

The Role of Advanced Imaging Technologies (CBCT, Artificial Intelligence, and CAD/CAM) in Aesthetic Dental Decision-Making: A Narrative Review

Ali Jamshidy¹ 

1. **Corresponding Author:** Student Research Committee, Faculty of Dentistry, Isfahan University of Medical Sciences, Isfahan, Iran
Email: Alijamshidy13791379@gmail.com

Abstract

Introduction: Dental aesthetics extend beyond mere appearance and are closely linked to oral health-related quality of life and self-esteem. The limitations of conventional two-dimensional and subjective assessment methods highlight the growing necessity for adopting advanced digital technologies. The aim of this study was to review and elucidate the role of advanced imaging technologies, including CBCT, artificial intelligence, and CAD/CAM, in enhancing accuracy, efficiency, and decision-making in aesthetic dentistry.

Materials & Methods: This narrative review examined the PubMed, Scopus, and Web of Science databases up to 2025 using keywords related to CBCT, artificial intelligence, and CAD/CAM in the context of aesthetic dental decision-making. The analysis focused on findings from recent reviews and clinical studies exploring their diagnostic and therapeutic applications.

Results: Evidence indicates that CBCT provides accurate three-dimensional assessment of facial bone thickness, facilitates prosthesis-driven implant design, and minimizes spatial errors. Artificial intelligence algorithms enhance efficiency through automated segmentation, multimodal image registration, and smile simulation, thereby reducing design time and enabling personalized treatment planning. CAD/CAM technology, by shortening laboratory procedures, improving marginal fit precision, and optimizing color matching, has significantly improved the quality of aesthetic restorations. Nevertheless, high equipment costs, the need for specialized skills, and concerns regarding radiation exposure and ethical considerations remain major challenges to their widespread clinical use.

Conclusion: Integration of CBCT, artificial intelligence, and CAD/CAM within a unified digital workflow can enhance accuracy, efficiency, and patient satisfaction in aesthetic dental treatments. Full realization of these benefits requires standardized protocols, digital competency training, and adherence to radiation safety and ethical principles.

Key words: Dental Aesthetics; CBCT; Artificial Intelligence

Received: 27.11.2025

Revised: 27.02.2026

Accepted: 27.03.2026

How to cite: Jamshidy A. The Role of Advanced Imaging Technologies (CBCT, Artificial Intelligence, and CAD/CAM) in Aesthetic Dental Decision-Making: A Narrative Review. J Isfahan Dent Sch 2026; 22 (1): 56- 74.

نقش فناوری‌های نوین تصویربرداری (CBCT، هوش مصنوعی و CAD/CAM در تصمیم‌گیری‌های زیبایی دندانپزشکی: مرور روایی

۱. نویسنده مسؤول: کمیته تحقیقات دانشجویی، دانشکده‌ی دندانپزشکی، دانشگاه علوم پزشکی اصفهان، اصفهان، ایران.
Email: Alijamshidy13791379@gmail.com

علی جمشیدی^۱ 

چکیده

مقدمه: زیبایی دندان، فراتر از جنبه ظاهری بوده و با کیفیت زندگی مرتبط با سلامت دهان و عزت نفس ارتباط مستقیم دارد. محدودیت روش‌های سنتی دوبعدی و ذهنی در ارزیابی زیبایی، ضرورت بهره‌گیری از فناوری‌های نوین را افزایش داده است. هدف این مطالعه، مرور و تبیین نقش فناوری‌های نوین تصویربرداری شامل CBCT، هوش مصنوعی و CAD/CAM در بهبود دقت، کارایی و تصمیم‌گیری‌های زیبایی در دندانپزشکی بود.

مواد و روش‌ها: این مطالعه به صورت مرور روایی، پایگاه‌های علمی PubMed، Scopus و Web of Science را تا سال ۲۰۲۵ با کلیدواژه‌های مرتبط با CBCT، هوش مصنوعی و CAD/CAM در تصمیم‌گیری‌های زیبایی بررسی کرده و بر یافته‌های مرورها و مطالعات بالینی اخیر تمرکز داشته است.

یافته‌ها: شواهد نشان می‌دهد CBCT در سنجش سه‌بعدی ضخامت استخوان فاسیال، طراحی ایمپلنت پروتز-محور و کاهش خطاهای فضایی مؤثر است. الگوریتم‌های هوش مصنوعی با قطعه‌بندی خودکار، رجیستریشن چندمدالیه و شبیه‌سازی لبخند، زمان طراحی را کاهش و شخصی‌سازی طرح درمان را تقویت می‌کنند. فناوری CAD/CAM نیز با کوتاه کردن فرایند لابراتواری، افزایش دقت Fit و بهبود تطابق رنگ، کیفیت ترمیم‌های زیبایی را ارتقا داده است. با این حال، هزینه‌های بالا، نیاز به مهارت تخصصی، و ملاحظات پرتویی و اخلاقی از چالش‌های اصلی کاربرد بالینی این فناوری‌ها محسوب می‌شوند.

نتیجه‌گیری: ادغام CBCT، هوش مصنوعی و CAD/CAM در جریان کار دیجیتال می‌تواند دقت، کارایی و رضایت بیمار را در درمان‌های زیبایی بهبود دهد. تحقق کامل این مزایا مستلزم استانداردسازی پروتکل‌ها، آموزش مهارت‌های دیجیتال و رعایت اصول ایمنی پرتویی و اخلاقی است.

کلید واژه‌ها: دندانپزشکی؛ ترمیمی؛ توموگرافی کامپیوتری با پرتو مخروطی؛ هوش مصنوعی

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۱/۰۷

تاریخ اصلاح: ۱۴۰۴/۱۲/۰۸

تاریخ ارسال: ۱۴۰۴/۰۹/۰۶

استناد به مقاله: جمشیدی علی. نقش فناوری‌های نوین تصویربرداری (CBCT، هوش مصنوعی و CAD/CAM در تصمیم‌گیری‌های زیبایی دندانپزشکی: مرور روایی. مجله دانشکده دندانپزشکی اصفهان. ۱۴۰۵؛ ۲۲ (۱): ۵۶-۷۴.

مقدمه

زیبایی دندان‌ها صرفاً به بهبود ظاهر محدود نیست و با ابعاد کیفیت زندگی مرتبط با سلامت دهان (Oral Health-Related Quality of Life) OHRQoL، عزت نفس و کارکرد اجتماعی پیوند مستقیم دارد؛ از این رو، تصمیم‌گیری بر پایه‌ی معیارهای سنجش و قابل پیش‌بینی در درمان‌های زیبایی ضرورت می‌یابد و ابزارهایی مانند پرسش‌نامه تأثیر روان‌اجتماعی زیبایی دندان‌ها (Psychosocial Impact of Dental Aesthetics Questionnaire) PIDAQ می‌تواند پیامدهای روان-اجتماعی را کمی‌سازی کنند (۱، ۲).

با وجود این اهمیت، اتکای صرف به ابزارهای سنتی (رادیوگرافی‌های دوبعدی، عکس‌های استاندارد، کست‌های گچی، wax-up آنالوگ و تطابق ذهنی رنگ) به دلیل نبود نمای سه‌بعدی هم‌زمان بافت‌های سخت و نرم، ماهیت دستی/اپراتوری مراحل و دشواری انتقال طرح به زبان مشترک تیم-بیمار، دقت و بازتولیدپذیری تصمیم‌ها را کاهش می‌دهد (۲-۴). مرورهای اخیر درباره طراحی دیجیتال لبخند (Digital Smile Design) DSD و استفاده‌های دیجیتال نشان داده‌اند که پیش‌نمایش درمان، مستندسازی ساختاریافته و ارائه بصری طرح می‌تواند رضایت و هم‌سوئی انتظارات را ارتقا دهد؛ هرچند ناهمگونی شواهد و تفاوت‌های نرم‌افزاری/جریان کار، استانداردسازی را همچنان چالش برانگیز نگه داشته است (۵-۷).

در پاسخ به این چالش‌ها، فناوری‌های نوین تصویربرداری و تولید دیجیتال، به‌ویژه توموگرافی رایانه‌ای با پرتو مخروطی (Cone-Beam Computed Tomography) CBCT، هوش مصنوعی و طراحی به کمک رایانه/ساخت به کمک رایانه (Computer-Aided Design/ Computer-Aided Manufacturing) CAD/CAM، در کانون توجه قرار گرفته‌اند (۸، ۹). با بازنمایی سه‌بعدی دقیق ساختارهای دندان‌ها و فک-صورت، سنجش پارامترهای تصمیم‌درجه (مثلاً ضخامت فاسیال بحرانی، توپولوژی ستیغ و مجاورت ساختارهای حیاتی) و برنامه‌ریزی پروتز-محور را ممکن می‌سازد؛ با این تأکید که نسخه‌نویسی باید اندیکاسیون‌محور

و تابع اصول حفاظت پرتویی باشد و CBCT ابزار غربالگری روتین محسوب نمی‌شود (۱۰-۱۲).

هوش مصنوعی (Artificial intelligence) AI در تحلیل تصویر، قطعه‌بندی و لندمارک‌گذاری، رجیستریشن چندمدالیه و پشتیبانی از DSD می‌تواند زمان طراحی را کاهش و شخصی‌سازی را تقویت کند؛ اما ترجمه ارزش فنی به ارزش بالینی منوط به کیفیت/نمایندگی داده، اعتبارسنجی خارجی و توضیح‌پذیری است (۵، ۱۳-۱۵). پذیرش طرح‌های برآمده از AI نیز به ظرایف ادراک زیبایی و تقارن چهره وابسته است و قضاوت بالینی انسان در سناریوهای پیچیده حیاتی می‌ماند (۱۶، ۱۷).

در کنار آن، CAD/CAM، زنجیره طراحی-ساخت دیجیتال (افزایشی/کاهشی) تطابق، کارایی و رضایت بیمار را در بازسازی‌های پرسلنی، ونیرهای حداقل تهاجمی و پروتزهای ایمپلنتی بهبود می‌دهد؛ هرچند پایداری رنگ/سایش برخی مواد، نیازهای آموزشی و هزینه‌های سرمایه‌ای/نگهداشت، محدودیت‌های عملی مهم‌اند و ناهمگونی روش‌شناختی مانع از نتیجه‌گیری درباره برتری مطلق می‌شود (۱۸-۲۲).

یکپارچه‌سازی داده‌های اسکنر داخل‌دهانی (Intraoral Scanner) IOS و (در صورت اندیکاسیون) CBCT و اسکن چهره در قالب مجازی بیمار، همراه با DSD و تولید راهنما/ترمیم از مسیر CAD/CAM، تصمیم‌سازی زیبایی را از حدس مبتنی بر تجربه به طرح مبتنی بر داده نزدیک می‌کند (۲۳، ۲۴). در ایمپلنتولوژی ناحیه‌ی زیبایی، این هم‌افزایی به جایگذاری سه‌بعدی کنترل‌شده، کاهش انحراف از طرح و بهبود پیش‌بینی‌پذیری بافتی می‌انجامد؛ با این حال، دقت رجیستریشن، یکنواختی معیارهای سنجش گزارش پیامدهای زیبایی و همسان‌سازی پروتکل‌های دیجیتال، همچنان شکاف‌های پژوهشی برجسته‌اند (۸، ۲۵-۲۸).

