üretim; Daha karmaşık tasarımlara izin verme; Yüksek doğruluk; Ameliyat sonrası rahatsızlığı azaltma
	Gingivektomi cerrahi kılavuzu	SLA, DLP, fotopolimer püskürtme	Hassas; Kişiyeye özel; Yüksek doğruluk

Tıbbi modellemede doğruluk, çoğunlukla kullanılan görüntüleme tekniği ve dişler, restorasyonlar veya implantlar gibi metal yapılardan kaynaklanan artefaktlarla sınırlıdır (40). Bununla birlikte, bu doğruluk düzeyi pek çok cerrahi uygulama açısından klinik olarak kritik olmayabilir. Çeşitli 3D yazıcılar ve 3D baskı materyalleri tıbbi modellerin basılmasında kullanılabilir, ancak bu tür modellerin ameliyathane ortamında kullanılabilme gerekliliğinden dolayı naylon gibi sterilize edilebilen malzemeler özellikle ilgi çekicidir (41). 3D teknolojisinde kullanılan araçların sağlam ve hassas olması, ayrıca cerrahi bir ortamda kullanıldığında sterilizasyona uygun veya dezenfekte edilebilmesi gerekir (42). İmplant diş hekimliğinde cerrahi implant stentlerinin kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır (43) ve benzer şekilde bu teknoloji, ortopedide total diz protezlerinde de benimsenmiştir (44). Cerrahi kılavuzların kullanılması, yazılım ekranında oluşturulan sanal bir 3D planın cerrahi operasyon sahasına aktarılmasına olanak tanır (45, 46), ve bu nedenle sanal plan ile fiziksel hasta arasında bir arayüz olarak düşünülebilir.

Tarama yöntemi, kullanılan yazılım ve artefaktların varlığından kaynaklanan hatalar, özellikle dental implant uygulamaları ya da protezlerin tam uyum gerektirdiği durumlarda klinik açıdan kritik önem taşıyabilmektedir. (47). İmplant delme kılavuzları için yüksek çözünürlüklü baskı malzemelerinin kullanılması gerekse de ne yazık ki bu amaçla kullanılabilecek en iyi materyallerin bazıları otoklavlanabilir değildir.

Dental İmplantlar

Üreticiler, gözenekli veya pürüzlü yüzeye sahip yeni dental implantlar oluşturmak için 3D baskı teknolojisini kullanmıştır (46, 48). Bununla birlikte, karmaşık dental implant serilerinin üretiminde 3D baskı, frezeleme ile elde edilmesi mümkün olmayan kemiksi morfoloji gibi karmaşık geometrilerin üretilmesine olanak tanır. Ancak frezeleme teknikleri, basılı formun iyileştirilmesi ve örneğin implant platformunun geliştirilmesi amacıyla tamamlayıcı olarak kullanılabilir. Ayrıca, karmaşık geometrilere sahip

implantların tasarlanması mümkündür; ancak nihayetinde dental implantların vida formunda yerleştirilmesi, etkinliği kanıtlanmış güvenilir bir yöntem olarak kabul edilmektedir (6).

Oral Maksilofasiyal (OMF) İmplantlar

Titanyum veya implant üretimine uygun polimerler ile (özellikle polietilen eter keton [PEEK] (49)) baskı yapılabilmesi, maksillofasiyal implantlar üretilme fikrini gündeme getirmiş ve büyük ilgi görmüştür (50, 51).

3D baskı, karmaşık geometrilerin üretimine imkân tanısa da, çoğu OMF implantı aslında oldukça basit formlara sahiptir. Presleme ve frezeleme teknolojileri; daha az ek işlem gerektirmesi, hızlı üretim sağlaması ve homojen ile tutarlı malzemelerin öngörülebilir şekilde kullanılabilmesi gibi birçok avantaja sahiptir. Bununla birlikte, 3D baskı hem implante edilecek yapının doğrudan basımı için hem de geleneksel presleme sürecine yardımcı olan dolaylı bir üretim aracı olarak kullanılabilir. (6).

Ürün Tasarımı ve Alet Üretimi

3D baskı, yenilikçi insanların bir fikri çok kısa sürede hayata geçirmesini sağlayan hızlı prototip oluşturma sürecinde rol oynar. Klinikte kullanılan çeşitli aletlerin üretilmesinde veya tamirinde 3D baskı teknolojisi kullanılabilir.

3D baskı teriminin bu kadar ilgi çekmesinin nedeni, muhtemelen teknolojinin tasarımcıya kavramsal bir fikri hızla prototipe dönüştürme olanağı sağlamasıdır. Bununla birlikte, işlevsel mekanik özelliklere sahip malzemelerle çalışıldığında baskı süreci aslında oldukça yavaş ve maliyetlidir. Yazarlar, günlük klinik uygulamalarda kullanılan çeşitli yenilikçi ya da standart cihazların prototiplerini geliştirmek için 3D baskıyı kullanmıştır (6).

Dijital Ortodonti

Ortodontide tedavi planlanabilir ve apareyler oluşturulabilir veya hastanın verilerini toplamak için ağız içi ya da laboratuvar optik tarama ya da CBCT

kullanılarak elde edilen dijital iş akışına dayanarak robotik olarak tel bükümü yapılabilir.

Invisalign® sistemi, hastanın dişlerini dijital olarak hizalayarak “aligner”ların üretimi için bir dizi 3D baskılı model oluşturur; bu aligner’lar dişleri aylar/yıllar boyunca kademeli olarak yeniden konumlandırır.

Çoklu materyal ile yapılan baskıya bir örnek, rijit ve esnek materyallerin birlikte kullanılmasıyla üretilen, ortodontik CAD yazılımı (3Shape) aracılığıyla tasarlanmış ve braketlerin hassas konumlandırılması için kullanılan 3D baskılı indirekt braket yapıştırma splintleridir (52). Hasta verilerinin internet üzerinden aktarılması ve gülüş tasarımının yazılım ortamında yapılmasıyla önemli ölçüde zaman tasarrufu sağlanabilmektedir. Ayrıca, hasta verileri dijital olarak arşivlenebilir ve yalnızca ihtiyaç duyulduğunda basılarak kullanılabilir; bu durum, fiziksel depolama alanı gereksinimlerinde kayda değer bir azalma sağlamaktadır.

Diş Hekimliği Eğitimi

Geleneksel öğretim yöntemlerine kıyasla, çağdaş öğretim tekniklerine olan ihtiyaç artmıştır. Bu bağlamda, 3 boyutlu sistem ile üretilmiş dişler eğitimde değerli bir araç olarak öne çıkmaktadır (53).

Önceki çalışmalar, bu modellerin; öğrencilerin dokunsal açıdan öğrenmesini desteklediğini, diş morfolojisi ve restoratif diş hekimliği öğretiminde etkili olduğunu göstermiştir (54, 55) .

Chevalier ve arkadaşları, 3D teknoloji ile üretilmiş dişlerin kaygı ve stres seviyelerini düşürdüğünü ve özgüveni artırdığını rapor etmiştir (56).

3D modeller, çekilmiş dişler ve ticari modellerle karşılaştırıldığında yüksek simülasyon gerçekliği ve öğrenme potansiyeli sunmuştur (55).

Restoratif ve Protetik Diş Tedavileri

3D baskının protetik ve restoratif diş hekimliğindeki uygulamaları arasında geçici ve daimi restorasyonlar, oklüzal splintler, tam protezler ile tanısal ve

yardımcı apareyler yer almaktadır (57-59). Her ne kadar önceki çalışmalar ürünlerin mekanik özelliklerinin genellikle daha düşük olduğunu göstermiş olsa da; 3D baskı teknolojisi, daha gelişmiş materyallerin elde edilebileceği umut verici bir bilimsel ve teknolojik alan olarak görülmektedir (60).

Konvansiyonel yöntemlerle karşılaştırıldığında, bilgisayar destekli üretim; ölçü, mum modelajı ve döküm gibi hata potansiyeli yüksek aşamaları ortadan kaldırma avantajına sahiptir (61-63). Hata ihtimali olan işlemlerin azalmasının protezin hassasiyetini artırdığı düşünülmektedir. Ayrıca modelleme ve üretimin manuel süreçler olmaması, genel üretim süresini ve maliyeti azaltmaktadır (64).

KAYNAKÇA

1. Della Bona A, Cantelli V, Britto VT, Collares KF, Stansbury JW. 3D printing restorative materials using a stereolithographic technique: a systematic review. *Dent Mater*. 2021;37(2):336-50.
2. Kessler A, Hickel R, Reymus M. 3D Printing in Dentistry-State of the Art. *Oper Dent*. 2020;45(1):30-40.
3. Barazanchi A, Li KC, Al-Amleh B, Lyons K, Waddell JN. Additive Technology: Update on Current Materials and Applications in Dentistry. *J Prosthodont*. 2017;26(2):156-63.
4. Corazza PH, de Castro HL, Feitosa SA, Kimpara ET, Della Bona A. Influence of CAD-CAM diamond bur deterioration on surface roughness and maximum failure load of Y-TZP-based restorations. *Am J Dent*. 2015;28(2):95-9.
5. Strub JR, Rekow ED, Witkowski S. Computer-aided design and fabrication of dental restorations: current systems and future possibilities. *J Am Dent Assoc*. 2006;137(9):1289-96.
6. Dawood A, Marti Marti B, Sauret-Jackson V, Darwood A. 3D printing in dentistry. *Br Dent J*. 2015;219(11):521-9.
7. Alharbi N, Wismeijer D, Osman RB. Additive Manufacturing Techniques in Prosthodontics: Where Do We Currently Stand? A Critical Review. *Int J Prosthodont*. 2017;30(5):474–84.
8. Torabi K, Farjood E, Hamedani S. Rapid Prototyping Technologies and their Applications in Prosthodontics, a Review of Literature. *J Dent (Shiraz)*. 2015;16(1):1-9.
9. Gross BC, Erkal JL, Lockwood SY, Chen C, Spence DM. Evaluation of 3D printing and its potential impact on biotechnology and the chemical sciences. *Anal Chem*. 2014;86(7):3240-53.
10. İkinici B. Manufacturing methods of functionally graded materials: a comprehensive review. *Journal of Ceramics and Composites*. 2025;1(1):6-20.
11. Tay B, Evans J, Edirisinghe M. Solid Freeform Fabrication of Ceramics. *International Materials Reviews*. 2003;48:341-70.

