

مروری بر برخی از سرامیک‌های مورد استفاده در دندانپزشکی ترمیمی

پریسا راستگو اسکویی^۱، محمد رضوانی^{۲*}

۱ دکترای مهندسی مواد و متالوژی، گروه مهندسی مواد، دانشگاه تبریز

۲ استاد تمام، گروه مهندسی مواد، دانشگاه تبریز

m_rezvani@tabrizu.ac.ir

چکیده

جوامع بشری همیشه به دنبال راهی برای جایگزینی دندان از دست رفته یا آسیب دیده بوده است. فلزات به دلیل استحکام مکانیکی مطلوب در این زمینه مورد توجه قرار دارند اما به دلیل زیبایی ظاهری استفاده از آنها محدود شده است. پیشرفت‌های تکنولوژیکی در زمینه تولید دندانپزشکی، انقلابی در تولید ترمیم‌های دندانی بدون فلز ایجاد کرده است. با افزایش محبوبیت سرامیک‌های دندانی در میان مردم، انواع مختلفی از آن‌ها تولید و مورد استفاده قرار می‌گیرند. در انتخاب سرامیک‌های دندانی، باید دو فاکتور مهم استحکام سرامیک دندانی و زیبایی ظاهری آن در نظر گرفته شود. لازم است سرامیک دندانی علاوه بر داشتن ظاهر زیبا و طبیعی، دارای استحکام و مقاومت بالایی باشد. هدف از مقاله حاضر، ارائه مروری بر انواع مختلف مواد سرامیکی مورد استفاده در کاربردهای دندانی مانند سرامیک‌های زیرکونیایی، شیشه سرامیک‌های لوسیتی، آپاتیتی و مقایسه ویژگی‌های آنها است.

کلیدواژه: دندانپزشکی ترمیمی، شیشه سرامیک، استحکام، زیبایی ظاهری، آپاتیت.

۱ مقدمه

در دهه‌های اخیر جامعه دندانپزشکی مواد ترمیمی سرامیکی با خواص نوری عالی و قادر به بازیابی شکل و عملکرد را با توجه به نیازهای مکانیکی نواحی قدامی و خلفی مورد مطالعه قرار داده است. ترمیم‌های بدون فلز، به ویژه برای توانبخشی با نتایج زیبایی برتر شهرت یافته‌اند. پیشرفت‌های تکنولوژیکی در زمینه تولید مواد سرامیکی مورد استفاده در دندانپزشکی، انقلابی در تولید ترمیم‌های دندانی بدون فلز ایجاد کرده است. ترمیم‌های سرامیکی در طول دو دهه گذشته به دلیل ویژگی‌های نوری مطلوب (مطابقت بهتر با ساختار دندان)، خواص مکانیکی قابل قبول (مقاومت شکست و سایش بالا)، خواص بیولوژیکی (زیست سازگاری و بی‌اثر بودن)، پایداری شیمیایی (مقاومت در برابر تغییرات pH و دما) و ویژگی‌های حرارتی (عایق حرارتی خوب) در بین پزشکان محبوبیت پیدا کرده‌اند. طبق یک نظرسنجی سراسری، سرامیک‌ها هزینه تولید پایین‌تری دارند که منجر به جایگزینی ترمیم‌های فلزی-سرامیکی مرسوم با ترمیم‌های تمام سرامیکی در سال‌های اخیر شده است [۱].

همچنین بازار مواد سرامیکی دندانانی یکی از اجزای حیاتی دندانپزشکی مدرن، آماده رشد قابل توجهی است. این مسیر رشد با نرخ رشد سالانه قوی پشتیبانی می‌شود. نیروی محرکه اصلی این بازار، افزایش تقاضا برای راه‌حل‌های زیبایی دندانپزشکی است. زیرا بیماران گزینه‌های ترمیمی با ظاهر طبیعی را در اولویت قرار می‌دهند. تکامل فناوری‌ها و مواد دندانپزشکی نیز به طور قابل توجهی در روند صعودی این بازار نقش داشته است. یکی از عوامل اصلی رشد در بازار مواد سرامیکی دندانانی، افزایش شیوع اختلالات و بیماری‌های دندانانی مانند پوسیدگی دندان و بیماری‌های پریودنتال^۱ است که نیاز به درمان را ضروری نموده است. با افزایش جمعیت جهان، میزان بروز این بیماری‌ها رو به افزایش است و تقاضا برای ترمیم‌های دندانانی افزایش می‌یابد. جذابیت سرامیک‌های دندانانی به دلیل توانایی‌شان در تقلید از ظاهر دندان‌های طبیعی و ارائه نتایج مطلوب در بین بیماران و دندانپزشکان افزایش یافته است. علاوه بر این افزایش آگاهی در مورد سلامت دهان و دندان و اهمیت مداخلات به موقع منجر به افزایش مراجعات به دندانپزشکی شده و تقاضا برای مواد سرامیکی دندانانی را بیشتر کرده است. نمودار پیش بینی تغییرات فروش مواد دندانانی سرامیکی در شکل ۱ نشان داده شده است [۲].



شکل ۱- پیش بینی تغییرات فروش مواد دندانانی سرامیکی [۲].

پیشرفت‌ها در علم مواد دندانانی نیز نقش محوری در پیشبرد بازار داشته است. نوآوری در فناوری‌های تولید سرامیک منجر به توسعه موادی با خواص مکانیکی برتر شده و مناسب بودن آنها را برای طیف وسیعی از کاربردهای دندانپزشکی افزایش داده است. معرفی سیستم‌های طراحی به کمک کامپیوتر^۲ انقلابی در ساخت ترمیم‌های دندانانی ایجاد کرده و امکان ارائه راه‌حل‌های دقیق و سفارشی را فراهم کرده است که با نیازهای فردی بیمار همسو هستند. این پیشرفت‌های تکنولوژیکی نه تنها کیفیت ترمیم‌های دندانانی را بهبود بخشیده، بلکه زمان کار با صندلی را نیز کاهش داده و در نتیجه کارایی در مطب‌ها و آزمایشگاه‌های دندانپزشکی را افزایش داده است [۳].