بر این مبنا، هدف این مرور روایی، تبیین نقش CBCT، AI و CAD/CAM در ارتقای کیفیت تصمیم‌گیری‌های زیبایی با تمرکز بر اندیکاسیون‌ها و محدودیت‌ها، الزامات

ایمنی پرتویی و ملاحظات اخلاقی/تنظیمی و ارائه الگوهای ادغام در جریان کار دیجیتال است تا شکاف طرح تا اجرا برای دندانپزشک بالینی کاهش یابد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش از نوع مرور روایی است که با هدف بررسی نقش فناوری‌های نوین تصویربرداری شامل توموگرافی رایانه‌ای با CBCT، AI و CAD/CAM در تصمیم‌گیری‌های زیبایی دندانپزشکی انجام شد. جستجوی نظام‌مند منابع در پایگاه‌های PubMed، Scopus و Web of Science انجام گرفت و مقالات منتشر شده از سال ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۵ که به ارزیابی کاربردهای این فناوری‌ها در حوزه زیبایی دندانپزشکی پرداخته بودند، مورد بررسی قرار گرفتند. واژه‌های کلیدی مورد استفاده شامل ترکیب‌هایی از اصطلاحات “Cone Beam Computed، CBCT”، “Artificial Intelligence، Tomography”، “CAD/CAM”، “Smile”، “Digital Dentistry”، “Design”، “Virtual Patient”، “Esthetic Dentistry”، “Digital Workflow” بودند. در مرحله غربالگری، عناوین و چکیده‌ها توسط دو پژوهشگر به‌طور مستقل بررسی شدند و مطالعات نامرتب، فاقد ارتباط با تصمیم‌گیری‌های زیبایی یا بدون مداخله دیجیتال از تحلیل حذف گردیدند. سپس متون کامل مقالات منتخب مرور و اطلاعات کلیدی از جمله نوع مطالعه، فناوری بررسی‌شده، سال انتشار، نوع مداخله، جمعیت یا بستر مطالعه، نتایج اصلی و چالش‌های گزارش‌شده استخراج شد. معیار ورود شامل مطالعات مروری، کارآزمایی‌های بالینی، مطالعات تجربی و گزارش‌های موردی بود که به کاربرد CBCT، هوش مصنوعی یا CAD/CAM در طراحی لبخند، ایمپلنتولوژی ناحیه قدامی، یا ترمیم‌های زیبایی (ونیر و روکش‌های سرامیکی) پرداخته بودند. مطالعات فاقد داوری علمی، غیرانگلیسی یا خارج از حوزه زیبایی از مرور حذف شدند. تحلیل داده‌ها به‌صورت کیفی و محتوایی انجام شد. یافته‌ها در

چارچوب مقایسه‌ای میان فناوری‌ها تحلیل گردید تا نقش CBCT در تصمیم‌گیری‌های سه‌بعدی و سنجش پارامترهای زیبایی، کارآیی الگوریتم‌های هوش مصنوعی در قطعه‌بندی و رجیستریشن خودکار تصاویر، و توانمندی سامانه‌های CAD/CAM در ارتقای دقت و بازتولیدپذیری ترمیم‌های زیبایی تبیین شود. در ادامه، مطالعاتی که به تلفیق فناوری‌ها و ایجاد مدل بیمار مجازی در جریان کار دیجیتال اشاره داشتند نیز مرور شدند تا میزان هم‌افزایی و چالش‌های اجرایی آن‌ها تحلیل گردد. در مرحله نهایی، نتایج به‌دست‌آمده با دستورالعمل‌های بالینی و چارچوب‌های گزارش‌دهی بین‌المللی نظیر CONSORT-AI، TRIPOD+AI (2023) و راهنمای انجمن دندانپزشکی آمریکا (JADA 2020) و درباره تجویز ایمن CBCT و استانداردهای داده‌محور در هوش مصنوعی مقایسه و تفسیر شد. این روش‌شناسی امکان استخراج دیدگاهی جامع و کاربردی از شواهد موجود درباره ادغام فناوری‌های دیجیتال در تصمیم‌گیری‌های زیبایی دندانپزشکی را فراهم ساخت.

ارزش CBCT در زیبایی دندانپزشکی

سامانه‌ای مقطعی با پرتو مخروطی و آشکارساز تخت است که حجم سه‌بعدی فک و صورت را با وکسل‌های ایزوتروپیک ساب‌میلی‌متری بازسازی می‌کند، و برخلاف تصویربرداری دوبعدی، اندازه‌گیری کمی ساختارهای سخت در سه صفحه عمود را برای تصمیم‌گیری زیبایی فراهم می‌سازد (۲۹-۳۱).

از منظر ایمنی پرتویی، CBCT در دندانپزشکی به‌طور میانگین حدود ۱۲ برابر کم‌دوزتر از CT پزشکی گزارش شده و دامنه دوز مؤثر آن، بسته به دستگاه/پروتکل / میدان دید FOV (Field of View)، حدود $11\mu\text{Sv}$ تا $1410\mu\text{Sv}$ است؛ بنابراین نسخه‌نویسی اندیکاسیون‌محور، انتخاب FOV کوچک/متوسط و پروتکل‌های کمترین دوز قابل قبول تشخیصی (As Low As Reasonably Achievable/ As Low As Diagnostically Acceptable) ضروری است. راهنمایی‌های اخیر (از جمله JADA 2024) CBCT را ابزار غیرغیرالگوری دانسته و

تأکید می‌کنند که ارزش افزوده زمانی حاصل می‌شود که داده سه‌بعدی مستقیماً به تصمیم‌های پروتز-محور قابل اجرا ترجمه شود (۳۲-۳۴).

در ناحیه‌ی قدامی ماگزایلا، دیواره لبی معمولاً نازک است و در بخش بزرگی از دندان‌های قدامی ضخامت بحرانی فاسیال ≥ 1 میلی‌متر گزارش شده است؛ CBCT با مقاطع Coronal/sagittal/axial امکان رده‌بندی مورفولوژی دیواره‌ی لبی و هدف‌گذاری بالینی، برای نمونه، ≤ 2 میلی‌متر ضخامت باکال در طرح‌های استتیک/ایمپلنت، را مهیا می‌کند (۳۵-۳۷، ۱۱). افزون‌براین، در آشکارسازی و اندازه‌گیری نقص‌های آلوئولی (Dehiscence/fenestration) نسبت به روش‌های دوبعدی حساس‌تر است؛ با این حال به دلیل ویژگی‌های متوسط گزارش‌شده، تطبیق با معیاره بالینی و در صورت لزوم تصویربرداری مکمل برای پیشگیری از تشخیص افراطی توصیه می‌شود (۳۸).

به سبب کنتراست محدود بافت نرم، CBCT برای تحلیل دینامیک لب‌خند یا مؤلفه‌های نرم‌نسجی ایده‌آل نیست؛ اما ادغام CBCT با IOS و اسکن سه‌بعدی صورت، بیمار مجازی می‌سازد که انطباق فضایی اهداف زیبایی، از gingival display و smile arc تا midline و تقارن چهره، را در چارچوب محدودیت‌های بافت سخت ممکن می‌کند و پیش‌نمایش کمی/دیداری طرح را ارتقا می‌دهد (۳۹-۴۲). در ایمپلنتولوژی ناحیه زیبایی، هم‌ترازی CBCT با IOS و اجرای جراحی هدایت‌شده استاتیک/دینامیک، ترجمان مستقیم طرح سه‌بعدی به عمل است و در مقایسه با روش آزاد، انحراف اپیکالی را حدود ۱-۲ میلی‌متر و انحراف زاویه‌ای را حدود ۲-۶ درجه نگه می‌دارد؛ مقداری که مبنای حاشیه ایمنی تقریباً ۲ میلی‌متر از ساختارهای حیاتی در برنامه‌ریزی محسوب می‌شود. در پیکربندی‌های دینامیک/روباتیک با کالیبراسیون و ردیابی دقیق، عملکرد بهتر نیز گزارش شده، هرچند کیفیت رجیستریشن/کالیبراسیون و نوع تکیه‌گاه راهنما (دندانی در برابر مخاطی/استخوانی) تعیین‌کننده‌اند (۲۶، ۴۳، ۴۴). در برخی پیکربندی‌ها از جمله سامانه‌های دینامیک/روباتیک با

کالیبراسیون و ردیابی دقیق، مقادیر کمتر از دامنه‌های فوق نیز گزارش شده، هرچند نتایج به‌شدت به کیفیت رجیستریشن/کالیبراسیون و نیز نوع حمایت راهنما (دندانی در مقایسه با مخاطی/استخوانی) وابسته است (۲۶، ۴۵).

از منظر بالینی، برتری اصلی CBCT نسبت به تصویربرداری دوبعدی این است که خطاهای ناشی از روی هم افتادگی ساختارهای آناتومیک را حذف می‌کند و امکان اندازه‌گیری سه‌بعدی دقیق ساختارهای سخت را فراهم می‌سازد (مثلاً ضخامت فاسیال، حجم نقص‌های آلوئولی، فاصله ایمن تا ساختارهای حیاتی). به همین دلیل دقت پیش‌بینی پیامدهای زیبایی، از تعیین موقعیت سه‌بعدی ایمپلنت تا برنامه‌ریزی محافظه‌کارانه ونیر و تصمیم درباره ضرورت و نوع افزایش بافت، بالاتر می‌رود. در مقابل، هزینه سرمایه‌ای و منحنی یادگیری دستگاه، آرتیفکت‌های فلزی و وابستگی کیفیت تصویر به پارامترهای اسکن (اندازه و کسل، FOV، kVp/ma و کاهش آرتیفکت فلزی (Metal Artifact Reduction) از محدودیت‌های عملی مهم‌اند. برای بهینه‌سازی، FOV کوچک یا متوسط و پروتکل کم‌دوز با تنظیمات مناسب (همراه با MAR در صورت وجود فلز) به کار ببرید؛ این رویکرد با اصول ALARA/ALADA هم‌سو است و گفت‌وگوی آگاهانه درباره سود-زیان درمان‌های زیبایی را تسهیل می‌کند. (۳۲، ۴۶-۴۹). خلاصه عملی اندیکاسیون‌ها، پروتکل‌ها و خروجی‌های تصمیم‌درجه در جدول ۱ آورده شده است.

در سناریوهای تصمیم‌گیری بالینی با نیاز به داده‌های سه‌بعدی درباره ضخامت دیواره فاسیال، نقص‌های آلوئولی یا طراحی ایمپلنت پروتز-محور نیاز دارند، CBCT نسبت به تصویربرداری دوبعدی پری‌اپیکال/پانورامیک ارجح است، زیرا امکان اندازه‌گیری کمی در سه صفحه عمود و برآورد حاشیه ایمنی را فراهم می‌کند؛ در مقابل، برای ارزیابی‌های غیرسه‌بعدی روتین همان تصویربرداری دوبعدی کفایت دارد (۵۰). بر این مبنا، CBCT فقط هنگام وجود پرسش سه‌بعدی مشخص و با میدان دید کوچک و پروتکل کم‌دوز تجویز

جدول ۱. ماتریس Decision-Grade برای تجویز CBCT در ناحیه‌ی زیبایی (۲۹، ۳۲، ۳۴، ۴۶-۴۹)

سؤال بالینی	اندیکاسیون / ارزش افزوده CBCT	پروتکل پیشنهادی	خروجی‌های کمی تصمیم‌درجه	هشدار/احتیاط
ضخامت فاسیال قدامی	نیاز به سنجش سه‌بعدی برای پیشگیری از تحلیل و پس‌روی لثه	FOV کوچک - متوسط، Low-dose، voxel ریز	ضخامت فاسیال هدف: ≥ 2 میلی‌متر؛ فاصله از ساختارهای حیاتی: ≈ 2 میلی‌متر	CBCT ابزار غربالگری نیست؛ توجیه پرتویی لازم است
نقص‌های آلوئولی (Dehiscence/fenestration)	حساسیت بالاتر نسبت به 2D؛ برنامه‌ریزی افزایش بافت	مطابق بالا (+) MAR در حضور فلز	رده‌بندی نقص/حجم نقص؛ یافته‌ها با معاینه یا تصویر مکمل برای جلوگیری از over-calling	ویژگی متوسط؛ مطابقت
ایمپلنت فوری قدامی	طرح پروتز-محور و مسیر سه بعدی جایگذاری	FOV کوچک - متوسط، Low-dose در صورت فلز: MAR	مسیر سه بعدی ایمپلنت؛ فاصله لبی/پالاتالی؛ شبیه‌سازی گاید	اتکا نکردن به CBCT برای بافت نرم؛ ادغام با IOS/Face
آماده‌سازی محافظه کارانه ونیر	در صورت شک به باریکی ستیغ/حریم ریشه	در صورت اندیکاسیون	ضخامت مینایی/حریم ریشه - کورتکس	اگر صرفاً افزودنی و کم ریسک است IOS+Face: کفایت دارد

AI در تصمیم‌گیری‌های زیبایی

AI مجموعه‌ای از الگوریتم‌هاست که با یادگیری الگوهای داده، در تشخیص، پیش‌بینی و بهینه‌سازی عملکردی، هم‌سنگ یا فراتر از انسان ارائه می‌کند و کاربرد آن در دندانپزشکی از سامانه‌های قاعده‌محور به یادگیری ماشین/عمیق (Machine Learning / Deep Learning) شامل ML/DL گذار کرده است؛ امروز استفاده‌های محوری شامل قطعه‌بندی سه‌بعدی، رجیستریشن چندوجهی CBCT+IOS(+Face) برای ساخت بیمار مجازی و پشتیبانی از DSD است که شواهد اخیر دقت فنی و بهبود تجربه/رضایت بیمار را برای آن‌ها نشان داده‌اند (۵۳-۶۱).