12. Noguera R, Lejeune M, Chartier T. 3D Fine Scale Ceramic Components Formed by Ink-Jet Prototyping Process. *Journal of The European Ceramic Society - J EUR CERAM SOC.* 2005;25:2055-9.
13. Dikova T, Dzhendov D, Ivanov D, Bliznakova K. Dimensional accuracy and surface roughness of polymeric dental bridges produced by different 3D printing processes. *Archives of Materials Science and Engineering.* 2018;94(2):65-75.
14. Shim JS, Kim JE, Jeong SH, Choi YJ, Ryu JJ. Printing accuracy, mechanical properties, surface characteristics, and microbial adhesion of 3D-printed resins with various printing orientations. *J Prosthet Dent.* 2020;124(4):468-75.
15. Klein HM, Schneider W, Alzen G, Voy ED, Günther RW. Pediatric craniofacial surgery: comparison of milling and stereolithography for 3D model manufacturing. *Pediatr Radiol.* 1992;22(6):458-60.
16. Potamianos P, Amis AA, Forester AJ, McGurk M, Bircher M. Rapid prototyping for orthopaedic surgery. *Proc Inst Mech Eng H.* 1998;212(5):383-93.
17. Petzold R, Zeilhofer HF, Kalender WA. Rapid prototyping technology in medicine--basics and applications. *Comput Med Imaging Graph.* 1999;23(5):277-84.
18. Webb PA. A review of rapid prototyping (RP) techniques in the medical and biomedical sector. *J Med Eng Technol.* 2000;24(4):149-53.
19. van Noort R. The future of dental devices is digital. *Dent Mater.* 2012;28(1):3-12.
20. Miyazaki T, Hotta Y. CAD/CAM systems available for the fabrication of crown and bridge restorations. *Aust Dent J.* 2011;56 Suppl 1:97-106.
21. Azari A, Nikzad S. The evolution of rapid prototyping in dentistry: A review. *Rapid Prototyping Journal.* 2009;15:216-25.
22. Bammani S, Birajdar P, Metan S, Metan S. Application of CAD and SLA Method in Dental Prosthesis. 2013.

23. Venkatesh KV, Nandini VV. Direct metal laser sintering: a digitised metal casting technology. *J Indian Prosthodont Soc.* 2013;13(4):389-92.
24. Witkowski S, Komine F, Gerds T. Marginal accuracy of titanium copings fabricated by casting and CAD/CAM techniques. *J Prosthet Dent.* 2006;96(1):47-52.
25. Sykes LM, Parrott AM, Owen CP, Snaddon DR. Applications of rapid prototyping technology in maxillofacial prosthetics. *Int J Prosthodont.* 2004;17(4):454-9.
26. Kurenov SN, Ionita C, Sammons D, Demmy TL. Three-dimensional printing to facilitate anatomic study, device development, simulation, and planning in thoracic surgery. *J Thorac Cardiovasc Surg.* 2015;149(4):973-9.e1.
27. Adibi S, Zhang W, Servos T, O'Neill PN. Cone beam computed tomography in dentistry: what dental educators and learners should know. *J Dent Educ.* 2012;76(11):1437-42.
28. Scarfe WC, Farman AG, Sukovic P. Clinical applications of cone-beam computed tomography in dental practice. *J Can Dent Assoc.* 2006;72(1):75-80.
29. Chan HL, Misch K, Wang HL. Dental imaging in implant treatment planning. *Implant Dent.* 2010;19(4):288-98.
30. Worthington P, Rubenstein J, Hatcher DC. The role of cone-beam computed tomography in the planning and placement of implants. *J Am Dent Assoc.* 2010;141 Suppl 3:19s-24s.
31. Kiarudi AH, Eghbal MJ, Safi Y, Aghdasi MM, Fazlyab M. The applications of cone-beam computed tomography in endodontics: a review of literature. *Iran Endod J.* 2015;10(1):16-25.
32. Durack C, Patel S. Cone beam computed tomography in endodontics. *Braz Dent J.* 2012;23(3):179-91.
33. Patel S. New dimensions in endodontic imaging: Part 2. Cone beam computed tomography. *Int Endod J.* 2009;42(6):463-75.

34. Sinn DP, Cillo JE, Jr., Miles BA. Stereolithography for craniofacial surgery. *J Craniofac Surg.* 2006;17(5):869-75.
35. Van Assche N, van Steenberghe D, Guerrero ME, Hirsch E, Schutyser F, Quirynen M, et al. Accuracy of implant placement based on pre-surgical planning of three-dimensional cone-beam images: a pilot study. *J Clin Periodontol.* 2007;34(9):816-21.
36. Dawood A, Tanner S, Hutchison I. Computer guided surgery for implant placement and dental rehabilitation in a patient undergoing sub-total mandibulectomy and microvascular free flap reconstruction. *J Oral Implantol.* 2013;39(4):497-502.
37. Sanna A, Molly L, van Steenberghe D. Immediately loaded CAD–CAM manufactured fixed complete dentures using flapless implant placement procedures. *The Journal of prosthetic dentistry.* 2007;97:331-9.
38. Tardieu PB, Vrielinck L, Escolano E, Henne M, Tardieu AL. Computer-assisted implant placement: scan template, simplant, surgiguide, and SAFE system. *Int J Periodontics Restorative Dent.* 2007;27(2):141-9.
39. Jeong M, Radomski K, Lopez D, Liu JT, Lee JD, Lee SJ. Materials and Applications of 3D Printing Technology in Dentistry: An Overview. *Dent J (Basel).* 2023;12(1).
40. Salmi M, Paloheimo KS, Tuomi J, Wolff J, Mäkitie A. Accuracy of medical models made by additive manufacturing (rapid manufacturing). *J Craniomaxillofac Surg.* 2013;41(7):603-9.
41. Liang X, Lambrichts I, Sun Y, Denis K, Hassan B, Li L, et al. A comparative evaluation of Cone Beam Computed Tomography (CBCT) and Multi-Slice CT (MSCT). Part II: On 3D model accuracy. *Eur J Radiol.* 2010;75(2):270-4.
42. Ersoy AE, Turkyilmaz I, Ozan O, McGlumphy EA. Reliability of implant placement with stereolithographic surgical guides generated from computed tomography: clinical data from 94 implants. *J Periodontol.* 2008;79(8):1339-45.

43. Fortin T, Champleboux G, Lormée J, Coudert JL. Precise dental implant placement in bone using surgical guides in conjunction with medical imaging techniques. *J Oral Implantol*. 2000;26(4):300-3.
44. Krishnan SP, Dawood A, Richards R, Henckel J, Hart AJ. A review of rapid prototyped surgical guides for patient-specific total knee replacement. *J Bone Joint Surg Br*. 2012;94(11):1457-61.
45. Flügge TV, Nelson K, Schmelzeisen R, Metzger MC. Three-dimensional plotting and printing of an implant drilling guide: simplifying guided implant surgery. *J Oral Maxillofac Surg*. 2013;71(8):1340-6.
46. Chen J, Zhang Z, Chen X, Zhang C, Zhang G, Xu Z. Design and manufacture of customized dental implants by using reverse engineering and selective laser melting technology. *J Prosthet Dent*. 2014;112(5):1088-95.e1.
47. Wakjira Y, Kurukkal NS, Lemu HG. Assessment of the accuracy of 3D printed medical models through reverse engineering. *Heliyon*. 2024;10(11):e31829.
48. Xiong Y, Qian C, Sun J. Fabrication of porous titanium implants by three-dimensional printing and sintering at different temperatures. *Dent Mater J*. 2012;31(5):815-20.
49. Quirynen M, Abarca M, Van Assche N, Nevins M, van Steenberghe D. Impact of supportive periodontal therapy and implant surface roughness on implant outcome in patients with a history of periodontitis. *J Clin Periodontol*. 2007;34(9):805-15.
50. Farré-Guasch E, Wolff J, Helder MN, Schulten EA, Forouzanfar T, Klein-Nulend J. Application of Additive Manufacturing in Oral and Maxillofacial Surgery. *J Oral Maxillofac Surg*. 2015;73(12):2408-18.
51. Parthasarathy J. 3D modeling, custom implants and its future perspectives in craniofacial surgery. *Ann Maxillofac Surg*. 2014;4(1):9-18.
52. Ciuffolo F, Epifania E, Duranti G, De Luca V, Raviglia D, Rezza S, et al. Rapid prototyping: a new method of preparing trays for indirect bonding. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*. 2006;129(1):75-7.

53. Oberoi G, Nitsch S, Edelmayr M, Janjić K, Müller AS, Agis H. 3D Printing-Encompassing the Facets of Dentistry. *Front Bioeng Biotechnol.* 2018;6:172.
54. Wang H, Xu H, Zhang J, Yu S, Wang M, Qiu J, et al. The effect of 3D-printed plastic teeth on scores in a tooth morphology course in a Chinese university. *BMC Med Educ.* 2020;20(1):469.
55. Dobroś K, Hajto-Bryk J, Zarzecka J. The 3D printed teeth models intended for hands-on practice in conservative dentistry. *Folia Med Cracov.* 2022;62(1):29-41.
56. Chevalier V, Dessert M, Fouillen KJ, Lennon S, Duncan HF. Preclinical 3D-printed laboratory simulation of deep caries and the exposed pulp reduced student anxiety and stress, while increasing confidence and knowledge in vital pulp treatment. *Int Endod J.* 2022;55(8):844-57.
57. Azpiazu-Flores FX, Leyva Del Rio D, Schricker SR, Johnston WM, Lee DJ. Effect of three-dimensionally printed surface patterns on the peak tensile load of a plasticized acrylic-resin resilient liner. *J Prosthet Dent.* 2024;131(4):735-40.
58. Azpiazu-Flores FX, Knobloch LA, Larsen PE. Interdisciplinary Management of a Patient with Dentinogenesis Imperfecta Type II Using a Combination of CAD-CAM and Analog Techniques: A Clinical Report. *J Prosthodont.* 2022;31(8):647-54.
59. Jockusch J, Özcan M. Additive manufacturing of dental polymers: An overview on processes, materials and applications. *Dent Mater J.* 2020;39(3):345-54.
60. Prpic V, Spehar F, Stajdohar D, Bjelica R, Cimic S, Par M. Mechanical Properties of 3D-Printed Occlusal Splint Materials. *Dent J (Basel).* 2023;11(8).
61. Miyazaki T, Hotta Y. CAD/CAM systems available for the fabrication of crown and bridge restorations. *Australian dental journal.* 2011;56:97-106.

62. Beuer F, Schweiger J, Edelhoff D. Digital dentistry: an overview of recent developments for CAD/CAM generated restorations. *British dental journal*. 2008;204(9):505-11.
63. Abduo J, Lyons K. Rationale for the use of CAD/CAM technology in implant prosthodontics. *International journal of dentistry*. 2013;2013(1):768121.
64. Abduo J, Lyons K, Bennamoun M. Trends in computer-aided manufacturing in prosthodontics: a review of the available streams. *Int J Dent*. 2014;2014:783948.

Bölüm 2

3D Yazıcıların Restoratif ve Protetik Diş Hekimliğindeki Kullanım Alanları

Alpaslan Can ÇELİK¹, Furkan KOZAKOĞLU ²

Restoratif ve protetik diş hekimliğinde bilgisayar destekli üretimin ilk uygulaması, dişlere simante edilen sabit protezlerin üretimi olmuştur (1-5). Daha sonra sistemler implant bileşenleri ve protezlerin üretimini de kapsayacak şekilde geliştirilmiştir (6, 7). Günümüzde protez yapımında bilgisayarlı teknolojilerin kullanımı kabul gören bir tedavi yaklaşımıdır. Seramikler, metaller (bazı metal alaşımlar ve titanyum), rezinler ve mum gibi materyaller mevcut sistemlerle işlenebilmektedir (1, 7, 8).