علاوه بر این افزایش سطح درآمد قابل تصرف در اقتصادهای نوظهور، دسترسی بیشتر به مراقبت‌های پیشرفته دندانپزشکی را تسهیل کرده و به طور قابل توجهی به رشد بازار کمک کرده است. با افزایش

^۱ بیماری بیماری لثه، یک عفونت مزمن است که بافت‌های اطراف دندان‌ها، از جمله لثه‌ها، لیگامان پریودنتال و استخوان فک را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

^۲ Computer-Aided Design and Computer-Aided Manufacturing

سرعت شهرنشینی و بهبود زیرساخت مراقبت‌های بهداشتی، به ویژه در مناطق آسیا و اقیانوسیه و آمریکای لاتین، افراد بیشتری به دنبال گزینه‌های درمانی پیشرفته، از جمله ترمیم‌های دندان‌های مبتنی بر سرامیک هستند. این امر منجر به ایجاد پایگاه مشتری گسترده‌تر و افزایش نفوذ بازار در مناطقی شده است که قبلاً از خدمات مطب‌های مدرن دندانپزشکی محروم بوده‌اند. پیش‌بینی می‌شود این عوامل همراه با ابتکارات استراتژیک فعالان بازار برای گسترش ردپای جغرافیایی خود، رشد پایدار در بازار مواد سرامیکی دندان‌های را به دنبال داشته باشند [۴]. در این راستا، مطالعه حاضر با هدف مرور بر تحقیقات انجام شده روی مواد سرامیکی دندان‌های انجام شد.

۲. مروری بر مطالعات انجام شده درباره انواع مواد سرامیکی دندان‌های

طیف گسترده‌ای از سرامیک‌ها برای ساخت ترمیم‌های غیرمستقیم در بازار موجود است و می‌توان آن‌ها را بر اساس ترکیب/ریزساختار یا روش ساخت طبقه‌بندی کرد. با توجه به ترکیب، سرامیک‌ها را می‌توان به شیشه-سرامیک، چند بلوری و پایه رزین-سرامیک طبقه‌بندی کرد. این طبقه‌بندی به پزشکان کمک می‌کند تا مزایا و معایب هر ماده خاص در حفره دهان حین کاربرد را درک کنند. علاوه بر این پزشکان را قادر می‌سازد تا هنگام استفاده از سیمان‌های رزینی، بهترین روش آماده‌سازی سطح برای تحویل مواد ترمیمی غیرمستقیم را تشخیص دهند [۵].

به طور کلی انتخاب مواد ترمیمی و سیمان‌های چسباننده در محیط‌های درمانی مدرن به دلیل پیشرفت‌های جدید در سیمان، به طور فزاینده‌ای پیچیده شده است. پزشکان با انواع پیچیده‌ای از سیمان‌های رزینی مواجه هستند که هر کدام ساز و کارهای پلیمریزاسیون متفاوتی دارند و از نظر قدرت چسبندگی، ویژگی‌های جابجایی و موارد مصرف با هم متفاوت هستند. موفقیت پایدار یک ترمیم با طول عمر آن منعکس می‌شود که از طریق انتخاب یک عامل چسباننده در روش سیمان‌سازی حاصل می‌شود. برای ایجاد پیوند مناسب با عامل چسباننده، لازم است سطح سرامیک تقویت شود. در مقابل، باید از زبر شدن بیش از حد سطح جلوگیری شود زیرا ممکن است منجر به شروع و انتشار ترک در داخل سرامیک شود و در نهایت با شکستگی ترمیم سرامیکی پایان یابد. تغییرات شیمیایی در سطح سرامیک را می‌توان با حاکای شیمیایی و بهبود حفظ مکانیکی چسب یا با تنظیم میل ترکیبی سطح برای ترکیبات چسب ایجاد کرد. یک اتصال چسبی کامپوزیتی از رزین بادوام و پایدار، به یک ترمیم پروتزی حاکای شیمیایی صحیح در یک طرف و هم به سطح دندان در طرف دیگر نیاز دارد [۶].

۱-۲- شیشه سرامیک‌ها

شیشه-سرامیک‌های دندان‌های با تبلور کنترل‌شده شیشه‌های اکسیدی تولید می‌شوند و گروه مهمی از مواد زیستی مورد استفاده در دندانپزشکی مدرن را تشکیل می‌دهند. این مواد همچنین برای دانشمندان که اصول تبلور را مطالعه می‌کنند، از اهمیت بالایی برخوردارند. شیشه-سرامیک‌های دندان‌های باید الزامات سختگیرانه‌ای را برای پروتزه‌های ترمیمی برآورده کنند و فرآیند کار را برای دندانپزشکان ساده کرده و راحتی بیمار را افزایش دهند. شیشه-سرامیک‌های دندان‌های به گونه‌ای طراحی شده‌اند که زیبایی‌شناسی، استثنایی، شفافیت، استحکام بالا، دوام شیمیایی، مقاومت در برابر سایش، زیست‌سازگاری، رسانایی

حرارتی کم و سختی مشابه دندان‌های طبیعی داشته باشند. برخی از آنها همچنین زیست‌فعال هستند تا پاسخ مطلوبی را از دندان و استخوان نگهدارنده ارائه دهند. این امر امکان درمان حساسیت‌های فراوان، بازسازی استخوان آلوئولار^۱ و بهبود بافت‌های پریدنتال را فراهم می‌کند [۷].