AI به‌عنوان لایه تحلیلی - پیش‌بینی گر طرح‌ریزی عمل می‌کند: استخراج خودکار لندمارک‌های دندان/صورتی و قطعه‌بندی دندان/استخوان روی تصاویر 2D/3D (از جمله CBCT) امکان سنجش کمی نمایش لثه، قوس لب‌خند و هم‌خطی دندان - صورت را فراهم می‌سازد و در مطالعات بزرگ چندمرکزی به کارآیی رقابت‌پذیر (مثلاً ≈ 0.94 ضریب

شود و داده حجمی حتماً با IOS برای طرح پروتز - محور ادغام گردد (۴۲). همچنین در درمان‌های افزودنی کم‌تهاجم مانند ونیر بر بستر مینایی سالم با مرزهای استخوانی دست‌نخورده، ترکیب اسکن چهره و IOS پاسخ‌گو است، اما در ایمپلنت فوری، تحلیل ستیغ، مجاورت ساختارهای حیاتی یا برنامه‌های افزایش بافت، افزودن CBCT ارزش افزوده تصمیم‌درجه ایجاد می‌کند؛ بنابراین هرگاه تصمیم از لایه نرم/دندانی به ارزیابی مرز استخوان و حریم آناتومیک عبور می‌کند، CBCT باید وارد جریان شود (۵۱). نهایتاً، برای میدان دید کوچک دندانی، CBCT به‌سبب دوز کمتر و تفکیک فضایی مناسب انتخاب نخست است و CT پزشکی (medical computed tomography) (MDCT) را باید برای ضایعات گسترده، تروما یا جراحی‌های ارتوگناتیک با نیاز به میدان دید و کنتراست بافت نرم وسیع‌تر نگه داشت؛ به بیان دیگر، پیش‌فرض CBCT دندانی است و ارتقا به MDCT فقط با اندیکاسیون ماگزیلوفاسیال/سیستمیک موجه خواهد بود (۵۲).

شباهت (Dice) و صرفه زمانی نسبت به کار دستی دسته یافته است؛ وقتی این توانمندی در زنجیره داده‌ای یکپارچه (عکس‌های استاندارد، IOS، و در صورت اندیکاسیون CBCT و اسکن صورت) با رجیستریشن خودکار مبتنی بر یادگیری ماشین/ یادگیری عمیق ادغام شود، بیمار مجازی برای تحلیل زیبایی، گزینش گزینه‌ها و ارزیابی کمی پیامدها حاصل می‌گردد (۶، ۶۲-۶۵).

مسیر AI از اثبات مفهوم به ابزار پشتیبان تصمیم بالینی مستلزم کیفیت/نماینده‌گی داده، اعتبارسنجی خارجی و توضیح‌پذیری است؛ این الزامات در راهنماهای به‌روز (CONSORT-AI، TRIPOD+AI) و مباحث AI قابل اعتماد و مقررات اروپایی (EU AI Act 2024) تصریح شده‌اند (۵۳-۵۶).

در چارچوب تصمیم‌گیری مشترک بیمار- دندان‌پزشک (SDM)، هوش مصنوعی دو نقش عملی مشخص دارد: (۱) با تولید پیش‌نمایش‌های قبل از درمان (تصاویر و ماک‌آپ‌های دیجیتال مبتنی بر داده بیمار) فهم مشترک از نتیجه محتمل را ایجاد می‌کند و رضایت و هم‌سوایی انتظارات را افزایش می‌دهد؛ (۲) با ارائه معیارهای سنجش عددی و سناریوهای مقایسه‌ای روشن مانند برآورد شکاف فیت، انحراف مورد انتظار گاید، زمان و هزینه، گفت‌وگوی ساختارمند درباره منافع، مخاطرات و هزینه‌ها را مطابق راهنمای NICE NG197 تسهیل می‌کند (۶، ۶۲).

در استفاده از زیبایی مبتنی بر هوش مصنوعی، رعایت سه اصل به‌هم‌پیوسته ضروری است: اعتبار، سنجش‌پذیری و ادغام. از نظر اعتبار، نرم‌افزارهای شبیه‌ساز لبخند تنها تصویری احتمالی از نتیجه پیش از درمان ارائه می‌دهند و نمی‌توانند تمامی پیامدهای واقعی پس از درمان را پیش‌بینی کنند؛ بنابراین این ابزارها نقش کمک‌به‌تصمیم دارند و قضاوت نهایی همچنان بر عهده دندان‌پزشک است (۵۳، ۶۶، ۶۷). از نظر سنجش‌پذیری، باید عملکرد مدل‌ها با شاخص‌های استاندارد و همراه با فواصل اطمینان گزارش شود تا ارزیابی و مقایسه بالینی ممکن گردد؛ برای نمونه، در قطعه‌بندی یا

لندمارک‌گذاری از شاخص‌های Dice، IoU و MAE، و در مدل‌های پیش‌بینی از کالیراسیون و تحلیل منفعت خالص استفاده می‌شود. گزارش نتایج مطابق دستورالعمل‌های TRIPOD+AI و CLAIM 2024 دقت و شفافیت را تضمین می‌کند (۵۳، ۶۶، ۶۷). از نظر ادغام، ارزش بالینی زمانی حاصل می‌شود که خروجی مدل، از رجیستریشن خودکار تصاویر CBCT و IOS در ساخت بیمار مجازی گرفته تا انعکاس آن در DSD و انتقال نهایی به سامانه‌های CAD/CAM در تمام مراحل درمان به کار گرفته شود؛ در این صورت، نتایج مدل به اقدامات بالینی واقعی مانند هدایت آماده‌سازی، انتخاب راهبرد ترمیمی و برنامه‌ریزی جایگذاری ایمپلنت تبدیل می‌شود (۶۱، ۶۸).

در مقایسه‌ی هوش مصنوعی با کار دستی متخصص، شواهد نشان می‌دهد که در کیس‌های پر حجم و نیازمند سنجش‌های تکرارپذیر، الگوریتم‌های AI برای قطعه‌بندی و لندمارک‌گذاری می‌توانند زمان را کاهش دهند و واریانس اپراتوری را کنترل کنند، اما در حضور آرتیفکت فلزی یا آناتومی‌های غیرمعمول همچنان بازبینی انسانی ضروری است؛ بنابراین رویکرد بهینه AI-first با نظارت انسانی است و توصیه می‌شود عملکرد با معیارهای سنجش Dice یا میانگین خطای قدر مطلق MAE (Mean Absolute Error) همراه با فواصل اطمینان گزارش شود (۶۹). در حوزه رجیستریشن خودکار مبتنی بر ML/DL در برابر روش دستی، پژوهش‌های اخیر نشان داده‌اند که در قوس کامل و برنامه‌ریزی پروتز-محور، رجیستریشن خودکار سرعت و پایداری بالاتری از خود نشان می‌دهد، در حالی که در موارد تک‌واحدی با داده با کیفیت، رجیستریشن دستی می‌تواند کفایت کند؛ براین اساس، در قوس کامل دندانی و ایمپلنت قدامی بهتر است از رجیستریشن ML/DL با نقاط کنترل تأییدی استفاده شود و در صورت عدم تطابق، به پروتکل دستی استاندارد بازگشت داده شود (۳۹). در زمینه‌ی شبیه‌سازی لبخند مبتنی بر AI در برابر DSD تمپلیت‌محوری نیز نشان داده شده است که AI امکان شخصی‌سازی مورفومتریک و تولید سناریوهای مقایسه‌ای سریع را فراهم می‌کند، در حالی که DSD

تمپلیت محور برای تنظیمات ساده مانند خط میانی و قوس لبخند کافی است؛ با این وجود، پیش‌بینی همه مؤلفه‌های پسادرمانی کامل نیست و باید عدم قطعیت‌ها با بیمار شفاف‌سازی شود تا تصمیم نهایی همچنان بر پایه معیارهای سنجش بالینی و امکان‌سنجی مواد/باندینگ گرفته شود (۴۲) (جدول ۲).

CAD/CAM در تصمیم‌گیری‌های زیبایی

سامانه‌های طراحی و ساخت به کمک رایانه (CAD/CAM) از دو مؤلفه مکمل شامل CAD برای مدل‌سازی دیجیتال و CAM برای ساخت افزایشی یا کاهشی راهنماها و ترمیم‌ها، تشکیل می‌شوند. این فناوری‌ها از نخستین نسل‌های کرسی‌ساید/لابراتواری دهه ۱۹۸۰ فراتر رفته و با پیشرفت اسکنرهای داخل دهانی، نرم‌افزارهای طراحی و فرز/چاپ سه‌بعدی، به ابزار روزمره تصمیم‌سازی و تولید در ترمیم‌های زیبایی و ایمپلنتولوژی تبدیل شده‌اند؛ انتخاب مسیر کرسی‌ساید، لابراتواری یا متمرکز تابع پیچیدگی کیس، منابع انسانی و زیرساخت مرکز است (۷۰، ۷۱).

در جریان کارهای زیبایی، CAD/CAM با تبدیل داده‌های تصویری به مدل‌های سه‌بعدی قابل ساخت، فاصله میان طرح و اجرا را کوتاه می‌کند. ورودی‌ها معمولاً عکس‌های استاندارد و IOS هستند، و در صورت لزوم اندیکاسیون CBCT و اسکن سه‌بعدی صورت نیز افزوده می‌شوند. هم‌ترازی مدالیت‌ها در محیط طراحی، بیمار مجازی

را ایجاد می‌کند تا لندمارک‌های دندانی-صورتی و اهداف زیباشناختی بر یک مرجع مشترک بنشینند و خروجی طرح بی‌واسطه به راهنماهای جراحی/کلینیکی، ماک‌آپ‌ها و ترمیم‌های نهایی ترجمه شود. جمع‌بندی مرورهای به‌روز نشان می‌دهد جریان کار تمام‌دیجیتال در پروتزهای ثابت و ایمپلنتی، به‌ویژه در سناریوهای تک‌واحدی و برخی چندواحدی، از نظر دقت، کارآیی و بازتولیدپذیری به بلوغ عملیاتی نزدیک شده است، هرچند ناهمگونی روش‌ها و گزارش‌گری همچنان محل توجه است (۱۸، ۷۲، ۷۳).