Restoratif ve protetik alanda 3D baskı, birçok diş hekimliği dalı arasında öncü olmuştur. Kullanım alanları basit inley restorasyonlar ve kronlardan maksillofasiyal protezler gibi daha karmaşık olanlara kadar uzanmaktadır. Yayınlanan çalışmaların çoğu; sabit protezler, interoklüzal kayıtlar, implant destekli kronlar ve tam ağız rehabilitasyonu üzerine odaklanmıştır. Farklı yazıcı modelleri kullanıldığında basılan materyallerin doğruluğu ve kalitesinde farklılıklar gözlemlenmiştir (9, 10).

Bazı klinisyenler iş akışını tamamen dijital teknikler üzerinden yürütürken bazıları dijital ve geleneksel yöntemleri birleştirmiştir. Bu süreçte 3D baskının odağı kobalt-krom (11), zirkonya (12), lityum disilikat (13), silikon ölçü materyalleri (14) ve polilaktik asit geçici materyali (15) gibi farklı materyallere kaymıştır.

¹ Uzm. Dt. ,Selçuk Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi Restoratif Diş Tedavisi Anabilim Dalı, ORCID: 0009-0008-9542-8566

² Uzm. Dt. , Selçuk Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi Restoratif Diş Tedavisi Anabilim Dalı, ORCID: [0000-0001-9908-0511](https://orcid.org/0000-0001-9908-0511)

Geleneksel kayıp mum teknikleri ve bilgisayar kontrollü eksiltmeli üretim yöntemleriyle karşılaştırıldığında, 3D baskı üretim çeşitli avantajlar sunar (16, 17). Avantajları arasında daha yüksek hassasiyet, daha hızlı üretim süreci, maliyet tasarrufu sağlanabilmesi, iş akışının daha standart hale gelmesi, daha düşük CO₂ emisyonu ve daha az atık oluşması, enerji verimliliği ve daha kişiselleştirilmiş hizmetler sunma imkânı sayılabilir (16-19) .

3D baskı ile polimerler, metaller ve seramikler ile çok çeşitli restorasyonların üretimi mümkün olsa da (18, 20) daimi restorasyonlar üretmek için kullanılabilen kompozit malzeme sayısı hala sınırlı sayılabilir (16, 21). Ayrıca literatürde kullanılan materyallerin sınıflandırılmasında çeşitli tutarsızlıklar da mevcuttur. Bazı materyaller Crowntec (Saremco Dental AG) gibi ‘kompozit’ olarak etiketlenirken, bazıları VarseoSmile Crown Plus (Bego) gibi ‘hibrit kompozit’ olarak adlandırılmaktadır.

Dijital diş hekimliği ve klinik çalışmalar, daimi kronlar ve köprüler üretmek için yeni materyallerin gelişimi ile büyük değişimler yaşama potansiyeline sahiptir. Daimi indirekt restorasyonlar için kullanılan baskı materyalleri büyük bir potansiyele sahip olmasına rağmen, hâlâ aktif olarak geliştirilmektedir. Diş hekimliğinde konvansiyonel kompozitler hakkında çok geniş bir bilgi olmasına rağmen, daimi indirekt restorasyonların (örneğin; inley-onleylerin ve kronların) üretiminde kullanılan ticari olarak mevcut 3D baskı için üretilmiş kompozit rezinler ve bunların mekanik özellikleri hakkında sınırlı bilgi bulunmaktadır (22).

2020 yılında, CAD/CAM sistemler; laminate veneerler, kronlar, köprüler, protezler ve obturatör üretiminde yoğun olarak kullanılmıştır. Dijital restoratif diş hekimliği ile ilgili mevcut umut verici verilerle birlikte tüm alanlarda yeni bir yönelim ortaya çıkmakta ve maliyet-zaman etkililiği açısından birçok geleneksel tekniğin yerini almaktadır. Yine de 3D baskının protetik ve restoratif diş hekimliğindeki klinik faydalarını doğrulamak için daha fazla klinik çalışmaya ihtiyaç vardır (23).

Restoratif ve Protetik Diş Hekimliği İçin Dental Modelleme

Ağız içi tarayıcıların yaygınlaşması, diş hekimlerini taranan çenelerin fiziksel modellerini oluşturmak için 3D baskıya yönlendirmektedir. Günümüzde ana modelin basılması her zaman kesinlikle gerekli olmasa da (24) çeşitli amaçlarla kullanılabilir.

3D baskı teknolojisinin dijital diş hekimliğindeki kullanım alanlarından biri aktif tedavi aşamasından önce planlanan tedavinin etkisinin nicel değerlendirilmesidir. Burada yazılımın ölçüm ve sayısal veri haline getirme işlemindeki hassasiyetinden yararlanılır. 3D modeller üzerinde hacimler ve mesafeler tam olarak ölçülebilir (25) ve klinik uygulamada protez yapımından önce diş preparasyonu analiz edilebilir. Bazı durumlarda, yazılım, preparasyon ideal değilse veya restorasyon kalınlığı minimal düzeydeyse, protezin mekanik başarısızlık riskini azaltmak için preparasyonda değişiklik önerebilir. Bu özellik, dijital wax-up ile birleştirilerek, planlanan restorasyonu kolaylaştıracak şekilde preparasyon yapılmasını olanak tanıyabilir (26).

Çeşitli araştırmacılar, hareketli parsiyel protez iskeleti üretiminde model analizi ve ölçüm işlemlerinin etkilerini tartışmışlardır (27, 28). Bu özellikler, ideal giriş yolunu, dayanak diş kesimlerini ve bileşenlerin en uygun konumunu belirlemeyi sağlar.

Sabit ve Hareketli Protezler

Üç boyutlu baskı, protetik ve restoratif diş tedavisi alanında her zaman büyük ilgi gören bir teknoloji olmuştur. Bu durum son zamanlarda daha da belirgin hale gelmiş ve SLA ve DLP gibi 3D baskı teknolojilerinin geçici kronlar, daimi kronlar ve sabit parsiyel restorasyonların üretilmesinde daha yaygın olarak kullanılmasıyla sonuçlanmıştır.

Ağız içi tarayıcılar veya laboratuvar tarayıcıları kullanılarak, prepare edilmiş dişin, implant pozisyonunun (29) ve dental arkın (30, 31) hassas bir sanal modelini (30, 32) oluşturmak mümkündür. Sabit ve hareketli protetik ve restoratif tedavilerde tedavi planlanabilir ve restorasyonlar CAD yazılımında tasarlanabilir.

Bu tarama verileri ve CAD tasarımı, kron veya köprü altyapılarının, implant abutmentlerinin ve köprü yapılarının freze ile üretimi veya baskı ile üretimi için kullanılabilir.

3D baskı, rezin veya mumlar kullanılarak kaybolan mum tekniği (lost-wax) için dolaylı olarak, ya da doğrudan metal veya metal alaşımlarının (33) üretiminde kullanılabilir. Rezin/mum ile baskı yapıp ardından geleneksel döküm yöntemi kullanmanın avantajı, doğrudan 3D baskıya göre çok daha az ek işlem gerektirmesidir (34). Metalleri doğrudan basmak, özel sağlık ve güvenlik önlemleri gerektiren daha maliyetli teknolojiler ile mümkündür ve parçaların kullanılabilir hale gelmesi için kapsamlı ek işlemler yapılması gerekir (35).

Karmaşık implant köprü yapıları basılırken 3D baskı, frezeleme teknolojileri ile birleştirilebilir; böylece implant ile yüksek hassasiyetli mekanik bir bağlantı üretilir. Baskının en iyi özelliği (az atıkla karmaşık geometri) ile frezelemenin en iyi özelliği (yüksek hassasiyetli bağlantı yüzeyleri) birleştirilir. Materyal açısından biraz daha fazla atık oluşturmaya rağmen, frezelemenin avantajı, kullanılan malzemenin homojen olması ve işlem koşullarından etkilenmemesidir. Ek işleme çok az ihtiyaç vardır ve ekipman daha düşüktür (36).

Prepare edilmiş dişler ve implant tarama başlıkları ağız içinde taranarak hassasiyeti yüksek sanal modeller hazırlanabilir. Bilgisayar destekli tasarım (CAD) yazılım programı (3Shape Dental System 2022, 3Shape A/S, Kopenhag, Danimarka) bu sanal modeller üzerinde protezlerin tasarlanması için kullanılabilir ve sonrasında tasarlanan protezler bir 3D yazıcı kullanılarak basılabilir. Kronlar ve iskeletleri üretmek için geleneksel yöntemler veya frezeleme teknolojisi ile karşılaştırıldığında, düşük maliyetli bir 3D yazıcı daha az malzeme kullanarak daha kısa sürede hassas restorasyonlar üretebilir (16, 37, 38). Hatta bazı çalışmalar, 3D baskı kullanılarak üretilen geçici kronların, geleneksel yöntemler veya frezeleme yöntemleri ile üretilenlere göre daha hassas (daha iyi marjinal uyum ve daha iyi internal uyum) olduğunu bildirmiştir (39-41).

Protez materyalleri ve tekniklerinde önemli gelişmeler olmasına rağmen, şiddetli öğürme refleksi, tümör rezeksiyonu, temporomandibular eklem hastalığı veya ağız deformitesi olan hastalarda protez yapım süreci zorlu olabilir (42, 43). Ağız içi tarama teknolojisi ve 3D baskının gelişmesiyle birlikte protez üretimi, daha kısa sürede tamamlanan ve hasta açısından daha konforlu bir işlem haline gelmiştir (44). Ayrıca, geleneksel laboratuvar basamaklarını azaltarak daha az hata ile üretim yapılabilir ve daha iyi uyum sağlanabilir (45, 46). Metal destekli hareketli protez iskeletlerinin hazırlanma süreci zaman alıcı, tekniğe duyarlı ve zahmetlidir. Bu geleneksel süreçte mum ve döküm deformasyonu, iskeletin kötü uyumuna, basınca bağlı mukozal lezyonlara ve kret rezorpsiyonuna yol açabilir (47). Yakın tarihli bir in vitro çalışma, 3D baskı ile üretilen metal iskeletlerin, geleneksel kayıp mum (lost-wax) ve metal döküm tekniklerine göre daha iyi uyum sağladığını göstermiştir (48). Bir başka yazar da 3D baskılı iskeletlerin daha uniform temas basıncı sağladığını ve bunun da rezidüel kret rezorpsiyonu riskini azaltabileceğini bildirmiştir (16).