با توجه به افزایش تقاضا برای درمان‌های زیبایی دندان با خواص مکانیکی و فیزیکی مطلوب، جستجوی مواد و تکنیک‌های توسعه مناسب در حرفه دندانپزشکی و بیماران بسیار مهم شده است. ظاهر جذاب دندان با لبخندی زیبا می‌تواند به بهبود اعتماد به نفس در بسیاری از زمینه‌های زندگی کمک کند. به عنوان مثال، روکش‌ها/روکش‌ها/بریج‌های شیشه-سرامیکی به دلیل نتایج زیبایی بالا، به یک روش ترمیمی محافظه‌کارانه در دندان تبدیل شده‌اند. یکی از روش‌های بهبود خواص شیشه سرامیک‌ها، تبلور کنترل شده بلورها در زمینه شیشه‌ای است. این روش به دانشمندان کمک می‌کند تا استحکام، شکستگی، شوک حرارتی و مقاومت در برابر خوردگی را افزایش دهند. اگرچه این بلورها ویژگی‌های ذکر شده‌ی شیشه سرامیک‌ها را بهبود می‌بخشند، اما سایر خواص زیبایی‌شناختی مانند شفافیت نیز باید توجیه شوند [۸].

شیشه-سرامیک‌های پایه میکا مواد سنتی هستند که معمولاً به عنوان شیشه-سرامیک‌های دندانپزشکی استفاده می‌شوند. این شیشه-سرامیک‌های دارای معایبی مانند خطر بالای شکستگی، مقاومت مکانیکی پایین و شرایط تولید دشوار هستند [۹]. به منظور غلبه بر ضعف این موارد، تحقیقات مختلفی به منظور افزایش استحکام این شیشه سرامیک‌ها انجام شده است. به عنوان مثال با جایگزینی K^+ یا Na^+ با Ba^{2+} یا Ca^{2+} به عنوان یون‌های بین لایه‌ای بلورهای میکا، شیشه-سرامیک‌های میکا با استحکام و چقرمگی بالا تولید شده‌اند. مقاومت شیمیایی و خواص مکانیکی این شیشه-سرامیک‌ها نیز می‌تواند با افزودن ZrO_2 بهبود یابد [۱۰]. اونیو^۲ و همکارانش نشان دادند که ZrO_2 تراگونال، استحکام خمشی و چقرمگی شکست را به $500 MPa$ و $3.2 MPa\sqrt{m}$ افزایش می‌دهد که مربوط به انحراف ترک توسط صفحات میکا و ذرات ZrO_2 است [۱۱].

یکی دیگر از انواع شیشه-سرامیک‌های دندان، لوسیت با مقاومت مکانیکی $164 MPa$ و ضریب انبساط حرارتی بالا است. با توجه به استحکام کم این شیشه-سرامیک‌ها به ندرت برای ترمیم‌های خلفی ثابت استفاده می‌شوند. این شیشه-سرامیک بر روی یک چارچوب فلزی انعطاف‌پذیر و سخت روکش می‌شود. برای جلوگیری از احتمال جدا شدن شیشه سرامیک‌ها از سطح فلز، معمولاً تف‌جوشی در محدوده دمایی $550^\circ C$ تا $900^\circ C$ انجام می‌شود و برای جلوگیری از ترک و شکست، باید انقباض کنترل شود [۱۲، ۱۳]. شرکت Ivoclar به طور قابل توجهی روی بلوک‌های چند رنگ شیشه سرامیک‌های مبتنی بر لوسیت با روش CAD/CAM تحقیق نموده است. این بلوک‌ها به تقلید دقیق خواص نوری دندان‌های طبیعی کمک می‌کنند و از چهار تا هشت لایه رنگی اصلی و میانی تشکیل شده است [۱۴].

^۱ آلوئول دندان (dental alveolus) پایه دندان حفره‌ای استخوانی است که ریشه دندان در آن قرار گرفته است.

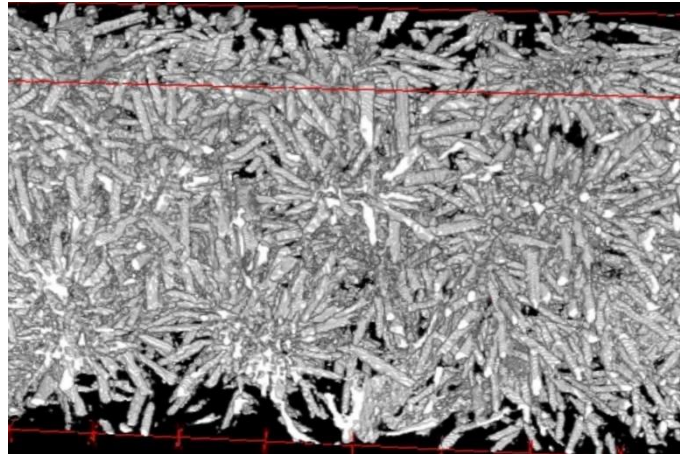
Uno^۲

شیشه-سرامیک‌های دندانی لیتیوم LS2، نسل سوم شیشه-سرامیک‌های دندانی با استحکام خمشی بالا (بالای ۳۰۰ MPa) است که تقریباً دو برابر بیشتر از شیشه-سرامیک‌های لوسیتی است. یکی از ویژگی‌های قابل توجه در این گروه از شیشه-سرامیک‌ها، خواص مکانیکی قابل قبول است. ژانگ^۱ و همکارانش این شیشه-سرامیک را با شیشه-سرامیک تقویت‌شده با لوسیت، شیشه-سرامیک فلدسپاتیک و شیشه-سرامیک فلورآپاتیت مقایسه کردند و گزارش دادند که LS2 بالاترین چقرمگی شکست، استحکام خمشی، مدول الاستیک و بلورینگی را نشان می‌دهد [۱۵]. این مواد که در سیستم‌های روکش، بریج، آنله و اینله استفاده می‌شوند، به صورت شمش بلوری و قابل پرس حرارتی در دسترس هستند. این شیشه-سرامیک به دلیل داشتن خواص نوری عالی مانند شفافیت، کاندیدای امیدوارکننده‌ای برای زیبایی یا ترمیم‌های تمام‌عیار است [۱۶]. شیشه-سرامیک‌های LS2 عمدتاً از حدود ۳۰ تا ۷۰ درصد بلورهای لیتیوم دی‌سیلیکات ($\text{Li}_2\text{Si}_2\text{O}_5$) با ابعاد چند میکرومتر و ساختار سوزنی‌شکل در زمینه شیشه‌ای تشکیل شده‌اند. فازهای دیگری مانند متاسیلیکات لیتیوم، فسفات لیتیوم (Li_3PO_4)، کریستوبالیت و فازهای کوارتز مانند محلول‌های جامد $\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$ و SiO_2 نیز متبلور می‌شوند. شیشه-سرامیک LS2 معمولاً توسط CAD/CAM ماشینکاری می‌شود. برای برآورده کردن الزامات چالش‌برانگیز فرآیند CAD/CAM، یک یا اغلب دو عملیات حرارتی خاص انجام می‌شود [۱۷].