DSD در دل این زنجیره، واسط تصمیم‌سازی است، به گونه‌ای که تصویرسازی پیش از درمان و کمی‌سازی قوس لبخند/نمایش لثه/خط میانی، گفت‌وگوی مبتنی بر معیارهای سنجش تیم-بیمار را ممکن می‌کند و انتخاب عقلانی‌تر میان گزینه‌های ترمیمی، از ونیر حداقل تهاجمی تا بازطراحی‌های جامع، را تسهیل می‌سازد. کارآزمایی‌ها و مرورهای گذشته نشان داده‌اند که ادغام DSD قادر به افزایش رضایت و هم‌سویی انتظارات و در برخی شاخص‌ها بهبود کیفیت ترمیم نهایی است. بدین ترتیب، DSD در متن CAD/CAM، فراتر از تصویرسازی عمل کرده و به ارتقای تصمیم‌سازی بالینی می‌انجامد (۵، ۶). از منظر مواد و فرایند ساخت، ترمیم‌های تمام‌سرامیک تولیدشده با سامانه‌های CAD/CAM، به‌ویژه شیشه‌سرامیک‌های لیتیوم دی‌سیلیکات، در پیگیری‌های

جدول ۲. الزامات Reporting و کاربرد کلینیکی AI در زیبایی (۵۳-۵۶، ۶۳-۶۵، ۶۶، ۶۷)

تکلیف AI	معیارهای سنجش گزارش (با CI)	داده/اعتبارسنجی	ریسک‌ها/سوگیری‌ها	پیوند به تصمیم بالینی
قطعه‌بندی دندان/استخوان	MAE, Dice/IoU (با فاصله اطمینان)	اعتبارسنجی خارجی، تنوع دستگاه/جمعیت	آرتیفکت فلزی، داده خارج از دام	سنجش کمی نمایش لثه/قوس/هم‌خطی؛ پایه DSD
لندمارک‌گذاری	MAE هر لندمارک CI+	مجموعه تست مستقل چندمرکزی	سوگیری اپراتور/دوربین	هماهنگ‌سازی طرح با چهره؛ تطبیق midline
رجیستریشن چندمدالیت	خطای رجیستریشن (RMS/voxel)	Cross-device/ Cross-site	عدم تطابق داده، نویز	ساخت بیمار مجازی؛ گاید دقیق
شبیه‌سازی لبخند/پیش‌بینی	Calibration Decision (Brier/ECE) Curve Analysis	مطالعات-prospective/real-world	خوش‌بینی مدل، تفسیرپذیری	SDM و تنظیم انتظارات؛ ابزار کمک به تصمیم

جدول ۳. CAD/CAM مسیر- ماده (Fit (Path-Material-Fit) (۷۷-۷۳، ۱۰۶)

سناریو	مسیر کار	ماده‌ی پیشنهادی	هدف Fit	نکات آماده‌سازی/سمان
ونیر قدامی بر مینای سالم	Chairside یا Lab	لیتیوم دی‌سیلیکات (LDS)	شکاف مرزی در حد ده‌ها μm	آماده‌سازی حداقلی هدایت‌شده؛ باندینگ ادهزیو
چنداحدی قدامی پر استتیک	Lab/Center	LDS یا زیرکونیای HT	مطابق بالا	کنترل رنگ/کانتور لابراتواری؛ Try-in گسترده
کرون نواحی پر بار/ضخامت محدود	Chairside/Lab	زیرکونیای مونولیتیک	مطابق بالا	سمان رزینی/گلاس آینومر رزینی بسته به ریتشن
گاید/ماک‌آپ/موقتی رزینی	—	رزین پرینتی	تطابق عملیاتی	3D Printing برای چاپکی؛ مستندسازی آستانه Fit

میان‌مدت و بلندمدت، بقای بالینی رضایت‌بخش و پایداری زیبایی شناختی مناسب را نشان داده‌اند. در ونیرهای باندشده به مینای سالم، میزان بقای ترمیم (Survival rate) بسیار بالا گزارش شده است، در حالی که شکست‌های ساختاری (Catastrophic fractures) و دبان‌دینگ‌های (Debonding) موضعی همچنان از مکانیسم‌های اصلی نارسایی بالینی محسوب می‌شوند. از نظر دقت تطابق (Marginal fit accuracy)، شکاف‌های مرزی ترمیم‌های CAD/CAM معمولاً در محدوده‌ی پذیرفته‌شده بالینی (Clinically acceptable) قرار دارند؛ میانگین فاصله مرزی گزارش‌شده برای روکش‌های تک‌واحدی (Single-unit crowns) عموماً در حدود چند ده میکرون (تقریباً 40-80 μm) است، و اختلاف این مقادیر نسبت به روش‌های سنتی از نظر آماری اندک و از نظر بالینی فاقد اهمیت عملی ارزیابی شده است. (۷۲-۷۶). خلاصه انتخاب مسیر (Chairside/lab/center)، ماده و هدف Fit در جدول ۳ آورده شده است.

ارزش CAD/CAM زمانی بهینه می‌شود که داده‌برداری استاندارد و طراحی زیباشناختی برپایه معیارهای سنجش رعایت شود؛ کنترل کیفی تطابق و رنگ انجام گیرد؛ و انتخاب میان مسیر تمام‌دیجیتال یا ترکیبی بر پایه شاخص‌های کمی Fit و زمان، شرایط بالینی اختصاصی هر بیمار (مانند خط لب‌خند و بستر مینایی/دنتینی) و ترجیحات او، نه صرفاً جذابیت فناوری، صورت گیرد (۷۴-۷۶).

انتخاب مسیر و ماده در جریان کار دیجیتال تابع پیچیدگی

کیس، بستر مینایی/دنتینی و نیاز به کنترل زیبایی است: در روکش/ونیر تک‌واحدی بر بستر مینای سالم، مسیر chairside معمولاً سریع‌تر و از نظر بالینی به‌اندازه کافی دقیق است، اما در موارد چندواحدی قدامی با الزامات زیبایی پیچیده یا نیاز به کنترل دقیق رنگ و کانتور، لابراتوار یا مرکز دیجیتال به دلیل برتری کنترل کیفی ارجح است (۷۷). در سطح فناوری ساخت، Milling برای ترمیم‌های سرامیکی قطعی، نظیر لیتیوم دی‌سیلیکات یا زیرکونیا، به‌طور معمول تطابق و خواص مکانیکی مطلوب‌تری فراهم می‌کند، در حالی که 3D printing برای راهنماهای جراحی، ماک‌آپ‌ها و موقتی‌های رزینی، چاپکی و صرفه زمانی/هزینه بهتری دارد (۷۸). در سطح انتخاب ماده، لیتیوم دی‌سیلیکات در ونیرهای باندشونده بر مینای سالم و در اولویت‌های ترنس‌لوسنسی/باندینگ قوی مناسب‌تر است، در حالی که زیرکونیا در نواحی پر بار یا با محدودیت ضخامت به سبب استحکام بالاتر ترجیح دارد (۷۹). بر این مبنا، تک‌واحدی‌های کم‌پیچیدگی را با Chairside انجام دهید، کیس‌های چندواحدی قدامی یا نیازمند تکمیل نهایی سطح ترمیم را به Lab/center بسپارید؛ برای ترمیم قطعی سرامیکی از Milling بهره ببرید و Printing را برای ابزارها و ترمیم‌های رزینی موقتی به کار گیرید و آستانه Fit را مستند کنید؛ ونیر قدامی باندشونده را با LDS و کرون نواحی پر بار یا با ضخامت کم را با زیرکونیای مونولیتیک/HT و پروتکل سمان متناسب انتخاب نمایید (۸۰).

یکپارچه‌سازی فناوری‌ها: از بیمار مجازی تا اجرای هدایت‌شده

در رویکرد بیمار مجازی، هم‌ترازسازی چندمدالیت (CBCT)، اسکن داخل‌دهانی و در صورت لزوم اسکن سه‌بعدی (صورت) خروجی تصویری را مستقیماً به تصمیم‌های درمانی و اجرای کلینیکی متصل می‌کند (۳۹). CBCT قادر به فراهم‌سازی چارچوب سه‌بعدی دقیق بافت‌های سخت، IOS و Face-scan قادر به افزایش وضوح لایه دندان/نرم‌نسجی هستند که با رجیستریشن معتبر، یک مدل واحد ترمیم‌محور برای برنامه‌ریزی ساخته می‌شود (۳۹، ۶۱، ۶۴).

لایه تحلیلی AI با قطعه‌بندی و لندمارک‌گذاری خودکار، سنسج‌های کمی زیبایی (نمایش لثه، قوس لبخند، تراز دندان - صورتی) را پایدار و تکرارپذیر می‌کند؛ در مجموعه داده‌های بزرگ CBCT، دقت‌های رقابت‌پذیر (مثلاً ۰/۹۴ ≈ Dice) گزارش شده است که زیرساخت لازم برای طرح‌ریزی بر پایه معیارهای سنسج را فراهم می‌کند (۶۳، ۸۱، ۸۲).

در گام تبدیل طرح به محصول بالینی، CAD طراحی ترمیم/اسپلینت/راهنمای جراحی را انجام می‌دهد و CAM (چاپ سه‌بعدی/فرز) آن را به خروجی دقیق کلینیکی بدل می‌کند؛ این هم‌افزایی هم‌زمان خطاهای Superimposition دوبعدی و واریانس مراحل دستی را می‌کاهد، تعامل تیم-بیمار را با پیش‌نمایش‌های قابل‌فهم تقویت می‌کند و پیش‌بینی‌پذیری پیامدهای زیبایی و جایگذاری ایمپلنت را بهبود می‌بخشد (۵، ۸۳).

در ایمپلنتولوژی ناحیه زیبایی، هم‌ترازی CBCT با IOS و اجرای جراحی هدایت‌شده استاتیک/داینامیک، طرح سه‌بعدی را به عمل ترجمه می‌کند و نسبت به روش آزاد، انحراف اپیکالی تقریباً ۲-۱ میلی‌متر و انحراف زاویه‌ای حدود ۲ تا ۶ درجه را حفظ می‌نماید؛ این سطوح مبنای حاشیه ایمنی برابر با حدوداً ۲ میلی‌متر از ساختارهای حیاتی در برنامه‌ریزی است. عملکرد بهتر در پیکربندی‌های داینامیک/روباتیک به کیفیت رجیستریشن/کالیبراسیون و نوع تکیه‌گاه راهنما (دندانی در برابر مخاطی/استخوانی) وابسته است (۱۱، ۷۳، ۸۴).

ستون کارکردی CBCT+IOS، با هم‌پوشانی دقیق DICOM با مدل‌های STL/PLY، سنسج‌های تصمیم‌درجه (ضخامت باکال، فاصله از ساختارهای حیاتی، هم‌خطی دندان - صورتی) را ممکن می‌سازد؛ سپس DSD اهداف زیبایی (قوس لبخند، نمایش لثه، خط میانی) را بر همان مرجع مشترک صورت‌بندی می‌کند و AI با خودکارسازی پردازش تصویر، زمان و واریانس اپراتوری را می‌کاهد (۶، ۱۲، ۸۵-۸۸). الگوریتم عملی از بیمار مجازی تا اجرا به صورت پیوسته چنین پیش می‌رود: ابتدا داده‌ها شامل عکس‌های استاندارد صورت/داخل‌دهان و IOS گردآوری می‌شود و در صورت اندیکاسیون، CBCT با میدان دید کوچک و پروتکل کم‌دوز به همراه اسکن سه‌بعدی صورت افزوده می‌گردد (۱۰)؛ سپس با رجیستریشن معتبر IOS/Face بر روی CBCT، مدل یکپارچه بیمار مجازی ساخته می‌شود (۸۵). بر پایه این مدل، تحلیل زیبایی (نمای لثه، قوس لبخند، خط میانی و ...) هم‌زمان با پارامترهای بافت سخت (اندازه‌گیری ضخامت باکال و تعیین حریم ایمن نسبت به ساختارهای حیاتی) انجام می‌گیرد (۶، ۱۱). آنگاه طرح درمان داده‌محور و پروتز-محور تدوین می‌شود و حاشیه‌های ایمنی کمی در آن تصریح می‌گردد. مرحله اجرا با CAD/CAM با طراحی راهنمای آماده‌سازی/جراحی و ماک‌آپ و ساخت افزایشی یا کاهشی ترمیم‌ها پیش می‌رود. در پایان، مرحله راستی‌آزمایی و بازخور با پایش انحراف‌های خطی/زاویه‌ای، Fit و شاخص‌های زیبایی انجام می‌شود تا چرخه‌ی تصمیم‌سازی و اجرا به‌طور مستمر بهبود یابد (۴۳، ۸۳، ۸۹).