Çene-Yüz Protezleri

Total protez kaidelerinin üretimi için farklı bilgisayarlı protokoller önerilmiştir (49-51) ve bu yöntemler, çene-yüz protezlerinin üretiminde de oldukça faydalıdır (52). Çene-yüz protezlerinde morfolojiler, ayna görüntüsü ya da ortalama yüz formu ile kolaylıkla elde edilebilir (53, 54) ve bu sayede daha gerçekçi ve doğal görünümlü protezler üretilebilir (55). Yüzey morfolojisi ve renk haritaları sanal olarak kaydedilerek gelecekteki protez üretimi kolaylaştırılabilir. Ekstraoral taramanın mümkün olması, hasta için çok daha konforlu bir deneyim sunar (55, 56). Manuel ilerlemeyen bu süreçler, teknik beceriye ve insan faktörüne olan bağımlılığı önemli ölçüde azaltır. Mevcut sistemlerle yüz protezleri rezin veya mumdan üretilebilmekte, ardından refrakter malzemeye gömülüp cerrahi kalitede silikona dönüştürülmektedir (55-57)[40–42]. Ayrıca, protez tasarımının yanı sıra bilgisayarlı planlama, protez

rehabilitasyonu öncesinde defekt bölgesinin cerrahi olarak planlanabilmesine de olanak tanır (52).

Restoratif Alanda Çeşitli Amaçlarla Kullanılan Plaklar

Dental ağartma, estetik rehabilitasyonu sağlamak amacıyla günümüzde sıkça başvuru alan yöntemlerden biridir. Beyazlatma tedavisi farklı şekillerde uygulanabilir de evde hastanın düşük doz ağartma ajanıyla kendi uyguladığı home-bleaching tekniği oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Ev tipi beyazlatma tekniğinde ağartma ajanı, rezervuar görevi gören bir plak aracılığıyla ağız ortamına taşınmaktadır. 3D yazıcılar aracılığıyla bu plaklar üretilebilir.

“Injection moulding” tekniği, wax-up hazırlanmış bir modelden şeffaf bir ölçü materyali ile alınan ölçünün, akıcı kıvamda bir kompozit rezin ile kullanılarak restorasyonun oluşturulması olarak tanımlanabilir. Bu yöntemle restorasyon, planlanan anatomik form ve oklüzyona yüksek uyum sağlayacak şekilde klinikte direkt olarak uygulanabilir.

Günümüzde bu yöntemde kullanılan model ve şeffaf plakların üretiminde dijital teknolojilerden de yararlanılmaktadır. Özellikle 3D yazıcılar, wax-up modelin dijital olarak elde edilmesi ve ardından şeffaf ölçü plaklarının hazırlanmasında kullanılabilir. Böylece işlem daha hızlı, tekrarlanabilir ve standart hale getirilebilir ve manuel yöntemlerde oluşabilecek varyasyonlar azaltılabilir.

Oklüzal Splintler

Dayanıklı ve biyouyumlu polimerlerdeki son gelişmeler sayesinde 3D yazıcılarla oklüzal splintlerin üretimi mümkün hâle gelmiştir (58). Üç boyutlu baskı yöntemi, geleneksel yöntemlere oranla daha az işlem basamağı ve komplikasyon ihtimali sayesinde, üretilen nesnelerde daha yüksek uyum gösterebilmektedir. (58). Yapılan çalışmalarda 3D baskının konvansiyonel yöntemlere kıyasla daha öngörülebilir bir performans sağlayabileceği belirtilmektedir (59).

KAYNAKÇA

1. Miyazaki T, Hotta Y, Kunii J, Kuriyama S, Tamaki Y. A review of dental CAD/CAM: current status and future perspectives from 20 years of experience. *Dental materials journal*. 2009;28(1):44-56.
2. Rekow ED, Erdman AG, Riley DR, Klamecki B. CAD/CAM for dental restorations-some of the curious challenges. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*. 2002;38(4):314-8.
3. Andersson M, Razzoog ME, Odén A, Hegenbarth EA, Lang BR. Procera: a new way to achieve an all-ceramic crown. *Quintessence International*. 1998;29(5).
4. Andersson M, Carlsson L, Persson M, Bergman B. Accuracy of machine milling and spark erosion with a CAD/CAM system. *The Journal of prosthetic dentistry*. 1996;76(2):187-93.
5. Duret F, Preston J. CAD/CAM imaging in dentistry. *Current opinion in dentistry*. 1991;1(2):150-4.
6. Abduo J, Lyons K. Rationale for the use of CAD/CAM technology in implant prosthodontics. *International journal of dentistry*. 2013;2013(1):768121.
7. Kollar A, Huber S, Mericske E, Mericske-Stern R. Zirconia for teeth and implants: a case series. *International Journal of Periodontics & Restorative Dentistry*. 2008;28(5).
8. Beuer F, Schweiger J, Edelhoff D. Digital dentistry: an overview of recent developments for CAD/CAM generated restorations. *British dental journal*. 2008;204(9):505-11.
9. Brandt J, Lauer HC, Peter T, Brandt S. Digital process for an implant-supported fixed dental prosthesis: A clinical report. *J Prosthet Dent*. 2015;114(4):469-73.
10. Krahenbuhl JT, Cho SH, Irelan J, Bansal NK. Accuracy and precision of occlusal contacts of stereolithographic casts mounted by digital interocclusal registrations. *J Prosthet Dent*. 2016;116(2):231-6.

11. Wang H, Lim JY. Metal-ceramic bond strength of a cobalt chromium alloy for dental prosthetic restorations with a porous structure using metal 3D printing. *Comput Biol Med.* 2019;112:103364.
12. Jang KJ, Kang JH, Fisher JG, Park SW. Effect of the volume fraction of zirconia suspensions on the microstructure and physical properties of products produced by additive manufacturing. *Dent Mater.* 2019;35(5):e97-e106.
13. Taha D, Nour M, Zohdy M, El-Etreby A, Hamdy A, Salah T. The Effect of Different Wax Pattern Fabrication Techniques on the Marginal Fit of Customized Lithium Disilicate Implant Abutments. *J Prosthodont.* 2019;28(9):1018-23.
14. Xu Y, Unkovskiy A, Klaue F, Rupp F, Geis-Gerstorfer J, Spintzyk S. Compatibility of a silicone impression/adhesive system to FDM-printed tray materials—a laboratory peel-off study. *Materials.* 2018;11(10):1905.
15. Molinero-Mourelle P, Canals S, Gómez-Polo M, Solá-Ruiz MF, Del Río Highsmith J, Viñuela AC. Polylactic Acid as a Material for Three-Dimensional Printing of Provisional Restorations. *Int J Prosthodont.* 2018;31(4):349-50.
16. Tian Y, Chen C, Xu X, Wang J, Hou X, Li K, et al. A Review of 3D Printing in Dentistry: Technologies, Affecting Factors, and Applications. *Scanning.* 2021;2021:9950131.
17. Saini RS, Gurumurthy V, Quadri SA, Bavabeedu SS, Abdelaziz KM, Okshah A, et al. The flexural strength of 3D-printed provisional restorations fabricated with different resins: a systematic review and meta-analysis. *BMC Oral Health.* 2024;24(1):66.
18. Siqueira J, Rodriguez RMM, Campos TMB, Ramos NC, Bottino MA, Tribst JPM. Characterization of Microstructure, Optical Properties, and Mechanical Behavior of a Temporary 3D Printing Resin: Impact of Post-Curing Time. *Materials (Basel).* 2024;17(7).

19. Ahmad S, Hasan N, Fauziya, Gupta A, Nadaf A, Ahmad L, et al. Review on 3D printing in dentistry: conventional to personalized dental care. *J Biomater Sci Polym Ed.* 2022;33(17):2292-323.
20. Kalman L, Tribst JPM. Quality Assessment and Comparison of 3D-Printed and Milled Zirconia Anterior Crowns and Veneers: In Vitro Pilot Study. *European Journal of General Dentistry.* 2024;13(02):081-9.
21. Ferracane JL. Resin composite--state of the art. *Dent Mater.* 2011;27(1):29-38.
22. Bora PV, Sayed Ahmed A, Alford A, Pittman K, Thomas V, Lawson NC. Characterization of materials used for 3D printing dental crowns and hybrid prostheses. *J Esthet Restor Dent.* 2024;36(1):220-30.
23. Balhaddad AA, Garcia IM, Mokeem L, Alsahafi R, Majeed-Saidan A, Albagami HH, et al. Three-dimensional (3D) printing in dental practice: Applications, areas of interest, and level of evidence. *Clinical Oral Investigations.* 2023;27(6):2465-81.
24. Birnbaum NS, Aaronson HB. Dental impressions using 3D digital scanners: virtual becomes reality. *Compend Contin Educ Dent.* 2008;29(8):494, 6, 8-505.
25. Davis GR, Tayeb RA, Seymour KG, Cherukara GP. Quantification of residual dentine thickness following crown preparation. *Journal of dentistry.* 2012;40(7):571-6.
26. Abduo J, editor Virtual prosthodontic planning for oral rehabilitation: a pilot study. *Proceedings of the Workshop on New Trends of Computational Intelligence in Health Applications*; 2012.
27. Han J, Wang Y. A preliminary report of designing removable partial denture frameworks using a specifically developed software package. *International Journal of Prosthodontics.* 2010;23(4).
28. Williams R, Bibb R, Eggbeer D, Collis J. Use of CAD/CAM technology to fabricate a removable partial denture framework. *The Journal of prosthetic dentistry.* 2006;96(2):96-9.

29. Lin WS, Chou JC, Metz MJ, Harris BT, Morton D. Use of intraoral digital scanning for a CAD/CAM-fabricated milled bar and superstructure framework for an implant-supported, removable complete dental prosthesis. *J Prosthet Dent.* 2015;113(6):509-15.
30. Akyalcin S, Cozad BE, English JD, Colville CD, Laman S. Diagnostic accuracy of impression-free digital models. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2013;144(6):916-22.
31. Ender A, Mehl A. Accuracy of complete-arch dental impressions: a new method of measuring trueness and precision. *J Prosthet Dent.* 2013;109(2):121-8.
32. Logozzo S, Zanetti E, Franceschini G, Kilpela A, Mäkinen A. Recent advances in dental optics – Part I: 3D intraoral scanners for restorative dentistry. *Optics and Lasers in Engineering.* 2014;54:203–21.
33. Venkatesh KV, Nandini VV. Direct metal laser sintering: a digitised metal casting technology. *J Indian Prosthodont Soc.* 2013;13(4):389-92.
34. Kasparova M, Grafova L, Dvorak P, Dostalova T, Prochazka A, Eliasova H, et al. Possibility of reconstruction of dental plaster cast from 3D digital study models. *Biomed Eng Online.* 2013;12:49.
35. Örtorp A, Jönsson D, Mouhsen A, Vult von Steyern P. The fit of cobalt-chromium three-unit fixed dental prostheses fabricated with four different techniques: a comparative in vitro study. *Dent Mater.* 2011;27(4):356-63.
36. Dawood A, Marti Marti B, Sauret-Jackson V, Darwood A. 3D printing in dentistry. *Br Dent J.* 2015;219(11):521-9.
37. Tahayeri A, Morgan M, Fugolin AP, Bompolaki D, Athirasala A, Pfeifer CS, et al. 3D printed versus conventionally cured provisional crown and bridge dental materials. *Dent Mater.* 2018;34(2):192-200.
38. van Noort R. The future of dental devices is digital. *Dent Mater.* 2012;28(1):3-12.
39. Mai HN, Lee KB, Lee DH. Fit of interim crowns fabricated using photopolymer-jetting 3D printing. *J Prosthet Dent.* 2017;118(2):208-15.