شیشه-سرامیک آپاتیت نوع دیگری از مواد مورد استفاده برای مواد ترمیمی دندان به عنوان روکش حاوی فلوئور است که در آن فلورآپاتیت ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$) متبلور می‌شود. همچنین به منظور تنظیم رفتار سایشی با دندان طبیعی و ارتقاء خواص نوری مانند شفافیت، انواع مختلف ترمیم‌های سرامیکی با شیشه سرامیکی حاوی آپاتیت که معمولاً در تمام رنگ‌های کلاسیک دندان موجود است، روکش می‌شوند. محققان ترمیم‌هایی با ریزساختار آپاتیت سوزنی‌شکل، مشابه دندان‌های طبیعی، ساختند [۱۸]. بلورهای آپاتیت سوزنی‌شکل تأثیر مثبتی بر خواص زیبایی‌شناختی و خواص مکانیکی مختلف دارند. در مورد فرسایش اسیدی ناشی از بزاق، شیشه سرامیک‌های فلورآپاتیت و دندان‌های آنتاگونیست^۲، نرخ سایش و ضریب اصطکاک بیشتری در محیط بزاق نسبت به محیط خشک دارند [۱۹]. در مورد بلورینگی فاز فلورآپاتیت، تحقیقاتی انجام شد که ثابت کرد درصدهای مختلف CaO و دمای عملیات حرارتی می‌تواند میزان تبلور فاز فلورآپاتیت را تغییر دهد. میزان تبلور بیشتر، می‌تواند خواص مکانیکی را بهبود دهد و به طور قابل توجهی بر رفتارهای اصطکاکی و سایشی شیشه-سرامیک تأثیر بگذارد. علاوه بر این، شیشه سرامیک‌های ساخته شده می‌توانند شرایط محیط‌های خورنده شیمیایی شدید را تحمل کنند و با افزایش مقاومت شیمیایی و به حداقل رساندن شکستگی، طول عمر ترمیم را بهبود بخشند. تصویرسازی سه‌بعدی کامپیوتری از رشد کریستال آپاتیت در شیشه-سرامیک آپاتیتی برای کاربردهای دندانپزشکی در شکل ۲ نشان داده شده است [۲۰].

^۱ Zhang

^۲ دندان‌های آنتاگونیست به دندان‌هایی گفته می‌شوند که در فک مقابل یکدیگر قرار دارند و در هنگام جویدن با هم در تماس هستند.



شکل ۲- تصویرسازی سه بعدی کامپیوتری از رشد کریستال آپاتیت در شیشه-سرامیک آپاتیتی برای کاربردهای دندانپزشکی [۲۰].