بحث

در سال‌های اخیر پذیرش ابزارهای تصویربرداری و تولید دیجیتال در دندانپزشکی زیبایی به سرعت شتاب گرفته است و به یک تغییر الگوی اساسی در تصمیم‌گیری‌های درمانی منجر شده است. برای نمونه، DSD که تا پیش از این یک فرایند فنی دشوار بود، اکنون با کمک هوش مصنوعی و گردش کار کاملاً دیجیتال به روشی متداول بدل شده و ارتباط بین دندان‌پزشک،

نتیجه درمان پیشنهادی پیش از شروع کار (Pre-visualization) از طریق نرم‌افزارهای طراحی لبخند یا واقعیت افزوده باعث درک بهتر بیمار از طرح درمان شده و همسویی انتظارات وی با تیم درمانی را بهبود می‌بخشد. این رویکرد تعاملی نه تنها رضایت بیمار را بالا می‌برد بلکه احتمال درخواست تغییرات پرهزینه در مراحل پایانی درمان را نیز کم می‌کند. برای مثال، نرم‌افزارهای مبتنی بر هوش مصنوعی قادرند بر پایه ویژگی‌های صورت و دندان بیمار، طرح لبخندی واقع‌گرایانه و منطبق بر اصول زیبایی‌شناسی ارائه دهند که به بیمار دیدگاهی ملموس از نتیجه نهایی می‌دهد (۱۶). چنین پیش‌نمایش دیجیتالی موجب افزایش اعتماد به نفس بیمار در تصمیم‌گیری شده و تعامل وی را در برنامه‌ریزی درمان بیشتر می‌کند.

• بهبود تطابق رنگ و طراحی ترمیم‌ها

یکی از چالش‌های سنتی در دندانپزشکی زیبایی، تطابق دقیق رنگ ترمیم با دندان‌های مجاور و طراحی هماهنگ ترمیم با اجزای لبخند بود که کاملاً وابسته به تجربه و ادراک بالینی بود. فناوری‌های نوین این جنبه را نیز متحول کرده‌اند. سیستم‌های تصویربرداری و نرم‌افزارهای هوشمند قادرند رنگ دندان را به صورت کمی تحلیل کرده و نزدیک‌ترین نتیجه را با دقت بسیار بالا پیشنهاد دهند. یک بررسی نشان داده است که الگوریتم‌های درخت تصمیم برای تطابق رنگ پرسنل‌های دندانی به دقت ۹۹/۷ درصد دست یافته‌اند، که در روش‌های سنتی به این ثبات قابل‌دستیابی نبود. (۹۲). همچنین هوش مصنوعی می‌تواند در طراحی فرم دندان‌های ترمیمی کمک کند؛ به عنوان نمونه، با تحلیل داده‌های هزاران طرح درمان موفق قبلی، نرم‌افزارهای هوشمند می‌توانند شکل و نسبت دندان ایده‌آل (از نظر طول تاج، نسبت عرض به ارتفاع، انحنا لب‌ها و غیره) را برای هر مورد پیشنهاد دهند و حتی طول عمر و ریسک‌های شکست ترمیم‌های مختلف را پیش‌بینی کنند (۱۶). این امر به دندان‌پزشک کمک می‌کند تا در کنار دانش و هنر خود، از داده‌های کلان تجربیات جمعی نیز بهره‌مند شود و تصمیم‌های آگاهانه‌تری در انتخاب طرح ترمیم و مواد داشته باشد.

تکنیسین و بیمار را تسهیل کرده است (۱۶). ادغام فناوری‌های نوینی چون CBCT، هوش مصنوعی و CAD/CAM در کنار دیگر ابزارهای دیجیتال موجب افزایش دقت، کارایی و بهبود پیامدهای درمانی شده است (۴۲).

مزایا و دستاوردها در مقایسه با روش‌های سنتی

• بهبود دقت تشخیصی و طرح درمان

CBCT امکان مشاهده جزئیات ساختاری دندان‌ها و استخوان فک را در سه بعد فراهم کرده و نسبت به رادیوگرافی‌های دوبعدی مرسوم، دید جامع‌تری به دندان‌پزشک می‌دهد. این دقت بالاتر به ویژه در برنامه‌ریزی درمان‌های زیبایی پیچیده (مانند ایمپلنت در ناحیه قدامی یا ارتودنسی) حائز اهمیت است و خطر حدس و خطا را کاهش می‌دهد. همچنین ادغام تصاویر CBCT با اسکن‌های داخل‌دهانی به کمک الگوریتم‌های هوش مصنوعی، مدل سه‌بعدی کامل‌تری از بیمار ایجاد می‌کند که شخصی‌سازی طرح درمان را ممکن می‌سازد (۴۲).

• کارایی بالاتر و صرفه‌جویی در زمان

فناوری‌های CAD/CAM با حذف مراحل طولانی لابراتواری (نظیر قالب‌گیری سنتی و ساخت مدل گچی) زمان تحویل ترمیم‌های زیبایی را کوتاه کرده‌اند. داده‌های دیجیتال یک‌بار تهیه‌شده (اسکن دندان‌ها، طرح درمان) قابل‌ذخیره و ویرایش مجدد هستند و بدین ترتیب تهیه پروتز یا ونیر تکراری در آینده بدون نیاز به طی تمام مراحل امکان‌پذیر است (۹۰). مطالعاتی نشان داد که استفاده از CBCT به عنوان روش اخذ داده برای ساخت روکش‌های موقت CAD/CAM، نیاز به جلسات قالب‌گیری مجزا را از بین برده و در حالی که رضایت بیماران در هر دو روش دیجیتال و سنتی مشابه بود، شاخص‌های زیبایی برتر و زمان کلی درمان کمتری حاصل شده است (۹۱). این شواهد نشان داد، گردش کار دیجیتال می‌تواند بدون افت کیفیت ادراک‌شده توسط بیمار، کارایی را افزایش دهد.

• ارتقای ارتباط تیم درمانی و بیمار

استفاده از ابزارهای تصویری و شبیه‌سازی دیجیتال به تصمیم‌گیری اشتراکی کمک شایانی کرده است. نمایش بصری

محدودیت‌ها و چالش‌های کاربردی

• هزینه‌های سرمایه‌ای و نیازهای زیرساختی

ورود فناوری‌های پیشرفته به مطب‌های دندانپزشکی با هزینه چشمگیری همراه است. دستگاه‌های CBCT و پرینترها/میلینگ‌های CAD/CAM قیمت بالایی داشته و نگهداری و کالیبراسیون مرتب آن‌ها نیز هزینه‌بر است. به همین دلیل، در محیط‌های کم‌برخوردار یا مطب‌های کوچک، پیاده‌سازی این تجهیزات دشوار بوده و ممکن است شکاف دیجیتال بین مراکز درمانی مختلف ایجاد شود (۹۳). این چالش اقتصادی به‌ویژه زمانی پررنگ‌تر می‌شود که بازگشت سرمایه فوری نباشد یا تعرفه‌های بیمه‌ای، هزینه استفاده از این فناوری‌ها را پوشش ندهند.

• ملاحظات پرتویی و ایمنی بیمار

علی‌رغم مزایای CBCT در ارائه اطلاعات سه‌بعدی، نگرانی از دوز تابش پرتوی آن به‌ویژه در موارد غیرضروری و برای بیماران جوان‌تر وجود دارد. اگرچه فناوری‌های جدیدتر مانند پروتکل‌های پرتودهی کم‌دوز و به‌کارگیری فیلترها و الگوریتم‌های کاهنده نویز مبتنی بر یادگیری عمیق، توانسته‌اند دوز موثر تابش را به حداقل ممکن برسانند، اما همچنان اصل احتیاط (ALARA): تا حد امکان پایین نگاه داشتن دوز) بایستی رعایت گردد. راهنماهای بالینی اخیر (از جمله بیانیه ۲۰۲۴ انجمن دندانپزشکی آمریکا) تأکید می‌کنند که CBCT نباید به عنوان ابزار غربالگری روتین به کار رود و تنها زمانی تجویز شود که اطلاعات حاصل مستقیماً بر تصمیم درمانی تأثیرگذار باشد (۹۳). رعایت این ضابطه‌ها برای پیشگیری از پرتودهی غیرضروری و تبعات قانونی/اخلاقی آن ضروری است.

• نیاز به آموزش تخصصی و استانداردسازی

تفسیر

بهره‌گیری مؤثر از تصاویر سه‌بعدی و داده‌های تحلیلی هوش مصنوعی مستلزم مهارت‌های جدیدی است که لزوماً در آموزش سنتی دندانپزشکی به همه دندان‌پزشکان بالینی منتقل نشده است. به عنوان مثال، تفسیر مقاطع CBCT و تشخیص

ناهنجاری‌های ظریف استخوانی یا بررسی نسبت‌های زیبایی در اسکن‌های ترکیبی چهره و دندان، نیازمند دانش و تجربه‌ای فراتر از رادیوگرافی‌های معمول است (۹۴). علاوه بر آموزش، عدم وجود استانداردهای متحدالشکل در به‌کارگیری این ابزارها می‌تواند منجر به نتایج ناهمگون شود؛ دو دندان‌پزشک ممکن است با داده‌های یکسان دیجیتال، طرح‌های درمانی متفاوتی ارائه دهند که بخشی از آن به نبود چارچوب‌های راهنما و معیارهای عینی برمی‌گردد. به عنوان نمونه، در حالی که برخی مطالعات از شاخص‌های کمی (مانند نسبت طلایی یا شاخص‌های زیبایی سفید/صورتی) برای ارزیابی نتیجه طرح دیجیتال استفاده می‌کنند، برخی دیگر صرفاً به رضایت بیمار یا قضاوت متخصص متکی بوده‌اند که مقایسه اثربخشی روش‌ها را دشوار می‌سازد. این عدم یکنواختی در گزارش پیامدهای زیبایی، ضرورت توسعه معیارهای استاندارد و پروتکل‌های مشترک را به عنوان یک شکاف پژوهشی برجسته ساخته است.

• محدودیت‌های فنی و اعتبار هوش مصنوعی

سیستم‌های هوشمند علی‌رغم پتانسیل بالا، با چالش‌هایی در زمینه دقت و اعتمادپذیری روبه‌رو هستند. الگوریتم‌های یادگیری عمیق معمولاً بر پایه‌ی داده‌های آموزشی خاصی تربیت می‌شوند و در صورتی که این داده‌ها تنوع جمعیتی و کلینیکی کافی نداشته باشند، خروجی AI می‌تواند سوگیری‌دار یا محدود به همان شرایط باشد (۹۳). بسیاری از مدل‌های تشخیصی و تصمیم‌یاری هوشمند که در مقالات معرفی شده‌اند هنوز اعتبارسنجی خارجی گسترده نشده‌اند و مشخص نیست در برابر داده‌های جدید (بیماران واقعی با شرایط متنوع) چه عملکردی خواهند داشت (۹۵، ۹۶). برای مثال، یک تحقیق در زمینه شبیه‌سازی لب‌خند با هوش مصنوعی نشان داد که نرم‌افزار مربوطه تمایل دارد نسبت‌های دندانی را به یک مقدار ایده‌آل ثابت (مثلاً نسبت طلایی تقریباً ۶۲ درصد) تنظیم کند و ویژگی‌های فردی بیمار، نظیر وجود دندان‌های کوچکتر مادرزادی یا چرخش‌های دندانی، را نادیده بگیرد (۹۷). این رویکرد یکسان‌سازی ممکن است در برخی موارد طرح درمان غیرواقع‌بینانه‌ای ارائه دهد که اجرای

مقررات گذار پاسخ داده نشده و نیازمند تدوین چارچوب‌های قانونی شفاف برای استفاده از هوش مصنوعی در دندانپزشکی است. به طور خلاصه، دندانپزشک در عصر دیجیتال باید همگام با بهره‌گیری از این فناوری‌ها، اصول اخلاقی و حقوقی را نیز رعایت کند تا اعتماد بیماران و سلامت آن‌ها حفظ شود (۹۸، ۱۶).