40. Lee WS, Lee DH, Lee KB. Evaluation of internal fit of interim crown fabricated with CAD/CAM milling and 3D printing system. *J Adv Prosthodont.* 2017;9(4):265-70.
41. Chaturvedi S, Alqahtani NM, Addas MK, Alfarsi MA. Marginal and internal fit of provisional crowns fabricated using 3D printing technology. *Technol Health Care.* 2020;28(6):635-42.
42. Hacker T, Heydecke G, Reissmann DR. Impact of procedures during prosthodontic treatment on patients' perceived burdens. *J Dent.* 2015;43(1):51-7.
43. Kim JE, Kim NH, Shim JS. Fabrication of a complete, removable dental prosthesis from a digital intraoral impression for a patient with an excessively tight reconstructed lip after oral cancer treatment: A clinical report. *J Prosthet Dent.* 2017;117(2):205-8.
44. Hu F, Pei Z, Wen Y. Using Intraoral Scanning Technology for Three-Dimensional Printing of Kennedy Class I Removable Partial Denture Metal Framework: A Clinical Report. *J Prosthodont.* 2019;28(2):e473-e6.
45. Gan N, Ruan Y, Sun J, Xiong Y, Jiao T. Comparison of Adaptation between the Major Connectors Fabricated from Intraoral Digital Impressions and Extraoral Digital Impressions. *Sci Rep.* 2018;8(1):529.
46. Yoon SN, Oh KC, Lee SJ, Han JS, Yoon HI. Tissue surface adaptation of CAD-CAM maxillary and mandibular complete denture bases manufactured by digital light processing: A clinical study. *J Prosthet Dent.* 2020;124(6):682-9.
47. Bilgin MS, Baytaroğlu EN, Erdem A, Dilber E. A review of computer-aided design/computer-aided manufacture techniques for removable denture fabrication. *Eur J Dent.* 2016;10(2):286-91.
48. Bajunaid SO, Altwaim B, Alhassan M, Alammari R. The Fit Accuracy of Removable Partial Denture Metal Frameworks Using Conventional and 3D Printed Techniques: An In Vitro Study. *J Contemp Dent Pract.* 2019;20(4):476-81.

49. Maeda Y, Minoura M, Tsutsumi S, Okada M, Nokubi T. A CAD/CAM system for removable denture. Part I: Fabrication of complete dentures. *international Journal of Prosthodontics*. 1994;7(1).
50. Kanazawa M, Inokoshi M, Minakuchi S, Ohbayashi N. Trial of a CAD/CAM system for fabricating complete dentures. *Dental materials journal*. 2011;30(1):93-6.
51. Sun Y, Lü P, Wang Y. Study on CAD&RP for removable complete denture. *computer methods and programs in biomedicine*. 2009;93(3):266-72.
52. Davis BK. The role of technology in facial prosthetics. *Current Opinion in Otolaryngology & Head and Neck Surgery*. 2010;18(4):332-40.
53. Feng Z-h, Dong Y, Bai S-z, Wu G-f, Bi Y-p, Wang B, et al. Virtual transplantation in designing a facial prosthesis for extensive maxillofacial defects that cross the facial midline using computer-assisted technology. *International Journal of Prosthodontics*. 2010;23(6).
54. Ciocca L, Scotti R. CAD-CAM generated ear cast by means of a laser scanner and rapid prototyping machine. *The Journal of prosthetic dentistry*. 2004;92(6):591-5.
55. Feng Z, Dong Y, Zhao Y, Bai S, Zhou B, Bi Y, et al. Computer-assisted technique for the design and manufacture of realistic facial prostheses. *British Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*. 2010;48(2):105-9.
56. Runte C, Dirksen D, Deleré H, Thomas C, Runte B, Meyer U, et al. Optical data acquisition for computer-assisted design of facial prostheses. *International Journal of prosthodontics*. 2002;15(2).
57. Chen L-H, Tsutsumi S, Iizuka T. A CAD/CAM technique for fabricating facial prostheses: a preliminary report. *International Journal of prosthodontics*. 1997;10(5).
58. Prpic V, Spehar F, Stajdohar D, Bjelica R, Cimic S, Par M. Mechanical Properties of 3D-Printed Occlusal Splint Materials. *Dent J (Basel)*. 2023;11(8).

59. Zinser MJ, Mischkowski RA, Sailer HF, Zöller JE. Computer-assisted orthognathic surgery: feasibility study using multiple CAD/CAM surgical splints. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol.* 2012;113(5):673-87.

Bölüm 3

Diş Hekimliğinde 3 Boyutlu Yazıcı Türleri

Furkan KOZAKOĞLU ¹, Alpaslan Can ÇELİK²

GİRİŞ

Üç boyutlu yazıcılar, dijital bir modelden üç boyutlu nesneler oluşturmayı mümkün kılan katmanlı üretim teknolojisidir. Geleneksel subtraktif üretim yöntemlerine göre, 3D yazıcılar, diğer yöntemlerle gerçekleştirilmesi zor ya da imkânsız olan karmaşık şekil ve geometrilerin üretimini sağlar. Hassasiyet, doğruluk ve kullanılabilir malzeme çeşitliliğindeki gelişmeler sayesinde çeşitli sektörler bu teknolojiyi yalnızca prototip üretiminde değil, aynı zamanda özgün ihtiyaçlara yönelik nihai ürünlerin verimli ve düşük maliyetli bir şekilde elde edilmesinde de benimsenmektedir. Tıp ve diş hekimliği alanında 3B yazıcı teknolojisinin gelişimi, klinik pratikte tedavi yöntemlerini yeniden şekillendirmiş ve tedavi sonuçlarını iyileştiren çok sayıda yeni uygulamayı mümkün kılmıştır (1).

Teknolojik ilerlemeler, klinik uygulamada hastaya özel tıbbi materyallerin üretimini mümkün kılmıştır. Bu materyaller, her bir hastanın anatomik yapısına uygun şekilde, görüntüleme verilerinden elde edilen üç boyutlu modeller kullanılarak kişiye özel olarak tasarlanmakta ve üretilmektedir (2).

Üretim teknolojileri iki ana gruba ayrılır: kazımalı ve eklemeli. Eklemeli üretim (3D yazdırma) teknolojisi, kazımalı yöntemine göre mümkün olandan öteye geçerek daha esnek, bireye özgü ve çok yönlü uygulamaların geliştirilmesine olanak sağlar (3).

3D yazıcı teknolojilerinin çalışma prensipleri birbirinden farklıdır. Kullanılan yazdırma mekanizmasına bağlı olarak, üretilen nesneye özgü özellikler ortaya çıkar ve bu özellikler kullanım amacına uygun şekilde belirlenir

¹ Uzm. Dt. , Selçuk Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi Restoratif Diş Tedavisi Anabilim Dalı, ORCID: 0000-0001-9908-0511

² Uzm. Dt. ,Selçuk Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi Restoratif Diş Tedavisi Anabilim Dalı, ORCID: 0009-0008-9542-8566

3 Boyutlu Yazıcı Tipleri

Stereolitografi (SLA)

Stereolitografi (SLA), çok sayıda uygulama alanı, yüksek hızı ve üstün doğruluğuyla kendini kanıtlamış bir 3D yazıcı teknolojisidir. SLA, sıvı reçineleri katman katman fotokimyasal (lazer ışın) süreçlerle kürleyerek yüksek doğrulukta ve ince ayrıntılı tasarımların elde edilmesini sağlar (4).

SLA teknolojisinin lazer ışısıyla kürleme yeteneği zaman alıcıdır, ancak bu süreç final ürünlerinin yüksek doğrulukta ve pürüzsüz yüzeyli olmasını sağlar. Teknolojinin, hastaya özel ve bireysel anatomik yapılara uyarlanmış tasarımlar üretme kabiliyeti, diş hekimliği camiasında önemli bir ilgi uyandırmıştır. SLA, yüksek doğruluklu tasarımlar üretir ve diş hekimliğinde geçici ve daimi kuronlar ile sabit parsiyel protezler, cerrahi rehberler ve şablonlar ile diagnostik modeller için sıkça kullanılmaktadır. Teknolojinin en önemli dezavantajlarından biri, kürlenene materyalin lazer ışını doğrultusunda ilerlemesi nedeniyle, küçük tasarımlar için bile sürecin zaman alıcı olabilmesidir. Ancak diş hekimliğinde kullanılan SLA teknolojisi, daha verimli ve daha az zaman gerektiren bir tedavi yaklaşımının önünü büyük ölçüde açmıştır (5).

Dijital Işık İşleme (DLP)

Dijital Işık İşleme (DLP) teknolojisini kullanan yazıcı sistemleri, uzun üretim sürelerine yönelik sorunları çözerek son derece değerli bir 3D yazdırma teknolojisi olarak öne çıkmıştır (6). DLP, fotopolimer reçineleri bir ışık kaynağı aracılığıyla katman katman sertleştirerek son derece hassas ve karmaşık tasarımlar elde edilmesini sağlar . Bu ışıkla kürleme teknolojisi, SLA yazıcılarda görülen yavaşlama problemini ortadan kaldırır; çünkü DLP, tek bir ışık flaşıyla tüm katmanı aynı anda sertleştirebilir. Ancak bu teknolojinin önemli bir dezavantajı, her bir vokselin boyutuyla ilgilidir. Voksel, iki boyutlu çözünürlükte pikselin 3D karşılığıdır . Bu nedenle, daha büyük voksel boyutları daha düşük çözünürlük (daha köşeli ve bloklı görünümler), daha küçük voksel boyutları ise daha yüksek çözünürlük (daha pürüzsüz tasarımlar) ile sonuçlanır.

Günümüzde DLP yazıcılar, klinik olarak kabul edilebilir geçici ve kalıcı kuronlar, sabit bölümlü protezler ve hareketli protezlerin üretiminde başarıyla kullanılmaktadır . Genel olarak DLP yazdırma, klinisyenlere öngörülebilir tedavi sonuçları için zaman kazandıran yenilikçi çözümler sunmaktadır (5).

Eriterek Katman Modelleme (FDM)

Eriyerek Katmanlama Modelleme (Fused Deposition Modeling – FDM), sağlık alanının birçok bölümünde uygulama alanı bulan faydalı bir yazıcı teknolojisidir. FDM, ısıtıldığında yarı katı hâle gelen termoplastik filamentlerin dışarıya ekstrüde edilmesi ve katman katman biriktirilmesi prensibiyle çalışır. Katmanlar soğudukça sertleşir; her yeni katman, daha önceki katmanın üzerine yerleştirildiğinde, ısıtılmış filament ile moleküler düzeyde bağ oluşturarak bütünleşir (7). Bu teknoloji, katmanlar arasında güçlü bir bağlanma sağlar; ancak yalnızca termoplastik malzemelerle çalışabilir. Günümüzde bu teknoloji, oklüzal apareylerin üretiminde kullanılmakta olup, kontrollü salınımlı ilaç taşıma sistemleri gibi farmasötik uygulamalarda da yer bulmuştur. Fused Deposition Modeling (FDM) sağlık alanında çeşitli uygulamalara olanak tanısa da, diş hekimliğindeki kullanımı sınırlı kalmaktadır. Diş hekimliğinde genellikle eğitim amaçlı modellerin üretiminde ve ön tasarım prototiplerinde tercih edilmektedir (5).