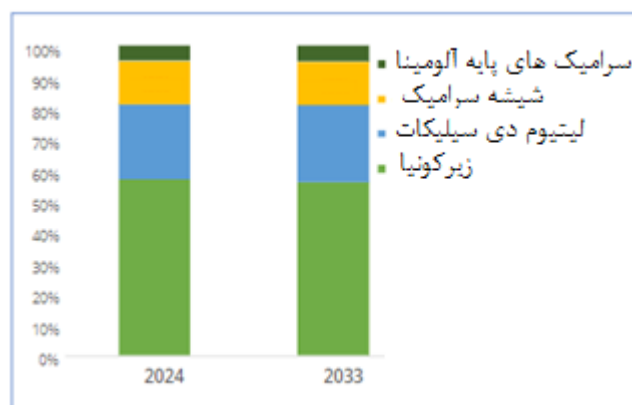
۲-۲- سرامیک‌های چندبلوری

سرامیک‌های چندبلوری با فقدان فاز شیشه‌ای مشخص می‌شوند و در این مواد دانه‌ها به صورت متراکم چیده شده‌اند که منجر به خواص مکانیکی بالاتر در مقایسه با شیشه سرامیک‌ها می‌شود. با این حال عدم وجود فاز شیشه‌ای و ویژگی‌های ناهمسانگرد دانه‌ها منجر به شفافیت کمتر در این سرامیک‌ها می‌شود. آلومینا و زیرکونیا سرامیک‌های چندبلوری اصلی مورد استفاده در دندانپزشکی هستند. زیرکونیا عمدتاً برای ساخت طیف وسیعی از ترمیم‌ها، از دندان‌های تکی گرفته تا پروتزهای کامل متکی بر ایمپلنت استفاده می‌شود. این ترجیح به دلیل استحکام بالا، مقاومت عالی در برابر شکستگی و زیبایی آن است. زیرکونیا شامل ۳ فاز است: مونوکلینیک، تتراگونال و مکعبی. ذرات فاز مونوکلینیک پایدار تقریباً ۴ تا ۵ درصد بزرگتر از دانه‌های تتراگونال هستند [۲۱]. فاز تتراگونال از نظر مکانیکی مستحکم است و در صورت وجود تنش، مانند ترک یا قرار گرفتن در معرض محیط مرطوب، توانایی تبدیل به فاز مونوکلینیک را دارد. این تبدیل منجر به دانه‌های مونوکلینیک بزرگتر می‌شود که می‌توانند از انتشار بیشتر ترک جلوگیری کنند. فاز تتراگونال ناهمسانگرد است که منجر به انحراف نور در مرزهای دانه شده و منجر به شفافیت کمتر می‌شود. فاز مکعبی کمترین خواص مکانیکی اما بالاترین خواص نوری را دارد زیرا در جهات مختلف بلورشناسی همسانگرد است و ضریب شکست آن به جهت گیری دانه وابسته نیست. نسبت بیشتر فاز مکعبی منجر به افزایش شفافیت همراه با خواص مکانیکی کمتر می‌شود. علاوه بر این، فاز مکعبی قابلیت تبدیل به فاز دیگری را ندارد [۲۲]. نسل اول زیرکونیا حاوی ۳ درصد مولی ایتریا (همچنین به عنوان Y۳ شناخته می‌شود) برای تثبیت فاز تتراگونال استفاده می‌شود. این دیسک‌ها تک‌رنگ بودند و ترمیم‌های ساخته شده از آنها دارای استحکام بالایی بود اما زیبایی ظاهری مناسبی نداشتند [۲۳]. نسل دوم دیسک‌های زیرکونیا چندرنگ هستند تا درجه‌بندی طبیعی رنگ در دندان را از ناحیه انسیزال تا سرویکال تقلید کنند و در نتیجه نیاز به رنگ‌آمیزی در ترمیم‌های یکپارچه را به حداقل برسانند [۲۴]. علاوه بر این، این دیسک‌ها با مقادیر مختلفی از ایتریا تولید شدند: ۳ درصد مولی ایتریا (Y۳) منجر به بیشترین نسبت فاز تتراگونال، ۴ درصد مولی ایتریا (Y۴) منجر به تولید تقریباً ۷۵ درصد فاز تتراگونال و ۲۵ درصد فاز

مکعبی و در قطعات با ۵ درصد مولی ایتریا (۷۵) تقریباً ۵۰ درصد فاز تتراگونال و ۵۰ درصد فاز مکعبی متبلور می‌شود. با توجه به تفاوت شفافیت بین یک دندان طبیعی در ناحیه برش (که عمدتاً مینا است و شفافیت بالاتری را نشان می‌دهد) و ناحیه سرویکال (عمدتاً عاج است و شفافیت کمتری دارد) [۲۵]، نسل سوم زیرکونیا توسعه یافت تا نه تنها درجه‌بندی رنگ از برش به سرویکال، بلکه درجه‌بندی شفافیت را نیز تکرار کند. این دیسک‌ها حاوی مقدار بیشتری ایتریا در ناحیه انسیزال (که منجر به درصد بالاتری از فاز مکعبی و شفافیت بالاتر می‌شود) و مقدار کمتری ایتریا در ناحیه سرویکال (که منجر به درصد بالاتری از فاز تتراگونال و شفافیت کمتر می‌شود) هستند. هدف، حذف نیاز به لایه‌بندی ناحیه انسیزال با پرسلان فلدسپاتیک به دلایل زیبایی است، زیرا لایه‌بندی می‌تواند نقطه ضعفی در ترمیم ایجاد کند که منجر به لب‌پریدگی و شکستگی شود [۲۶].

پیشرفت دیگر در زمینه سرامیک‌های چندبلوری، توسعه روش‌های تولید است که هدف نهایی آن ساخت ترمیم‌های دارای سایه‌های رنگی است. رایج‌ترین فناوری‌های مورد استفاده برای ساخت قطعات زیرکونیا، روش‌های پلیمریزاسیون با استفاده از چاپگرهای پردازش نور دیجیتال و همچنین فناوری رسوب ژل بصورت سه‌بعدی است. اگرچه تولید زیرکونیا پتانسیل امیدوار کننده‌ای را نشان می‌دهد، اما چندین حوزه وجود دارد که نیاز به بررسی بیشتر دارند، از جمله نسبت بحرانی پودر به مایع در دوغاب، ویسکوزیته بالای دوغاب، به دام افتادن حباب هوا که منجر به ایجاد تخلخل‌ها، تجمع بقایای پودر در چاپ - که منجر به نقاط شکست، نقص‌های بین لایه‌ای می‌شود [۲۳].

ترکیب خواص مکانیکی قوی و بهبود در زیبایی ترمیم‌های زیرکونیای یکپارچه، این ماده را به یکی از پرکاربردترین مواد توسط پزشکان در سناریوهای مختلف بالینی تبدیل کرده است. طبق یک بررسی سیستماتیک، روکش‌های زیرکونیای یکپارچه روی دندان‌های طبیعی میزان بقای بسیار طولانی مدتی دارند که از ۹۱٪ تا ۱۰۰٪ متغیر است. تجزیه و تحلیل دیگری از روکش‌های ایمپلنت تکی نشان داد که روکش‌های زیرکونیای یکپارچه در مقایسه با ترمیم‌های فلزی-سرامیکی، میزان بقای کوتاه مدت قابل مقایسه‌ای دارند. گزارش شده است که روکش‌های زیرکونیای یکپارچه میزان لب‌پریدگی بسیار کمتری دارند (۰٪) در زیرکونیای یکپارچه در مقابل ۷۰٪ برای فلز-سرامیک). همچنین یک بررسی سیستماتیک دیگر نشان داده است که زیرکونیا ماده مناسبی برای پروتزهای ثابت دندانی قدامی است و میزان موفقیت آن بیش از ۸۰٪ در یک دوره ۳ تا ۱۰ ساله است [۲۷]. در مورد پروتزهای کامل متکی بر ایمپلنت، ترمیم‌های زیرکونیای یکپارچه میزان بقای بالای ۹۷٪ را با میانگین دوره پیگیری ۴ سال نشان داده‌اند. پیش بینی میزان تولید محصولات مختلف سرامیکی به صورت شماتیک در شکل ۳ نشان داده شده است [۲۸].