یکپارچه‌سازی فناوری‌ها در جریان کار دیجیتال

زیبایی

یکی از محورهای بحث در دندانپزشکی مدرن، حرکت از رویکرد تک‌فناوری به سمت همگرایی چند فناوری در قالب یک جریان کار یکپارچه دیجیتال است. در حوزه زیبایی، این یکپارچه‌سازی به معنای ترکیب تصاویر رادیوگرافیک سه‌بعدی، اسکن‌های داخل‌دهانی، تصاویر صورت و داده‌های طرح دیجیتال لبخند در کنار هم است تا یک مدل جامع از بیمار موسوم به بیمار مجازی، ایجاد شود (۱۶). بیمار مجازی نمایانگر تلفیق بافت سخت و نرم بیمار در فضای دیجیتال است که مزایای فراوانی به همراه دارد. برای مثال، در یک مورد درمان ایمپلنت در ناحیه زیبایی، می‌توان داده‌های CBCT (جهت ارزیابی استخوان و موقعیت ساختارهای حیاتی) را با اسکن داخل‌دهانی از بافت‌های دهانی (جهت ثبت وضعیت لثه و دندان‌های مجاور) و اسکن سه‌بعدی چهره بیمار (برای در نظر گرفتن خط لبخند و تقارن صورتی) روی هم قرار داد. نتیجه چنین تلفیقی آن است که دندانپزشک قادر خواهد بود محل ایمپلنت را به صورت پروتز-محور و زیبایی-محور تعیین کند؛ بدین معنی که محل قرارگیری ایمپلنت نه تنها از لحاظ استخوانی مناسب است بلکه در بهترین وضعیت جهت حمایت از پروتز نهایی زیبا و هماهنگ با لبخند بیمار قرار می‌گیرد. گزارش‌های موردی و مطالعات اولیه نشان داده‌اند که این رویکرد باعث کاهش انحراف از طرح در حین جراحی، کاهش احتمال برخورد با موانع آناتومیک غیرمنتظره و بهبود وضعیت بافت نرم اطراف ترمیم نهایی مثل حفظ پاپیلای بین‌دندانی و کانتور لثه بهتر، می‌شود (۹۱). به بیان دیگر، همگرایی داده‌های چندمنبعی

آن نیازمند مداخلات تکمیلی (نظیر درمان‌های پروتز یا جراحی افزایش طول تاج) باشد و هزینه و پیچیدگی درمان را برای بیمار افزایش دهد. چنین مثال‌هایی نشان می‌دهد، توضیح‌پذیری تصمیم‌های AI و شفاف بودن منطق پیشنهادات آن بسیار مهم است تا تیم درمانی بتواند در مورد پذیرش یا رد پیشنهاد الگوریتم، آگاهانه قضاوت کند. در غیاب این شفافیت، اعتماد بی‌جا به خروجی یک نرم‌افزار می‌تواند به برنامه‌ریزی نادرست منجر شود؛ از سوی دیگر بی‌اعتمادی کامل نیز موجب می‌شود منافع بالقوه نادیده گرفته شوند. بنابراین ایجاد توازن از طریق بهبود عملکرد فنی (کاهش خطاها، افزایش تعمیم‌پذیری) و ارائه شواهد مستند از دقت و فواید بالینی AI ضروری است.

• ملاحظات اخلاقی و حریم خصوصی

دیجیتال شدن فرایندهای زیبایی، ابعاد تازه‌ای از نگرانی‌های اخلاقی را به همراه دارد. گردآوری و ذخیره‌سازی حجم عظیمی از داده‌های بیمار شامل اسکن‌های داخل‌دهانی، تصاویر چهره، عکس‌های لبخند و حتی حرکات فک، در پلتفرم‌های ابری، اگرچه برای طرح درمان مفید است اما مخاطراتی در زمینه حفظ حریم خصوصی و امنیت اطلاعات ایجاد می‌کند (۹۸). هرگونه استفاده از تصاویر بیماران برای شبیه‌سازی لبخند یا آموزش الگوریتم‌های هوش مصنوعی باید با کسب رضایت آگاهانه صورت گیرد و بیمار بداند داده‌هایش چگونه استفاده می‌شود. اصول محرمانگی (Confidentiality) ایجاب می‌کند دسترسی به این داده‌ها محدود و تحت حفاظت مناسب باشد. علاوه بر این، از منظر عدالت، باید مراقب بود که فناوری‌های AI مبدا bias یا سوگیری ناخواسته‌ای بر ضد گروه‌های خاص ایجاد کنند (برای مثال، مدلی که عمدتاً با تصاویر افراد با نژاد یا جنسیت خاصی آموزش دیده، ممکن است نتایج بهینه‌ای برای دیگر گروه‌ها ارائه نکند). ملاحظات قانونی نیز در این میان اهمیت پیدا می‌کند؛ پرسش‌هایی نظیر این که «در صورت اشتباه الگوریتم در تشخیص یا طرح درمان، مسئولیت بر عهده چه کسی است؟» هنوز به طور کامل توسط نهادهای

نواآوری‌های نوظهور دیگری نیز در راستای تکمیل این اکوسیستم دیجیتال در زیبایی دندانپزشکی در حال شکل‌گیری است. واقعیت افزوده (Augmented Reality) و واقعیت مجازی (Virtual Reality) از جمله فناوری‌هایی هستند که به سرعت در حال ورود به حوزه دندانپزشکی می‌باشند و می‌توانند مکمل ارزشمندی برای CBCT، AI و CAD/CAM باشند (۱۰۱، ۱۰۲). در زمینه زیبایی، AR این پتانسیل را دارد که به بیماران امکان امتحان کردن لبخند جدید را به صورت زنده در آینه مجازی بدهد؛ به عبارتی بیمار با نگاه کردن به یک نمایشگر یا آینه هوشمند، طرح لبخند دیجیتال پیشنهادی را به طور همزمان روی چهره خود مشاهده می‌کند و می‌تواند قبل از شروع درمان بازخورد بدهد. چنین تجربه‌ی تعاملی می‌تواند به تصمیم‌گیری آگاهانه‌تر بیمار کمک کند و اعتماد او را جلب نماید. هرچند این فناوری هنوز در مراحل اولیه کاربرد بالینی است، پژوهش‌های اولیه حاکی از آن است که AR توانسته دقت اجرایی را در حوزه‌هایی مانند جراحی راهنمامحور افزایش دهد و خطای انسانی را کاهش دهد (۱۰۳، ۱۰۴).

چشم‌انداز آینده و پیشنهاد‌های پژوهشی

برای بهره‌گیری کامل از ظرفیت اکوسیستم دیجیتال در زیبایی دندانپزشکی، نخست باید استانداردسازی معیارهای سنجش و پروتکل‌ها جدی گرفته شود: تدوین چارچوب‌های ارزیابی ترکیبی (معیارهای سنجش کمی نسبت‌ها و قوس لبخند + پیامدهای بیمارمحور) و راهنماهای اندیکاسیون‌محور برای به‌کارگیری CBCT، اسکن سه‌بعدی و DSD با رعایت اصول ایمنی پرتویی و ارزیابی هزینه-اثربخشی؛ همچنین تقویت شواهد بالینی چندمرکزی و طولی برای مقایسه‌پایداری و کیفیت ترمیم‌های CAD/CAM با روش‌های سنتی (مانند بقا و عوارض و نیرهای لیتیوم‌دی‌سیلیکات و زیرکونیا) و سنجش دقت و کارآیی جریان‌کار دیجیتال در عمل، پیش‌نیاز تدوین بهترین رویه‌ها است. در گام دوم، لازم است الگوریتم‌های هوش مصنوعی با استفاده از داده‌های واقعی، متنوع و گردآوری‌شده از چند مرکز درمانی مختلف (داده‌های

یک پل ارتباطی میان طرح دیجیتال و اجرای بالینی ایجاد می‌کند و فاصله میان آنچه برنامه‌ریزی شده و آنچه به دست می‌آید را کمتر می‌کند.

علاوه بر بهبود دقت برنامه‌ریزی، یکپارچه‌سازی فناوری‌ها تجربه کاربری بهتری برای تیم درمانی و بیمار رقم می‌زند. با وجود نرم‌افزارهای پیشرفته، دندان‌پزشک، تکنیسین لابراتوار و حتی بیمار می‌توانند در یک پلتفرم مشترک با داده‌های یکسان کار کنند. برای نمونه، پلتفرم‌های ابری مانند SmileCloud امکان ذخیره‌سازی تمام اطلاعات بیمار از جمله تصاویر CBCT، اسکن داخل‌دهانی و حتی ویدئوهای حرکات فکی را فراهم کرده‌اند (۱۶). این اطلاعات در هر لحظه و هر مکان برای اعضای تیم درمانی (با سطح دسترسی تعریف‌شده) قابل مشاهده است و تصمیم‌گیری‌ها می‌تواند به صورت گروهی و با شفافیت بیشتری انجام شود. همچنین تکنسین لابراتوار می‌تواند طرح دیجیتال لبخندی را که دندان‌پزشک با بیمار نهایی کرده است مستقیماً دریافت و بر اساس آن واکس آپ دیجیتال یا پروتز موقت را تولید کند (۹۹). بدین ترتیب، جریان‌کار کاملاً دیجیتال از ابتدا (تصویربرداری و طرح درمان) تا انتها (ساخت ترمیم نهایی) برقرار می‌شود و خطاهای ناشی از تبدیل‌های آنالوگ به دیجیتال یا تفسیرهای ناهماهنگ حذف می‌گردد (۱۰۰). با این حال، استقرار کامل چنین جریان یکپارچه‌ای در عمل با چالش‌هایی همراه است؛ از جمله ناهمخوانی قالب‌های خروجی میان دستگاه‌های مختلف، خطاهای هم‌ترازی میان‌مدالیه‌ای (Registration) و نیاز به توان محاسباتی قابل‌توجه برای پردازش داده‌های حجیم. با این همه، پیشرفت‌های اخیر در بینایی ماشین به‌سوی رفع این موانع پیش می‌رود؛ به‌طور مشخص، الگوریتم‌های نوین هم‌نهشتی خودکار اسکن‌های داخل‌دهانی بر تصاویر CBCT با قطعه‌بندی دندان‌به‌دندان و تطبیق موضعی، خطاهای اتصال را به حداقل می‌رسانند (۳۹). با پیشرفت این تکنیک‌ها، می‌توان انتظار داشت که در آینده نزدیک مفهوم بیمار مجازی با دقت و سهولت بیشتری در دسترس دندان‌پزشکان بالینی قرار گیرد.

چندمرکزی و نماینده) مورد ارزیابی قرار گیرند. همچنین نتایج این مطالعات باید بر اساس دستورالعمل‌های استاندارد گزارش‌دهی مانند TRIPOD+AI (برای مدل‌های پیش‌بینی بالینی) و CONSORT-AI (برای کارآزمایی‌های بالینی شامل مداخلات مبتنی بر هوش مصنوعی) منتشر شوند تا شفافیت، قابلیت بازتولید و اعتماد علمی نتایج تضمین شود (۹۳، ۱۶).

نتیجه‌گیری

در مجموع، آینده‌ی دندانپزشکی زیبایی دیجیتال روشن اما

مشروط به حل مسائل فعلی است. استمرار پژوهش‌های میان‌رشته‌ای و همکاری نزدیک بین مهندسان، متخصصان دندانپزشکی و سیاست‌گذاران برای استانداردسازی و ترویج استفاده صحیح این فناوری‌ها حیاتی خواهد بود. تنها در این صورت است که می‌توانیم به بکارگیری گسترده و حداکثری فواید بالینی این نوآوری‌ها امید داشته باشیم. حرکت در این مسیر نه یک انتخاب بلکه یک ضرورت اجتناب‌ناپذیر برای رشته دندانپزشکی است که در نهایت به سود ارتقای کیفیت درمان و رضایت بیماران تمام خواهد شد.