Seçici Lazer Sinterleme (SLS)

Seçici Lazer Sinterleme (Selective Laser Sintering – SLS), özellikle protetik diş tedavileri alanında zaman tasarrufu sağlayan etkili bir 3D yazıcı teknolojisi olarak kendini kanıtlamıştır. SLS, toz hâlindeki materyalleri yüksek sıcaklıklı bir lazer ile seçici olarak kaynaştırma prensibiyle çalışır (8). Bu yöntemde kullanılan materyaller oldukça çeşitlidir; seramiklerden metallere ve hatta polimerlere kadar geniş bir yelpazeyi kapsar. Bu durum, yüksek yoğunluklu materyallerin dental uygulamalarda üretilebilmesini sağlayan nadir teknolojilerden biri olması açısından oldukça değerlidir. Ancak, bu teknolojinin en büyük dezavantajı, doğru ve verimli bir üretim için büyük boyutlarda bir altyapı gerektirmesidir . SLS, diş hekimliğinde özellikle

hareketli bölümlü protez iskeletlerinin üretiminde yaygın olarak kullanılmakta ve geleneksel tekniklerden kaynaklanan insan hatasını önemli ölçüde azaltmaktadır. Geleneksel metal döküm yöntemleriyle karşılaştırıldığında, seçici lazer sinterleme daha güvenli ve öngörülebilir sonuçlar sunmaktadır.

SLS teknolojisine bir alternatif olarak Seçici Lazer Eritme(Selective Laser Melting – SLM) yöntemi geliştirilmiştir. SLM teknolojisi, kullanılan malzemeler ve işlem süreçleri bakımından SLS ile benzerlik gösterse de temel fark, SLM’de materyalin sinterlenmek yerine tamamen eritilmesidir (9).

Fotopolimer Püskürtme

Fotopolimer püskürtme yazıcı teknolojisi, yaygın olarak PolyJet 3D yazıcı olarak da bilinir ve diş hekimliğine özgü çoklu renkte baskı yapabilme avantajı sunar. PolyJet teknolojisi, mürekkep püskürtmeli yazıcı başlıkları aracılığıyla, toz yatağındaki birden fazla voksele füzyon ajanı damlacıkları püskürtür. Bu işlem, polimer tozunun erimesine ve ardından kızılötesi ışıklar ile sertleşmesine neden olur (10).

Bu teknolojinin çoklu malzeme ve çoklu renkli bileşenler üretebilme yeteneği, diğer yazıcı teknolojilerine kıyasla önemli avantajlar sunmaktadır. Ancak en büyük dezavantajlarından biri, yazıcı başlıklarının bakım gereksinimidir; zira bu başlıklar kolaylıkla tıkanabilmektedir (2).

Günümüzde PolyJet yazıcı teknolojisi, dental modellerin ve geçici kuronların üretiminde kullanılmaktadır . Ancak kullanılan malzemenin mekanik özellikleri henüz yeterli düzeyde değildir; bu nedenle ağız içi ortamda sunduğu avantajlar sınırlıdır. Bununla birlikte, fotopolimer püskürtme teknolojisi, baskı sırasında çoklu renk seçeneği sunabilme yeteneği sayesinde, estetik diş hekimliğinde büyük değer taşıyarak dental endüstride devrim yaratma potansiyeline sahiptir (5).

Toz Bağlayıcı Püskürtme

Toz Bağlayıcı Püskürtme (Binder Jetting) olarak da bilinen bu yazıcı teknolojisi, medikal sınıf silikonlar ve biyouyumlu elastomerler içeren maksillofasiyal protez

uygulamaları için oldukça faydalı bir yöntemdir . Binder jetting yöntemi genellikle nişasta bazlı toz katmanlarını seçici olarak birleştirmek için su bazlı bir bağlayıcı kullanır; ardından bu yapı silikon polimerlerle infiltrasyona uğrar. Elde edilen materyal, istenilen özellikleri kazanabilmesi için daha sonra post-processing (son işlem) aşamasından geçirilerek sertleştirilir (11).

Bu teknolojinin, hastaya özel ve renk uyumlu maksillofasiyal tasarımlar üretebilme kapasitesi benzersizdir. Bununla birlikte, kullanılan materyaller genellikle zayıf mekanik özelliklere sahiptir ve bu nedenle kırılgan yapıdadır (2). Daha önce de belirtildiği üzere, toz bağlayıcı püskürtme teknolojisi, hastaya özgü maksillofasiyal uygulamalarda oldukça erken dönemde devrim niteliğinde çözümler sunmuştur (5).

Powder binder yazıcı teknolojisi, özellikle bu özgün hasta grubu için daha az invaziv üretim süreci içeren dental üretim yöntemlerinin gelişimi açısından büyük bir potansiyel taşımaktadır (1).

Lazer Biyobaskı

Lazer Biyobaskı (Laser Bioprinting – LAB), eklemeli üretim teknolojileri ile biyoteknolojinin yenilikçi bir birleşimi olarak üç boyutlu yazıcı pazarına girmiştir. Bu teknoloji, dental rejeneratif tedaviler açısından önemli ilerlemeler göstermiştir. LAB yazıcılar, canlı hücreler ve çeşitli biyomateryal türlerini içeren biyomürekkeplerin katman katman biriktirilmesini sağlayan, lazer tabanlı hassas teknikler kullanır. Bu yenilikçi teknoloji, periodontal rejenerasyon, kemik augmentasyonu ve oral mukoza rekonstrüksiyonu gibi doku mühendisliğine dayalı yapılar üretme alanında önemli gelişmeler sağlamıştır (12).

Genel olarak, üç boyutlu lazer biyobaskı teknolojisi, diş hekimliği tedavi standartlarını ileriye taşıma potansiyeline sahiptir; klinisyenlere, karmaşık oral ve maksillofasiyal problemlere yönelik, hastaya özel rejeneratif çözümler tasarlamada yenilikçi araçlar sunarak, hasta konforunu ve yaşam kalitesini artırma imkânı sağlamaktadır (1)

3 Boyutlu Yazıcı Teknolojileri: Avantajlar ve Dezavantajlar

3D Yazıcı Teknolojisi	Avantajlar	Dezavantajlar
Stereolitografi (SLA)	● Hızlı üretim süresi ● Yüksek hassasiyet ve doğruluk ● Karmaşık tasarımlara uygun; Geniş malzeme seçeneği	● Diğer yazıcılara göre daha yavaş olabilir ● Yoğun son işlem gerektirir
Sayısal Işık İşleme (DLP)	● Yüksek hız; Yüksek hassasiyet ve doğruluk ● Karmaşık tasarımlara uygun ● Geniş malzeme seçeneği	● Bazı yazıcılara göre daha düşük kalite ● Voksel boyutuyla sınırlı
Eriyerek Katmanlama Modelleme (FDM)	● Düşük maliyetli teknoloji ● Katmanlar arasında güçlü bağlanma	● Yalnızca termoplastik malzemelerle çalışır
Seçici Lazer Sinterleme (SLS) ve Seçici Lazer Ergitme (SLM)	● Polimer veya metal baskı yapılabilir ● Seri üretime uygun ● Destek yapısına ihtiyaç duymaz	● Geniş altyapı gerektirir ● İnce tozlar sağlığa zararlı olabilir
Fotopolimer Püskürtme (PolyJet)	● Çok yüksek çözünürlük ● Tek baskıda çoklu renk kullanımı	● Düşük mekanik özellikler ● Sınırlı ısı direnci ● Yazıcı başlıkları sık bakım gerektirir
Toz Bağlayıcı Püskürtme	● Benzersiz malzeme çeşitliliği ● Hızlı üretim	● Düşük mekanik özellikler ● Düşük çözünürlük ● Yüksek malzeme israfı
Lazer Biyobaskı (LAB)	● Canlı hücreler ve biyomateryallerle baskı yapabilen tek yöntem ● Tamamen özgün teknoloji	● Yüksek maliyetli ● Yaşamsal biyomateryallerin üretimi için özel koşullar gerekir

SONUÇ

Sonuç olarak, diş hekimliğinde eklemeli üretim teknolojileri, CAD-CAM tabanlı yöntemler ve gelişmiş malzemelerin entegrasyonu sayesinde, metal ve alaşımlarından polimer ve kompozitlere, seramiklerden biyomateryallere kadar geniş bir yelpazede dental ürünlerin hassas ve kişiye özel olarak üretilmesine olanak sağlamaktadır. Bu teknik; dental implantlar, protez restorasyonlar, maksillofasiyal protezler, cerrahi kılavuzlar, ortodontik apareyler ve doku mühendisliği uygulamaları gibi pek çok alanda yüksek potansiyel sunmaktadır. Ancak, klinik başarı ve uzun dönem kullanım güvenliği için, bu yöntemle üretilen restorasyon ve cihazların mekanik, biyolojik ve boyutsal özelliklerinin ayrıntılı şekilde değerlendirilmesi gerekmektedir.

KAYNAKÇA

1. Jeong M, Radomski K, Lopez D, Liu JT, Lee JD, Lee SJ. Materials and applications of 3D printing technology in dentistry: an overview. *Dent J (Basel)*. 2023;12(1):1. doi:10.3390/dj12010001
2. Dawood A, Marti Marti B, Sauret-Jackson V, Darwood A. 3D printing in dentistry. *Br Dent J*. 2015;219(11):521-9. doi:10.1038/sj.bdj.2015.914
3. Park SM, Park JM, Kim SK, Heo SJ, Koak JY. Flexural strength of 3D-printing resin materials for provisional fixed dental prostheses. *Materials*. 2020;13(18):3970.
4. Revilla-León M, Özcan M. 3D printing restorative materials using a stereolithographic technique: a systematic review. *Dent Mater*. 2021;37(2):336-50. doi:10.1016/j.dental.2020.11.030
5. Javaid M, Haleem A, Singh RP, Suman R. 3D and 4D printing in dentistry and maxillofacial surgery: printing techniques, materials, and applications. *Acta Biomater*. 2021;122:26-49. doi:10.1016/j.actbio.2020.12.044
6. Al Hamad KQ, Al-Rashdan BA, Ayyad JQ, Al Omrani LM, Sharoh AM, Al Nimri AM, et al. Additive manufacturing of dental ceramics: a systematic review and meta-analysis. *J Prosthodont*. 2022;31(8):e67-86. doi:10.1111/jopr.13553
7. Scoutaris N, Ross SA, Douroumis D. Fused deposition modeling (FDM), the new asset for the production of tailored medicines. *J Control Release*. 2021;330:821-41. doi:10.1016/j.jconrel.2020.10.056
8. Yang J, Li H, Xu L, Wang Y. Selective laser sintering versus conventional lost-wax casting for single metal copings: a systematic review and meta-analysis. *J Prosthet Dent*. 2022;128(5):897-904. doi:10.1016/j.prosdent.2021.02.011
9. Goguta L, Lungeanu D, Negru R, Birdeanu M, Jivanescu A, Sinescu C. Selective laser sintering versus selective laser melting and computer-aided design/computer-aided manufacturing in double crowns retention. *J Prosthodont Res*. 2021;65(3):371-8.