شکل ۳- پیش بینی میزان تولید محصولات سرامیکی مختلف [۲۸].

۲-۳- سرامیک های بر پایه رزین

نوع جدیدتر مواد ترمیمی، سرامیک های بر پایه رزین هستند که با هدف ترکیب مزایای مواد پلیمری و سرامیکی معرفی شده اند. این مواد حاوی یک زمینه آلی با نسبت بالایی از ذرات سرامیکی هستند که به عنوان پرکننده تعبیه شده اند. در سال ۲۰۱۳، انجمن دندانپزشکی آمریکا^۱ (ADA) در مورد رویه ها و نامگذاری های دندانپزشکی، موادی با «ترکیبات عمدتاً معدنی مقاوم» را به عنوان سرامیک های دندان به رسمیت شناخت، که با نسخه قبلی که در آن «ترکیبات معدنی مقاوم غیر رزینی» معیار مواد سرامیکی بود، متفاوت بود. در مقایسه با مواد تمام سرامیکی، مواد رزین-زمینه شکننده نیستند و خواص جذب شوک دارند که می تواند از نظر بالینی مهم باشد، به خصوص در ترمیم های ایمپلنت که اثر میرایی رباط پیوندنتال^۲ وجود ندارد. نسخه اولیه سرامیک های رزین-زمینه (Lava Ultimate, 3M) «نانوسرامیک رزین» نامیده می شود که حاوی نانوذرات سیلیس و زیرکونیا و ذرات نانو خوشه ای (۸۰ درصد وزنی) است که در یک زمینه پلیمری با پیوند عرضی بالا گنجانده شده اند. پرکننده های سرامیکی با یک عامل اتصال سیلان برای بهبود پیوند بین پرکننده و رزین-زمینه عملیات حرارتی می شوند. این امر منجر به افزایش مدول الاستیسیته (۱۴.۵ گیگا پاسکال) به مقادیر نزدیک به عاج دندان با مقاومت سایشی و مقاومت شکستگی بالاتر از رزین های کامپوزیتی شده است [۲۹]. نوع دیگر سرامیک زمینه رزینی (VITA Enamic, Vita North America) یک «شبکه سرامیکی نفوذ یافته با پلیمر» است که در آن دو شبکه سه بعدی در هم نفوذ کرده اند. شبکه سرامیکی حاوی فلدسپار و شبکه پلیمری حاوی پلیمرهای متاکریلات است. مدول الاستیسیته این قطعات (۲۸ گیگا پاسکال) بین عاج و مینای دندان قرار دارد [۳۰]. یکی دیگر از سرامیک های مبتنی بر رزین (GC, CERASMART) دارای یک «نانو سرامیک انعطاف پذیر» است و از ذرات آلومینا-باریم-سیلیکات تعبیه شده در داخل یک زمینه پلیمری تشکیل شده است که در مقایسه با انواع ذکر شده سرامیک های مبتنی بر رزین، استحکام خمشی بالاتر و مدول الاستیسیته پایین تر (۱۰ گیگا پاسکال) دارد [۳۱].

^۱ American Dental Association

^۲ رباط پیوندنتال (Periodontal ligament) که به عنوان رباط دور دندان نیز شناخته می شود، بافت همبندی است که دندان را به استخوان فک متصل می کند.

پیشرفت‌های اخیر در زمینه تولید، امکان ساخت روکش‌های چاپ‌شده را با مزایایی مانند هزینه‌های کمتر برای تجهیزات و مواد، امکان ساخت چندین ترمیم همزمان و عدم نیاز به تعویض فرزها، فراهم کرده است. در سال ۲۰۲۳، ADA الزام "فشردن، پختن، صیقل دادن یا آسیاب کردن" مواد را حذف کرد و اجازه داد مواد چاپ سه‌بعدی به عنوان روکش‌های سرامیکی دائمی در نظر گرفته شوند. مواد قابل چاپ موجود که در حال حاضر به عنوان ترمیم‌های نهایی تبلیغ می‌شوند، حاوی حداکثر ۵۰٪ محتوای پرکننده هستند. محتوای پرکننده کمتر، در مقایسه با مواد آسیاب‌شده، باعث می‌شود رزین در حین چاپ بهتر در مخزن رزین جریان یابد و همچنین به نور اجازه می‌دهد تا برای پخت مناسب از آن عبور کند [۳۲]. گزارش شده است که محتوای پرکننده در برخی از رزین‌های آزمایش‌شده بر پایه سیلیس است، در حالی که زمینه بر پایه متاکریلات، از جمله اورتان دی متاکریلات و بیسفنول A-گلیسیدیل متاکریلات است. علاوه بر این، رزین‌های دیگری از جمله تری اتیلن گلیکول دی متاکریلات و بیسفنول A-دی متاکریلات اتوکسیله، برای کاهش ویسکوزیته و بهبود جریان‌پذیری رزین مایع اضافه می‌شوند. فناوری‌های نوآورانه به تولیدکنندگان این امکان را می‌دهند که محتوای پرکننده را افزایش داده و خواص مکانیکی ترمیم‌ها را بهبود بخشند [۳۳]. از آنجا که این دسته از مواد نسبتاً جدید در بازار هستند، داده‌های محدودی در مورد عملکرد بالینی این مواد در دسترس است. جدا شدن به عنوان عارضه اصلی قطعات سرامیکی بر پایه رزین (Lava Ultimate، M۳) گزارش شده است که منجر به منع مصرف این ماده برای ترمیم‌های با پوشش کامل شده است. در یک کارآزمایی بالینی بر روی ترمیم‌های متکی بر ایمپلنت، و میزان جدا شدن ۸۰٪ در سال اول استفاده بالینی گزارش شد. طبق کارآزمایی‌های بالینی کوتاه‌مدت و بررسی‌های سیستماتیک، سایر سرامیک‌های زمینه رزینی، عملکرد بالینی قابل قبول و میزان بقای قابل مقایسه‌ای با سایر ترمیم‌های سرامیکی در هنگام استفاده به عنوان ترمیم‌های پوشش جزئی یا پوشش کامل نشان داده‌اند [۳۴].