References

1. Stojilković M, Gušić I, Berić J, Prodanović D, Pecikozić N, Veljović T, et al. Evaluating the influence of dental aesthetics on psychosocial well-being and self-esteem among students of the University of Novi Sad, Serbia: A cross-sectional study. *BMC Oral Health* 2024; 24(1): 277.
2. Xiao L, Mai W, Chen S, Chen S, Liu Q, Tang L, et al. Psychosocial impact of dental aesthetics in adolescent: an evaluation of a latent profile and its associated risk factors. *BMC Oral Health* 2024; 24(1): 1076.
3. Chisnoiu AM, Staicu AC, Kui A, Chisnoiu RM, Iacob S, Flueraşu M, et al. Smile design and treatment planning—conventional versus digital—A pilot study. *J Pers Med* 2023; 13(7): 1028.
4. Vasiljevic M, Selakovic D, Rosic G, Stevanovic M, Milanovic J, Arnaut A, et al. Anatomical factors of the anterior and posterior maxilla affecting immediate implant placement based on cone beam computed tomography analysis: A narrative review. *Diagnostics* 2024; 14(15): 1697.
5. Luniyal C, Shukla AK, Priyadarshi M, Ahmed F, Kumari N, Bankoti P, et al. Assessment of patient satisfaction and treatment outcomes in digital smile design vs. conventional smile design: A randomized controlled trial. *J Pharm Bioallied Sci* 2024; 16(Suppl 1): S669-S71.
6. Jain A, Bhushan P, Mahato M, Solanki BB, Dutta D, Hota S, et al. The recent use, patient satisfaction, and advancement in digital smile designing: a systematic review. *Cureus* 2024; 16(6): e62459.
7. Bernauer SA, Zitzmann NU, Joda T, editors. The complete digital workflow in fixed prosthodontics updated: a systematic review. *Healthcare (Basel)* 2023; 11(5): 679.
8. Marquez Bautista N, Meniz-García C, López-Carriches C, Sánchez-Labrador L, Cortés-Bretón Brinkmann J, Madrigal Martínez-Pereda C. Accuracy of different systems of guided implant surgery and methods for quantification: a systematic review. *Appl Sci* 2024; 14(24): 11479.
9. Ding H, Wu J, Zhao W, Matinlinna JP, Burrow MF, Tsoi JK. Artificial intelligence in dentistry—A review. *Front Dent Med* 2023; 4: 1085251.
10. Benavides E, Krecioch JR, Connolly RT, Allareddy T, Buchanan A, Spelic D, et al. Optimizing radiation safety in dentistry: clinical recommendations and regulatory considerations. *J Am Dent Assoc* 2024; 155(4): 280-293.e4.
11. Song Y, Yang S, Wang C. Morphology and thickness of the buccal bone wall of the maxillary central incisors in population: a CBCT study. *Front Dent Med* 2024; 5: 1472028.
12. Eggmann F, Blatz M. Recent advances in intraoral scanner. *J Dent Res* 2024; 103(13): 1349-57.
13. Alahmari M, Alahmari M, Almuaddi A, Abdelmagdy H, Rao K, Hamdoon Z, et al. Accuracy of artificial intelligence-based segmentation in maxillofacial structures: a systematic review. *BMC Oral Health* 2025; 25(1): 350.
14. Khattak O, Hashem AS, Alqarni MS, Almufarrij RAS, Siddiqui AY, Anis R, et al. Deep Learning Applications in Dental Image-Based Diagnostics: A Systematic Review. *Healthcare (Basel)* 2025; 13(12): 1466.
15. Alharbi SS, Alhasson HF. Exploring the applications of artificial intelligence in dental image detection: A systematic review. *Diagnostics (Basel)* 2024; 14(21): 2442.

16. Buduru S, Cofar F, Mesaroş A, Tăut M, Negucioiu M, Almăşan O. Perceptions in digital smile design: Assessing laypeople and dental professionals' preferences using an Artificial-intelligence-based application. *Dent J (Basel)* 2024; 12(4): 104.
17. Ducret M, Wahal E, Gruson D, Amrani S, Richert R, Mouncif-Moungache M, et al. Trustworthy artificial intelligence in dentistry: learnings from the EU AI act. *J Dent Res* 2024; 103(11): 1051-6.
18. Abdulkarim LI, Alharamlah FSS, Abubshait RM, Alotaibi DA, Abouonq AO, Alotaibi D, et al. Impact of digital workflow integration on fixed prosthodontics: a review of advances and clinical outcomes. *Cureus* 2024; 16(10): e72286.
19. Mahato M, Hota S, Jain A, Dutta D, Bhushan P, Raut A, et al. Comparison of Conventional and Digital Workflows in the fabrication of fixed prostheses: a systematic review. *Cureus* 2024; 16(6): e61764.
20. Sakarya RE, Yanikoğlu ND. Evaluation of Wear Resistance of CAD/CAM Materials After Artificial Aging: An In Vitro Study. *J Adv Oral Res* 2024; 15(2): 195-203.
21. Qaraghuli A, Ferrari M. Accuracy and efficiency of guided veneer preparation: a narrative systematic review. *Journal of Osseointegration* 2024; 16(4): 210-8.
22. Casucci A, Cagidiaco EF, Verniani G, Ferrari M, Borracchini A. Digital vs. conventional removable complete dentures: A retrospective study on clinical effectiveness and cost-efficiency in edentulous patients: Clinical effectiveness and cost-efficiency analysis of digital dentures. *J Dent* 2025; 153: 105505.
23. Jindanil T, Burlacu-Vatamanu O-E, Meyns J, Meewis J, Fontenele RC, de Llano Perula MC, et al. Automated orofacial virtual patient creation: A proof of concept. *J Dent* 2024; 150: 105387.
24. Park JH, Lee G-H, Moon D-N, Yun K-D, Kim J-C, Lee KC. Creation of digital virtual patient by integrating CBCT, intraoral scan, 3D facial scan: an approach to methodology for integration accuracy. *J Craniofac Surg* 2022; 33(4): e396-e8.
25. Younis H, Lv C, Xu B, Zhou H, Du L, Liao L, et al. Accuracy of dynamic navigation compared to static surgical guides and the freehand approach in implant placement: a prospective clinical study. *Head Face Med* 2024; 20(1): 30.
26. Xu Z, Zhou L, Han B, Wu S, Xiao Y, Zhang S, et al. Accuracy of dental implant placement using different dynamic navigation and robotic systems: an in vitro study. *NPJ Digit Med* 2024; 7(1): 182.
27. Calin F, Dalewski B, Ellmann M, Kiczmer P, Ihde S, Bieńkowska M, et al. CBCT Evaluation of Maxillary Incisive Canal Characteristics Among Population in Regard to Possibility of Implant Cortical Anchorage—A Multicenter Study. *Dent J (Basel)* 2025; 13(5): 211.
28. Sadilina S, Müller NP, Strauss FJ, Jung RE, Thoma DS, Bienz SP. Patient-Reported and Clinician-Reported Esthetic Outcomes at Implant Sites Are Not Associated: A Systematic Review With Individual Participant Data Meta-Analysis. *Clin Oral Implants Res* 2025; 36(11): 1382-411.
29. Alshomrani F. Cone-beam computed tomography (CBCT)-based diagnosis of dental bone defects. *Diagnostics (Basel)* 2024; 14(13): 1404.
30. Polizzi A, Serra S, Leonardi R. Use of CBCT in orthodontics: A scoping review. *J Clin Med* 2024; 13(22): 6941.
31. Scarfe WC. Principles of Cone Beam Computed Tomography. *3D Imaging in Endodontics: A New Era in Diagnosis and Treatment*: Springer; 2023. p. 1-25.
32. Mason K, Iball G, Hinchcliffe D, Snaith B. A systematic review comparing the effective radiation dose of musculoskeletal cone beam computed tomography to other diagnostic imaging modalities. *Eur J Radiol* 2024; 177: 111558.
33. Fontenele RC, Gaêta-Araujo H, Jacobs R. Cone beam computed tomography in dentistry: clinical recommendations and indication-specific features. *J Dent* 2025; 159: 105781.
34. Alsuraifi A, Husam Y, Mohammed NAR, Kareem S, Al-Essa UI, Alshakhs I, et al. Advances in Understanding and Mitigating Risks in Dental X-Ray Imaging: A Comprehensive Review—"Safer Smiles: Innovating Dental Radiography for Tomorrow". 2025. Available from: https://www.preprints.org/frontend/manuscript/15ffa20c2bec39daf9c9b4bb9348df80/download_pub
35. Rojo-Sanchis J, Soto-Peñaloza D, Peñarocha-Oltra D, Peñarocha-Diogo M, Vina-Almunia J. Facial alveolar bone thickness and modifying factors of anterior maxillary teeth: a systematic review and meta-analysis of cone-beam computed tomography studies. *BMC Oral Health* 2021; 21(1): 143.
36. Li Y, Deng S, Mei L, Li J, Qi M, Su S, et al. Accuracy of alveolar bone height and thickness measurements in cone beam computed tomography: a systematic review and meta-analysis. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol* 2019; 128(6): 667-79.
37. Jin Y, Deng C, Yang X, Man Y, Hu C. Immediate Implant Placement in the Esthetic Zone: A Multi-Variate Analysis of Influencing Factors. *Clin Implant Dent Relat Res* 2025; 27(1): e13439.

38. Alsino HI, Hajeer MY, Alkhouri I, Murad RM. The diagnostic accuracy of cone-beam computed tomography (CBCT) imaging in detecting and measuring dehiscence and fenestration in patients with Class I malocclusion: a surgical-exposure-based validation study. *Cureus* 2022; 14(3): e22789 .
39. Jang TJ, Yun HS, Hyun CM, Kim J-E, Lee S-H, Seo JK. Fully automatic integration of dental CBCT images and full-arch intraoral impressions with stitching error correction via individual tooth segmentation and identification. *Med Image Anal* 2024; 93: 103096.
40. Elgarba BM, Fontenele RC, Ali S, Swaitly A, Meeus J, Shujaat S, et al. Validation of a novel AI-based automated multimodal image registration of CBCT and intraoral scan aiding presurgical implant planning. *Clin Oral Implants Res* 2024; 35(11): 1506-17.
41. Mohammed H, Daniel BK, Farella M. Smile analysis in dentistry and orthodontics—a review. *J R Soc N Z* 2025; 55(1): 192-205.
42. Shujaat S, Bornstein MM, Price JB, Jacobs R. Integration of imaging modalities in digital dental workflows-possibilities, limitations, and potential future developments. *Dentomaxillofac Radiol* 2021; 50(7): 20210268.
43. Khaohoen A, Powcharoen W, Sornsuwan T, Chaijareenont P, Rungsiyakull C, Rungsiyakull P. Accuracy of implant placement with computer-aided static, dynamic, and robot-assisted surgery: a systematic review and meta-analysis of clinical trials. *BMC Oral Health* 2024; 24(1): 359.
44. KR SC, Goyal M, Mittal N, George JS. Accuracy of freehand versus guided immediate implant placement: A randomized controlled trial. *J Dent* 2023; 136: 104620.
45. Xu Z, Zhou L, Han B, Wu S, Xiao Y, Zhang S, et al. Author Correction: Accuracy of dental implant placement using different dynamic navigation and robotic systems: an in vitro study. *NPJ Digit Med* 2024; 7(1): 188.
46. Caetano GR, Soares MQ, Oliveira LB, Junqueira JL, Nascimento MC. Two-dimensional radiographs versus cone-beam computed tomography in planning mini-implant placement: A systematic review. *J Clin Exp Dent* 2022; 14(8): e669-e77.
47. Özer NE, Ulusoy AC, İlhan B, Lindfors N, Boyacıoğlu H, Gröndahl HG. The influence of the field of view and voxel size on the contrast-to-noise ratio in cone-beam computed tomography imaging. *Imaging Sci Dent* 2024; 54(4): 362-9.
48. Zaman MU. Comparing Radiation Doses in CBCT and Medical CT Imaging for Dental Applications. *J Pharm Bioallied Sci* 2024; 16(Suppl 1): S883-s5.
49. Pereira R, Sabri H, Pereira P, Wang HL. Associated risks with periodontal x-rays or CBCT scans: Are there any? *Clin Adv Periodontics* 2024; 14(2): 121-6.
50. Lübbers H-T, Bornstein MM, Dagassan-Berndt D, Filippi A, Suter VG, Dula K. Revised consensus guidelines for the use of cone-beam computed tomography/digital volume tomography: Results from a consensus process organized by the Swiss association of dentomaxillofacial radiology. *Swiss Dent J* 2024; 134(4): 86-115.
51. Martins SCR, Marques MdC, Vidal MG, Tolentino PHMP, Dinelli RG, Fernandes G, et al. Is the facial bone wall critical to achieving esthetic outcomes in immediate implant placement with immediate restoration? A systematic review. Is the facial bone wall critical to achieving esthetic outcomes in immediate implant placement with immediate restoration? A systematic review. *Adv Clin Exp Med* 2024; 33(9): 979-97.
52. Han M, Kim HJ, Choi JW, Park DY, Han JG. Diagnostic usefulness of cone-beam computed tomography versus multi-detector computed tomography for sinonasal structure evaluation. *Laryngoscope Investig Otolaryngol* 2022; 7(3): 662-70.
53. Collins GS, Moons KG, Dhiman P, Riley RD, Beam AL, Van Calster B, et al. TRIPOD+ AI statement: updated guidance for reporting clinical prediction models that use regression or machine learning methods: a Korean translation. *Ewha Med J* 2025; 48(3): e48.
54. Liu X, Rivera SC, Moher D, Calvert MJ, Denniston AK. Reporting guidelines for clinical trial reports for interventions involving artificial intelligence: the CONSORT-AI Extension. *Nat Med* 2020; 26(9): 1364-74.
55. Aboy M, Minssen T, Vayena E. Navigating the EU AI Act: implications for regulated digital medical products. *NPJ Digit Med* 2024; 7(1): 237.
56. van Kolschooten H, van Oirschot J. The EU Artificial Intelligence Act (2024): Implications for healthcare. *Health Policy* 2024; 149: 105152.
57. Mallineni SK, Sethi M, Punugoti D, Kotha SB, Alkhayal Z, Mubarak S, et al. Artificial intelligence in dentistry: a descriptive review. *Bioengineering (Basel)* 2024; 11(12): 1267.
58. Ghaffari M, Zhu Y, Shrestha A. A review of advancements of artificial intelligence in dentistry. *Dent Rev* 2024; 4(2): 100081.