10. Chen J, Zhao L, Zhou K. Multi-jet fusion 3D voxel printing of conductive elastomers. *Adv Mater.* 2022;34(47):2205909. doi:10.1002/adma.202205909
11. Lee YC, Zheng J, Kuo J, Acosta-Vélez GF, Linsley CS, Wu BM. Binder jetting of custom silicone powder for direct three-dimensional printing of maxillofacial prostheses. *3D Print Addit Manuf.* 2022. doi:10.1089/3dp.2021.0019
12. Guerrero-Gironés J, López-García S, Pecci-Lloret MR, Pecci-Lloret MP, Rodríguez Lozano FJ, García-Bernal D. In vitro biocompatibility testing of 3D printing and conventional resins for occlusal devices. *J Dent.* 2022;123:104163. doi:10.1016/j.jdent.2022.104163

Bölüm 4

Diş Hekimliğinde 3 Boyutlu Baskı İçin Kullanılan Materyaller

Furkan KOZAKOĞLU¹, Alpaslan Can ÇELİK²

GİRİŞ

Üç boyutlu yazıcı teknolojisinin gelişmesiyle birlikte bu alanda kullanılan materyallerin çeşitliliği ve özellikleri de giderek önem kazanmıştır. Başlangıçta yalnızca sınırlı sayıdaki polimerlerle üretim yapılabilirken, günümüzde metallere seramiklere, biyouyumlu polimerlerden kompozitlere kadar geniş bir yelpazede malzeme seçeneği mevcuttur. Kullanılan materyal, baskının kalitesini, dayanıklılığını, yüzey özelliklerini ve klinik ya da endüstriyel alandaki uygulanabilirliğini doğrudan etkilemektedir (1).

Üç boyutlu yazıcılarda kullanılan materyallerin seçiminde; mekanik dayanıklılık, biyouyumluluk, estetik özellikler, üretim kolaylığı, maliyet ve post-proses gereksinimleri gibi faktörler göz önünde bulundurulmaktadır. Özellikle dental ve medikal uygulamalarda biyouyumlu reçineler, polimerler ve kompozit bazlı materyaller öne çıkarken; endüstriyel üretimde metallere, alaşımlar ve yüksek performanslı polimerler tercih edilmektedir. Bunun yanında seramik esaslı materyaller de hem protetik hem de mühendislik uygulamalarında kullanım alanı bulmuştur (2).

Materyal çeşitliliği, yalnızca kullanılacak yazıcı teknolojisine (SLA, DLP, FDM, SLS vb.) değil aynı zamanda üretilecek ürünün fonksiyonuna da bağlıdır. Bu nedenle 3B yazıcı teknolojisinin gelişimini, kullanılan yazıcı tipleri kadar bu yazıcılarla uyumlu yeni nesil materyallerin geliştirilmesi de belirlemektedir.

¹ Uzm. Dt. , Selçuk Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi Restoratif Diş Tedavisi Anabilim Dalı, ORCID: 0000-0001-9908-0511

² Uzm. Dt. , Selçuk Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi Restoratif Diş Tedavisi Anabilim Dalı, ORCID: 0009-0008-9542-8566

Polimerler

Vinil Polimerler

Vinil polimerler, ayarlanabilir özellikleri nedeniyle diş hekimliğinde en yaygın kullanılan polimerlerdir. Bu polimerler, SRP (serbest radikal polimerizasyonu) yöntemiyle vinil monomerlerden üretilir. Vinil polimerler biyoyouumlu olsalar da, çoğu biyolojik olarak ayrışabilir değildir; bu durum, birçok tıbbi uygulama için tercih edilmemelerine yol açarken, diş hekimliğinde dezavantaj oluşturmaz. Çünkü dental implantlar gibi uzun süreli kullanımlarda malzemenin bozunmaması istenir. Bu nedenle, malzeme özelliklerini ayarlamak, ortaya çıkan polimerin molekül ağırlığını kontrol etmek ve zincir ile uç fonksiyonel gruplarını düzenlemek amacıyla kontrollü radikal polimerizasyon (CRP) gibi yeni sentez yöntemleri uygulanmaktadır. Vinil polimerler, sinterleme (ör. SLS) veya fotopolimerizasyon (ör. SLA) gibi işlemleri içeren dental 3D baskılarda yaygın olarak kullanılmaktadır (3) (4).

Polimetil metakrilat (PMMA), dental 3D baskıda en yaygın kullanılan vinil polimerdir. PMMA, metil metakrilat monomerinden, başlatıcı olarak sırasıyla 2,2'-azo-bis-izobütironitril veya n-bütillityum kullanılarak FRP (serbest radikal polimerizasyonu) ya da anyonik polimerizasyon yöntemiyle polimerize edilir. PMMA; kolay işlenebilirliği, düşük maliyeti, hafifliği, ağız ortamında stabilitesi ve estetik özellikleri sayesinde protez kaide materyallerinin üretiminde en çok tercih edilen malzemedir. Ancak PMMA'nın yüzey özellikleri zayıf ve mekanik özellikleri yetersizdir; mekanik yetersizlik, polietereterketon, SiO₂ ve Al₂O₃ gibi katkı maddeleri kullanılarak giderilebilir. Ayrıca, titanyum dioksit ilavesi antimikrobiyal özellik kazandırır (5).

Stiren Bazlı Polimerler

Diş hekimliğinde 3D baskıda yaygın olarak kullanılan iki stiren esaslı polimer vardır: polistiren (PS) ve akrilonitril-bütadien-stiren (ABS). PS, başlatıcı olarak benzoil peroksit kullanılarak stiren monomerlerinden FRP (serbest radikal polimerizasyonu) yöntemiyle polimerize edilen aromatik bir hidrokarbon

polimeridir. Yapısal olarak amorf olup yüksek şeffaflığa ve pürüzsüz bir yüzeye sahiptir. Mekanik özellikleri ve kolay işlenebilirliği, onu dental uygulamalar için uygun bir aday haline getirmektedir (6). Yüksek darbe dayanımlı PS, füzyonlu filament imalatı (FFF) yöntemi kullanılarak 3D baskı nesnelerinin üretiminde kullanılmış ve ortaya çıkan ürünün özelliklerinde iyileşme sağlanmıştır (7).

3D baskıda kullanılan bir diğer malzeme, monomerlerinden “akrilonitril, bütadien ve stiren” üstün özelliklerini devralan termoplastik bir polimer olan ABS’dir. Her bir monomer, ABS’nin kalitesine farklı katkılar sağlar. Buna göre, ABS; ısıya dayanıklılığını akrilonitrilden, yüksek darbe dayanımını bütadien’den ve sertliğini stirenden alır. ABS’nin FRP (serbest radikal polimerizasyonu) ile sentezinde farklı başlatıcılar kullanılmıştır: t-butil veya kumen hidroperoksit/sodyum formaldehit sülfoksilat dihidrat/EDTA ile şelatlanmış Fe^{2+} redoks sistemi, amonyum persülfat, amonyum persülfat/sodyum bisülfat redoks başlatıcısı ve yağda çözünebilen 2,2’-azobis(2,4-dimetilvaleronitril). ABS’nin 3B baskısında genellikle FDM ve SLS yöntemleri tercih edilmektedir (8).

Poliesterler

Poliester, ana zincirinde ester fonksiyonel grupları içeren bir termoplastik polimerler grubunu ifade eder. Bu polimerler, su moleküllerinin uzaklaştırılmasıyla gerçekleşen polikondenzasyon yöntemiyle polimerize edilir. En yaygın üç poliester ise polikarbonat (PC), polikaprolakton (PCL) ve polilaktik asittir (PLA) (9).

Polikarbonatlar (PC), ana zincirden bisfenol A ile karbonil klorür/difenil karbonat arasındaki polikondenzasyon reaksiyonu yoluyla polimerize edilir. Mekanik olarak dayanıklı, amorf ve şeffaf polimerlerdir. PC’ler, diş hekimliğinde ortodontik braketler, protez kaideleri ve prefabrike geçici kronların üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Deneysel olarak, FDM yöntemiyle basılmış kompozitlerin matris malzemesi olarak da kullanılmıştır. Ancak PC’nin avantajlı özelliklerine rağmen, bisfenol A salınımı olasılığı bulunması, onu potansiyel olarak zararlı bir madde haline getirmektedir (10).

Polikaprolakton (PCL), stannous oktanoat gibi bir katalizör varlığında ϵ -kaprolakton monomerlerinin halka açma polimerizasyonu ile sentezlenir. PCL, hidrofobik yapısı sayesinde yüksek in vivo stabiliteye sahip, biyolojik olarak ayrışabilir ve biyoyumlu bir poliesterdir. 3D baskı alanında PCL, düşük erime noktası ($\sim 63^{\circ}\text{C}$) nedeniyle özellikle FDM gibi baskı teknikleri için uygundur. Ayrıca, 3B basılmış PCL; alveolar kemik augmentasyonu gibi kemik doku rejenerasyonu uygulamalarında kullanılmaktadır (11).

Polilaktik asit (PLA), insan vücudu ile ilişkili uygulamalarda en yaygın kullanılan polimerlerden biridir. PLA, laktik asitten polikondenzasyon yöntemiyle veya bazı durumlarda halka açma polimerizasyonu ile sentezlenir. Halka açma polimerizasyonu, daha düşük molekül ağırlıklı ve daha kırılgan PLA elde edilmesine neden olur. PLA, yüksek biyoyumluluk gösterir ve ayarlanabilir fizikokimyasal özelliklere sahiptir. Mükemmel işlenebilirliği, PLA'nın farklı 3D baskı yöntemlerinde kullanılmasına olanak tanır; buna örnek olarak, dental implantların cerrahi yerleştirilmesi için matkap kılavuzlarının FDM ile basılması ve kuron preparasyonu sonrası dişleri korumaya yönelik geçici restorasyonlar verilebilir (12).

Metal Esaslı Malzemeler

Metal esaslı malzemeler, yüksek mekanik dayanım, korozyon direnci ve biyoyumluluk özellikleri sayesinde diş hekimliğinde implantlar, protez altyapıları, cerrahi cihazlar ve ortodontik apareylerin üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Gelişmiş 3B baskı teknolojileri, özellikle Seçici Lazer Ergitme (SLM), Doğrudan Metal Lazer Sinterleme (DMLS) ve Elektron Demeti ile Ergitme (EBM), geleneksel döküm ve frezeleme yöntemlerine alternatif olarak, metal restorasyon ve cihazların dijital ortamda yüksek hassasiyetle üretilmesine olanak tanımaktadır (13).