۳ ویژگی‌های زیبایی‌شناسی

دندان‌های طبیعی به داشتن فلورسانس سفید در زیر نور ماوراء بنفش معروف هستند. هنگام ساخت ترمیم دندان از شیشه سرامیک، باید عوامل فلورسانس اضافه شود تا پرتاب‌هایی با فلورسانس نزدیک به دندان‌های طبیعی تولید شود. برای تولید ترکیبات فلورسانس مناسب، که با ترکیب طبیعی مطابقت داشته باشد، باید شرایطی رعایت شود. شیشه سرامیک دندان فلورسنت باید دارای فلورسانس و رنگ‌های طبیعی باشد که تناژهایی نزدیک به سایه دندان‌های طبیعی دارند. رنگ ماده فلورسنت باید سفید باشد تا از کدر شدن ترکیب شیشه سرامیک یا کاهش شفافیت آن جلوگیری شود. مواد فلورسنت باید رنگ دندان سرامیکی مصنوعی را القا کنند تا فلورسانس را با طیف رنگ آبی-سفید متمایل به سبز هنگامی که با اشعه ماوراء بنفش در طول موج حدود ۳۶۵۰ Å روشن می‌شود، نشان دهد [۳۵].

برای توسعه رنگ‌ها و فلورسانس در مناطق UV در سرامیک‌های دندان، یک رنگدانه سرامیکی یا ترکیبی از چندین رنگدانه در ترکیب گنجانده شده است. بلورهای رنگدانه‌ها در طول فرآیند سینتر به اندازه کافی دست نخورده باقی می‌مانند تا رنگ مورد نظر را در محصول نهایی ایجاد کنند. رنگدانه‌های سرامیکی عمدتاً از اکسیدهای نسوز تشکیل شده‌اند، جایی که کاتیون‌های خاکی کمیاب یا فلزات واسطه مانند Co، Cr، Fe، Mn، Ni و V به عنوان مراکز رنگ عمل می‌کنند. با این حال، رنگ ارائه شده توسط آن رنگدانه‌ها تا حد زیادی توسط ساختار بلوری ترکیب میزبان که یون‌های فلزات واسطه در آن گنجانده شده‌اند، کنترل می‌شود. بسیار رایج است که رنگ تولید شده در شیشه مادر با رنگی که در شیشه سرامیک متبلور شده از همان شیشه ایجاد شده است، متفاوت باشد. این تغییر از طریق تغییر شیشه باقیمانده که اجزای تشکیل دهنده بلورها از آن جدا می‌شوند، ایجاد می‌شود. این تغییر همچنین به ماهیت فاز یا فازهای بلوری توسعه یافته و سهولت استفاده از عناصر رنگ آمیزی در ساختار بلوری جدید بستگی دارد [۳۶]. همچنین تغییر رنگ ممکن است به نوع جایگزینی کاتیون‌ها در ساختار بلوری مربوط باشد که به صورت محلول جامد جزئی یا کاملاً جامد یا به صورت بینابینی در ساختار گنجانده شده است. ادغام اکسیدهای رنگی مانند TiO_2 ، MnO_2 ، Fe_2O_3 ، CuO ، CoO ، CeO_2 در شیشه-سرامیک به همین ترتیب میدان اطراف را برای تولید شیشه-سرامیک میکای رنگی ذاتی تغییر می‌دهد [۳۷]. سایه رنگ تولید شده توسط CeO_2 همچنین می‌تواند از طریق گنجاندن رنگ‌های نسبتاً بی اثر مانند Er_2O_3 برای قرمز، MnO_2 یا Cr_2O_3 برای خاکستری و TiO_2 برای زرد به سفید اصلاح شود. رنگ شیشه سرامیک دندان در ناحیه نور مرئی بین ۳۸۰-۷۰۰ نانومتر اندازه‌گیری می‌شود. هنگامی که شیشه سرامیک مصنوعی دندان در دهان بیمار قرار می‌گیرد، دیده می‌شود که رنگ سرامیک به دلیل تغییر در شرایط نوری با رنگ‌های طبیعی دندان مطابقت ندارد. دلیل آن ممکن است این باشد که دندان‌های مصنوعی با طیف رنگی یکسان فلورسانس نمی‌دهند (به خصوص زمانی که منبع روشنایی، نور روز نباشد و نور ماوراء بنفش باشد). بنابراین دندان‌های مصنوعی در شرایط نوری مختلف مانند دندان‌های طبیعی رفتار نمی‌کنند [۳۸]. این اثر متامریک یک مسئله پیچیده برای بیمار است زیرا دندان‌های او در زیر نورهای مختلف با رنگ‌های متفاوتی به نظر می‌رسند. بنابراین، دندان‌های مصنوعی باید حاوی اجزای فلورسانس باشند تا فلورسانس طبیعی را در شیشه سرامیک القا کنند. ترکیب فلورسانس باید برای سلامتی انسان مطابق با معیارهای ایمن بوده و در برابر دمای سینتر تغییر نکرده و رادیواکتیو نباشد. برای تحقق این الزامات، اجزای فلورسانس در حالت ایده‌آل باید دندان شیشه سرامیکی را وادار کنند که فلورسانس را با رنگ آبی-سفید متمایل به سبز در هنگام روشن شدن با اشعه ماوراء بنفش در طول موج حدود $3650 \text{ \AA}$ نشان دهد [۳۹]. تصویر دندان های مصنوعی با شیب طبیعی رنگ دندان انسان در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴- تصویر دندان‌های مصنوعی ساخته شده با شیب طبیعی رنگ دندان انسان.