59. Schwendicke F, Chaurasia A, Arsiwala L, Lee JH, Elhennawy K, Jost-Brinkmann PG, et al. Deep learning for cephalometric landmark detection: systematic review and meta-analysis. *Clin Oral Investig* 2021; 25(7): 4299-309.
60. Kot WY, Au Yeung SY, Leung YY, Leung PH, Yang WF. Evolution of deep learning tooth segmentation from CT/CBCT images: a systematic review and meta-analysis. *BMC Oral Health* 2025; 25(1): 800.
61. Preda F, Nogueira-Reis F, Stanciu EM, Smolders A, Jacobs R, Shaheen E. Validation of automated registration of intraoral scan onto Cone Beam Computed Tomography for an efficient digital dental workflow. *J Dent* 2024; 149: 105282.
62. Loftus TJ, Tighe PJ, Filiberto AC, Efron PA, Brakenridge SC, Mohr AM, et al. Artificial intelligence and surgical decision-making. *JAMA Surg* 2020; 155(2): 148-58.
63. Cui Z, Fang Y, Mei L, Zhang B, Yu B, Liu J, et al. A fully automatic AI system for tooth and alveolar bone segmentation from cone-beam CT images. *Nat Commun* 2022; 13(1): 2096.
64. Weingart JV, Schlager S, Metzger MC, Brandenburg LS, Hein A, Schmelzeisen R, et al. Automated detection of cephalometric landmarks using deep neural patchworks. *Dentomaxillofac Radiol* 2023; 52(6): 20230059.
65. Shuto T, Mine Y, Tani A, Taji T, Murayama T. Facial Scans in Clinical Dentistry and Related Research: A Scoping Review. *Cureus* 2025; 17(4): e81662.
66. Park SH, Suh CH. Reporting guidelines for artificial intelligence studies in healthcare (for both conventional and large language models): what's new in 2024. *Korean J Radiol* 2024; 25(8): 687-90.
67. Ostmeier S, Axelrod B, Isensee F, Bertels J, Mlynash M, Christensen S, et al. USE-Evaluator: Performance metrics for medical image segmentation models supervised by uncertain, small or empty reference annotations in neuroimaging. *Med Image Anal* 2023; 90: 102927.
68. Alharkan HM. Integrating digital smile design into restorative Dentistry: A narrative review of the applications and benefits. *The Saudi Dental Journal* 2023; 36(2): 561-7.
69. Zheng Q, Gao Y, Zhou M, Li H, Lin J, Zhang W, et al. Semi or fully automatic tooth segmentation in CBCT images: a review. *PeerJ Comput Sci* 2024; 10: e1994.
70. Suganna M, Kausher H, Tarek Ahmed S, Sultan Alharbi H, Faraj Alsubaie B, Ds A, et al. Contemporary Evidence of CAD-CAM in Dentistry: A Systematic Review. *Cureus* 2022; 14(11): e31687.
71. Cioloca Holban C, Tatarciuc M, Vitalariu AM, Vasluianu RI, Antohe M, Diaconu DA, et al. Three-Dimensional Printing and CAD/CAM Milling in Prosthodontics: A Scoping Review of Key Metrics Towards Future Perspectives. *J Clin Med* 2025; 14(14): 4837.
72. Liu J, Hao J, Lin H, Pan W, Yang J, Feng Y, et al. Deep learning-enabled 3D multimodal fusion of cone-beam CT and intraoral mesh scans for clinically applicable tooth-bone reconstruction. *Patterns (N Y)* 2023; 4(9): 100825.
73. Lawand G, Tohme H, Azevedo L, Martin W, Gonzaga L, Nassif M, et al. Techniques and accuracy for aligning facial and intraoral digital scans to integrate a 3-dimensional virtual patient: A systematic review. *J Prosthet Dent* 2026; 135(3): 484-504.
74. Alqutaibi AY, Saker S, Alghauli MA, Algabri RS, Abdelaziz MH. Clinical survival and complication rate of ceramic veneers bonded to different substrates: A systematic review and meta-analysis. *J Prosthet Dent* 2025; 134(4): 1030-9.
75. Refaie A, Fouda A, Bourauel C, Singer L. Marginal gap and internal fit of 3D printed versus milled monolithic zirconia crowns. *BMC Oral Health* 2023; 23(1): 448.
76. Gawali N, Shah PP, Gowdar IM, Bhavsar KA, Giri D, Laddha R. The evolution of digital dentistry: a comprehensive review. *J Pharm Bioallied Sci* 2024; 16(Suppl 3): S1920-s2.
77. 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. *Dent Mater J* 2009; 28(1): 44-56.
78. 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.
79. Gracis S, Thompson VP, Ferencz JL, Silva NR, Bonfante EA. A new classification system for all-ceramic and ceramic-like restorative materials. *Int J Prosthodont* 2015; 28(3): 227-35.
80. Alaoffey AS, Asiri MA, Alhazmi TAA, Alshetaiwi AA, Almobarak AM, Alqasir YH, et al. Digital dentistry: transforming diagnosis and treatment planning through CAD/CAM and 3D printing. *Egypt J Chem* 2024; 67(13): 1177-90.
81. Xiang B, Lu J, Yu J. Evaluating tooth segmentation accuracy and time efficiency in CBCT images using artificial intelligence: A systematic review and Meta-analysis. *J Dent* 2024; 146: 105064.
82. Pilecco RO, Machry RV, Baldi A, Tribst JPM, Sarkis-Onofre R, Valandro LF, et al. Influence of CAD-CAM milling strategies on the outcome of indirect restorations: A scoping review. *J Prosthet Dent* 2024; 131(5): 811. e1-. e10.

83. Shi Y, Wang J, Ma C, Shen J, Dong X, Lin D. A systematic review of the accuracy of digital surgical guides for dental implantation. *Int J Implant Dent* 2023; 9(1): 38.
84. Pedrinaci I, Gallucci GO, Lanis A, Friedland B, Pala K, Hamilton A. Computer-Assisted Implant Planning: A Review of Data Registration Techniques. *Int J Periodontics Restorative Dent* 2025; 45(5): 652-65.
85. Lim S-W, Hwang H-S, Cho I-S, Baek S-H, Cho J-H. Registration accuracy between intraoral-scanned and cone-beam computed tomography-scanned crowns in various registration methods. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2020; 157(3): 348-56.
86. Baan F, Bruggink R, Nijsink J, Maal TJJ, Ongkosuwito EM. Fusion of intra-oral scans in cone-beam computed tomography scans. *Clin Oral Investig* 2021; 25(1): 77-85.
87. Hamilton A, Singh A, Friedland B, Jamjoom FZ, Griseto N, Gallucci GO. The impact of cone beam computer tomography field of view on the precision of digital intra-oral scan registration for static computer-assisted implant surgery :A CBCT analysis. *Clin Oral Implants Res* 2022; 33(12): 1273-81.
88. Polizzi A, Leonardi R. Automatic cephalometric landmark identification with artificial intelligence: An umbrella review of systematic reviews. *J Dent* 2024; 146: 105056.
89. Hassan SM, Montaser AG, Sharkawy ZRE, Gad NA, Alrafee SA, Gabal ZA. Marginal fit and fracture resistance of CAD/CAM glass ceramic occlusal veneers with different preparation designs. *BMC Oral Health* 2025; 25(1): 793.
90. Yeslam HE, Freifrau von Maltzahn N, Nassar HM. Revolutionizing CAD/CAM-based restorative dental processes and materials with artificial intelligence: a concise narrative review. *PeerJ* 2024; 12: e17793.
91. Shenoy A, Maiti S, Nallaswamy D, Srinivasan M. A double-blind randomized crossover trial comparing the esthetic outcomes of CAD-CAM provisional restorations fabricated using CBCT and IOS acquisition methods. *J Dent* 2025; 153: 105545.
92. Morise Mahrous MM, Bin Dukhan M, Ali H, Ahmed Y, Ali Ahmed Fuoad Al Bayati S. Artificial Intelligence and its Implications in the Management of Orofacial Diseases-A Systematic Review. *Open Dent J* 2025; 19: e18742106349183.
93. Meto A, Halilaj G. The integration of cone beam computed tomography, artificial intelligence, augmented reality, and virtual reality in dental diagnostics, surgical planning, and education: a narrative review. *Appl Sci* 2025; 15(11): 6308.
94. Baccher S, Gowdar IM, Guruprasad Y, Solanki RN, Medhi R, Shah MJ, et al. CBCT: A comprehensive overview of its applications and clinical significance in dentistry. *J Pharm Bioallied Sci* 2024; 16(Suppl 3): S1923-S5.
95. Kot WY, Au Yeung SY, Leung YY, Leung PH, Yang W-f. Evolution of deep learning tooth segmentation from CT/CBCT images: a systematic review and meta-analysis. *BMC Oral Health* 2025; 25(1): 800.
96. Shujaat S, Riaz M, Jacobs R. Synergy between artificial intelligence and precision medicine for computer-assisted oral and maxillofacial surgical planning. *Clin Oral Investig* 2023; 27(3): 897-906.
97. Mourgues T, González-Olmo MJ, Huanca Ghislazoni L, Peñacoba C, Romero-Maroto M. Artificial Intelligence in Aesthetic Dentistry: Is Treatment with Aligners Clinically Realistic? *J. Clin. Med* 2024; 13(20): 6074.
98. Favaretto M, Shaw D, De Clercq E, Joda T, Elger BS. Big data and digitalization in dentistry: a systematic review of the ethical issues. *Int J Environ Res Public Health* 2020; 17(7): 2495.
99. Sabbah A. Smile analysis: diagnosis and treatment planning. *Dent Clin North Am* 2022; 66(3): 307-41.
100. Cervino G, Fiorillo L, Arzukanyan AV, Spagnuolo G, Cicciù M. Dental restorative digital workflow: digital smile design from aesthetic to function. *Dent J (Basel)* 2019; 7(2): 30.
101. Pauwels R. History of dental radiography: evolution of 2D and 3D imaging modalities. *Med Phys Int* 2020; 8(1): 235-77.
102. de Magalhães AA, Santos AT. Advancements in diagnostic methods and imaging technologies in dentistry: A literature review of emerging approaches. *J Clin Med* 2025; 14(4): 1277.
103. Misra S, Motiwala ZY, Nadeem F, Gohil KM, Puniyani A, Shetty G, et al. Recent advances in cosmetic dentistry: A review. *Bioinformation* 2025; 21(6): 1597-601.
104. Lin P-Y, Chen T-C, Lin C-J, Huang C-C, Tsai Y-H, Tsai Y-L, et al. The use of augmented reality (AR) and virtual reality (VR) in dental surgery education and practice: A narrative review. *J Dent Sci* 2024; 19(Suppl 2): S91-S101.
105. Klein P, Spitznagel FA, Zembic A, Prott LS, Pieralli S, Bongaerts B, et al. Survival and complication rates of feldspathic, leucite-reinforced, lithium disilicate and zirconia ceramic laminate veneers: a systematic review and meta-analysis. *J Esthet Restor Dent* 2025; 37(3): 601-19.