Titanyum ve alaşımları (Ti, Ti-6Al-4V), mükemmel biyoyumlulukları, düşük yoğunlukları, yüksek korozyon dirençleri ve yüksek mekanik dayanımları nedeniyle dental implantlar, abutmentlar ve maksillofasiyal cerrahi plak-vida

sistemlerinde yaygın olarak tercih edilmektedir . Yüzey pürüzlendirme ve anodizasyon gibi modifikasyonlar, osseointegrasyonu ve biyolojik cevabı artırmaktadır (14).

Kobalt-krom (Co-Cr) alaşımları, yüksek sertlikleri, aşınma dirençleri ve biyoyumumlulukları ile metal altyapılı porselen kron-köprüler, parsiyel protez iskeletleri ve implant üst yapılarında kullanılmaktadır . Geleneksel döküme kıyasla, SLM/DMLS ile üretilen Co-Cr alaşımlar daha yüksek yoğunluk, daha iyi mekanik özellikler ve daha az metal iyonu salınımı göstermektedir (15).

Paslanmaz çelik alaşımları (316L), korozyon direnci ve uygun maliyetleri sayesinde ortodontik apareyler, cerrahi enstrümanlar ve geçici implantlarda kullanılmaktadır . Bununla birlikte, yüksek krom ve nikel içerikleri bazı hastalarda alerjik reaksiyonlara yol açabileceğinden, kalıcı implant uygulamalarında titanyum ve Co-Cr alaşımları kadar yaygın tercih edilmemektedir (16).

Alüminyum alaşımları , hafiflikleri ve yeterli mekanik dayanımları sayesinde medikal cihaz bileşenlerinde ve sınırlı ölçüde dental cerrahi aparatlar üretiminde tercih edilmektedir (17).

Nikel-titanyum alaşımları (NiTi – Nitinol), şekil hafızası ve süperelastisite özellikleri ile ortodontik teller ve endodontik eğelerde kullanılmaktadır. 3B baskı ile üretimleri halen araştırma ve geliştirme aşamasındadır (18).

Sonuç olarak, metal esaslı 3B baskı malzemeleri, diş hekimliğinde hasta özelinde tasarlanmış, yüksek hassasiyetli ve dayanıklı restorasyon ve cihazların üretilmesine olanak sağlamaktadır. Gelecekte, malzeme mühendisliği ve yüzey modifikasyon tekniklerindeki ilerlemeler, bu uygulamaların performansını daha da geliştirecektir.

Seramikler

Seramiklerin kullanımı, diş hekimliğinde hem klinik uygulamalarda hem de araştırmalarda oldukça yaygın hale gelmiştir. Seramikler, titanyum veya CoCr alaşımlarıyla karşılaştırıldığında yüksek biyoyumumluluk, güçlü mekanik

özellikler, mükemmel aşınma direnci ve üstün estetik özelliklere sahiptir . Bu avantajlar, 3D baskı seramik sistemlerinin geliştirilmesinde değerlendirilmiştir (19).

Seramikler, yüksek biyouyumluluk, üstün aşınma direnci, kimyasal stabilite ve estetik özellikleri nedeniyle diş hekimliğinde hem restoratif hem de implant uygulamalarında uzun süredir kullanılmaktadır. Günümüzde, stereolitografi (SLA), dijital ışık işleme (DLP), binder jetting ve robocasting gibi üç boyutlu (3D) baskı teknolojilerinin gelişmesi, seramik esaslı dental restorasyon ve implantların dijital olarak tasarlanarak yüksek hassasiyetle üretilmesine olanak sağlamaktadır (20)

Zirkonya (ZrO_2), 3D baskıda en yaygın kullanılan dental seramiklerden biridir. Yüksek basma ve eğilme dayanımı, mükemmel biyouyumluluğu, düşük plak tutulum potansiyeli ve estetik açıdan kabul edilebilir opaklığı sayesinde kron, köprü, abutment ve metalsiz dental implant üretiminde yaygın olarak tercih edilmektedir . Özellikle yttria ile stabilize edilmiş tetragonal zirkonya polikristali (3Y-TZP), mekanik özellikleri ve kırılma tokluğu ile öne çıkmaktadır (21).

Alümina (Al_2O_3), yüksek aşınma direnci ve kimyasal saflığı (%99,99) ile biyouyumlu bir seramik olup seramik abutmentlar, endodontik postlar, ortodontik braketler ve dental implantlarda kullanılmaktadır (22).

Cam seramikler, özellikle lityum disilikat esaslı olanlar, yüksek yarı saydamlıkları ve estetik görünimleri sayesinde ön bölge restorasyonları, veneerler, inley-onleyler ve tam seramik kronlarda tercih edilmektedir . 3B baskı teknikleriyle üretilen cam seramikler, estetik gereksinimlerin ön planda olduğu klinik vakalarda önemli bir alternatif sunmaktadır (23).

SONUÇ

Sonuç olarak, üç boyutlu yazıcılarda kullanılan materyallerin çeşitliliği ve özellikleri, teknolojinin gelişimini yönlendiren en önemli unsurlardan biri olup; farklı sektörlerdeki uygulama alanlarını genişletmekte ve gelecekte daha yenilikçi çözümlerin geliştirilmesine zemin hazırlamaktadır.

KAYNAKÇA

1. Ngo TD, Kashani A, Imbalzano G, Nguyen KTQ, Hui D. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Compos Part B Eng.* 2018;143:172-96. doi:10.1016/j.compositesb.2018.02.012
2. Travitzky N, Bonet A, Dermeik B, Fey T, Filbert-Demut I, Schlier L, et al. 3D printing technologies: techniques, materials, and post-processing. *Curr Opin Chem Eng.* 2020;28:134-43. doi:10.1016/j.coche.2020.04.001
3. Stansbury JW, Idacavage MJ. 3D printing with polymers: Challenges among expanding options and opportunities. *Dent Mater.* 2016;32(1):54-64. doi:10.1016/j.dental.2015.09.018
4. Mangano FG, Zecca PA, van Noort R, Apresyan S, Iezzi G, Piattelli A, et al. Custom-made CAD/CAM biphasic calcium-phosphate scaffold for augmentation of an atrophic mandibular anterior ridge: a case report. *Case Rep Dent.* 2015;2015:941265. doi:10.1155/2015/941265
5. Chen H, Xu Y, Xie H, Shi Y. 3D printing temporary crown and bridge by temperature controlled mask image projection stereolithography. *Procedia Manuf.* 2018;26:1023-33. doi:10.1016/j.promfg.2018.07.134
6. Jockusch J, Özcan M. Additive manufacturing of dental polymers: an overview on processes, materials and applications. *Dent Mater J.* 2020;39(3):345-54.
7. Malik VR, Tiwary VK, Padmakumar A. Post-processing of parts and components fabricated by fused deposition modeling: techniques and advancements. Boca Raton: CRC Press; 2024.
8. Ponyik CA, Wu DT, Williams SKR. Separation and composition distribution determination of triblock copolymers by thermal field-flow fractionation. *Anal Bioanal Chem.* 2013;405(28):9033-40.
9. Abdul Halim ZA, Mat Yajid MA, Idris MH, Hamdan H. Dispersion of polymeric-coated silica aerogel particles in unsaturated polyester

- composites: effects on thermal-mechanical properties. *J Dispers Sci Technol.* 2018;39(8):1093-101. doi:10.1080/01932691.2017.1382375
10. Messimer SL, Rocha Pereira T, Patterson AE, Lubna M, Drozda FO. Full-density fused deposition modeling dimensional error as a function of raster angle and build orientation: large dataset for eleven materials. *J Manuf Mater Process.* 2019;3(1):6.
 11. Park SA, Lee HJ, Kim KS, Lee SJ, Lee JT, Kim SY, et al. In vivo evaluation of 3D-printed polycaprolactone scaffold implantation combined with β -TCP powder for alveolar bone augmentation in a beagle defect model. *Materials.* 2018;11(2):238.
 12. Molinero-Mourelle P, Canals S, Gómez-Polo M, Solá-Ruiz MF, Del Río Highsmith J, Viñuela AC. Polylactic acid as a material for three-dimensional printing of provisional restorations. *Int J Prosthodont.* 2018;31(4):349-50. doi:10.11607/ijp.5709
 13. Al Jabbari YS. Physico-mechanical properties and prosthodontic applications of Co-Cr dental alloys: a review of the literature. *J Adv Prosthodont.* 2014;6(2):138-45. doi:10.4047/jap.2014.6.2.138
 14. Buser D, Schenk RK, Steinemann S, Fiorellini JP, Fox CH, Stich H. Influence of surface characteristics on bone integration of titanium implants: a histomorphometric study in miniature pigs. *J Biomed Mater Res.* 1991;25(7):889-902. doi:10.1002/jbm.820250708
 15. Wataha JC. Biocompatibility of dental casting alloys: a review. *J Prosthet Dent.* 2000;83(2):223-34. doi:10.1016/S0022-3913(00)80016-5
 16. Zhang Y, Chou L, Ajdelsztajn L, Li P. Defects-tolerant Co-Cr-Mo dental alloys prepared by selective laser melting. *Dent Mater.* 2015;31(12):1435-44. doi:10.1016/j.dental.2015.09.003
 17. Aboulkhair NT, Simonelli M, Parry L, Ashcroft I, Tuck C, Hague R. 3D printing of aluminium alloys: additive manufacturing using selective laser melting. *Prog Mater Sci.* 2019;106:100578. doi:10.1016/j.pmatsci.2019.100578

18. Demiralp E, Doğru G, Yılmaz H. Additive manufacturing (3D printing) methods and applications in dentistry. *Clin Exp Health Sci.* 2021;11(1):182-90.
19. Zocca A, Colombo P, Gomes CM, Günster J. Additive manufacturing of ceramics for dental applications: a review. *Dent Mater.* 2019;35(6):825-46. doi:10.1016/j.dental.2019.02.026
20. Revilla-León M, Özcan M. Additive manufacturing technologies used for processing polymers: current status and potential application in prosthetic dentistry. *J Prosthodont.* 2019;28(2):146-58. doi:10.1111/jopr.12801
21. Denry I, Kelly JR. State of the art of zirconia for dental applications. *Dent Mater.* 2008;24(3):299-307. doi:10.1016/j.dental.2007.05.007
22. Zhang F, Inokoshi M, Batuk M, Hadermann J, Naert I, Van Meerbeek B, et al. Strength, toughness and aging stability of highly-translucent Y-TZP ceramics for dental restorations. *Dent Mater.* 2016;32(12):e327-37. doi:10.1016/j.dental.2016.09.025
23. Spitznagel FA, Boldt J, Gierthmuehlen PC. CAD/CAM ceramic restorative materials for natural teeth. *J Dent Res.* 2018;97(10):1082-91. doi:10.1177/0022034518779759