شرایطی وجود دارد که برای تولید ترکیبات فلورسانس مناسب که بتواند با دندان طبیعی مطابقت داشته باشد، باید رعایت شود. ترکیب فلورسانس باید فلورسانس و رنگ‌های طبیعی را نشان دهد که تناژهایی نزدیک به سایه‌های دندان طبیعی داشته باشد، یعنی رنگ دندان‌ها باید در نور مرئی و نور UV یکسان باشد. رنگ ماده فلورسنت باید سفید باشد و باعث کدر شدن شیشه سرامیک یا کاهش شفافیت آن نشود. هنگام ساخت دندان‌های شیشه‌سرامیکی مصنوعی، برخی از انواع مواد فلورسانس برای تولید پرتلهایی با فلورسانس نزدیک به دندان‌های طبیعی اضافه می‌شود [۴۰]. برای تولید رنگ‌های قابل قبول برای استفاده در شیشه سرامیک‌های دندان، رنگ‌هایی که اضافه می‌شوند باید شیشه سرامیک‌های زرد تا زرد متمایل به قرمز تولید کنند. به جز اورانیوم، هیچ کاتیون فلز واسطه یا فلز خاکی کمیاب شناسایی نشده است که اثر زرد شفاف را به همراه داشته باشد. با این حال، مقررات مربوط به رادیواکتیویته، استفاده از اورانیوم را محدود می‌کند. همچنین استفاده از ترکیب اکسیدهای Ti و Ce می‌تواند رنگ‌های زرد را در لعاب‌ها و شیشه‌ها ایجاد کند [۴۱]. استفاده از CeO_2 به خودی خود هیچ رنگی در شیشه ایجاد نمی‌کند، اما در ترکیب با TiO_2 زرد پررنگ را ایجاد می‌کند [۳۷]. رنگ زرد را می‌توان با ترکیب اکسید فلز خاکی کمیاب Er_2O_3 تغییر داد [۴۲]. شیشه سرامیک حاوی ترکیب CeO_2 و TiO_2 در نور مرئی عملکرد خوبی دارد، اما در این قطعات، فلورسانس در نور فرابنفش موج بلند اتفاق نمی‌افتد، زیرا وجود TiO_2 به شدت اشعه ماوراء بنفش را جذب می‌کند و در نتیجه مشکل تغییر رنگ با نور ایجاد می‌شود [۴۳]. سایر ترکیبات فلورسانس بر اساس اکسیدهای سرب و تربیوم فلورسانس را در زیر نور فرابنفش تولید می‌کنند. فلورسانس اکسید تربیوم همراه با طیف‌های جذب اکسید سرب به طور شگفت‌انگیزی فلورسانس مشابه دندان‌های طبیعی را ایجاد می‌کند. در نور مرئی، CeO_2 عنصر کلیدی برای رنگ زرد است. CeO_2 همچنین به عنوان یک عامل فلورسانس قوی در شیشه سرامیک عمل می‌کند و فلورسانس زرد را تحت نور فرابنفش با طول موج بلند ($3650 \text{ \AA}$) ایجاد می‌کند. یک شیشه سرامیک آلکالی یا آلومینوسیلیکات خاکی قلیایی می‌تواند فلورسانس را از طریق افزودن یک فعال‌کننده مانند یوروپیوم نشان دهد. در شیشه سرامیک با تحریک اشعه ماوراء بنفش فلورسانس اتفاق می‌افتد و رنگی شبیه به رنگ دندان‌های طبیعی ایجاد می‌شود. استفاده از فعال‌کننده یوروپیوم برای تولید فلورسانس و کمک به جلوگیری از ایجاد رنگ‌های تیره در شیشه سرامیک‌های لوسیت/فلدسپات استفاده می‌شود. این

شیشه سرامیک‌ها دارای ترکیب پایه آلومینوسیلیکات هستند که به آن یوروپیوم اضافه می‌شود. شیشه سرامیک دندانانی معمولاً شامل فازهای بلوری ریز هستند که در زمینه شیشه‌ای پراکنده شده و در دمای ۹۰۰ تا ۱۰۰۰°C سینتر می‌شوند. مواد فلورسنت حاوی یوروپیوم به عنوان فعال کننده فلورسانس (فلورسانس قرمز در مورد یوروپیوم سه ظرفیتی و فلورسانس آبی در مورد یوروپیوم دو ظرفیتی) عمل می‌کنند. ترکیبات سرامیکی که فقط حاوی یوروپیوم به عنوان فعال کننده هستند، فلورسانس آبی سفید یا بنفش-سفید نامطلوب را پس از سینتر نشان می‌دهند [۴۴]. یک راه حل پیشنهادی برای مشکل عدم تطابق رنگ، جایگزینی بخشی از یوروپیوم با عنصر دیگری است که به موجب آن توزیع طول موج برای ایجاد رنگ‌های فلورسنت، که بیشتر با دندان‌های طبیعی مرتبط هستند، گسترش می‌یابد.

۴ فرصت‌ها و تهدیدها

بازار مواد سرامیکی دندانانی، فرصت‌های فراوانی را ارائه می‌دهد که ناشی از پیشرفت‌های تکنولوژیکی و انتظارات در حال تغییر بیماران است. یکی از فرصت‌های مهم، توسعه مداوم فرمولاسیون‌های سرامیکی جدید و فناوری‌های تولید است که خواص و کاربردهای این مواد را افزایش می‌دهد. انتظار می‌رود نوآوری‌هایی مانند سرامیک‌های هیبریدی و سیستم‌های بهبود یافته CAD/CAM، دامنه ترمیم‌های سرامیکی را گسترش داده و طیف وسیع‌تری از نیازها و ترجیحات بیماران را برآورده کنند. با ادامه تحقیقات برای گسترش مرزهای علم مواد، بازار آماده است تا از معرفی محصولات پیشرفته‌ای که عملکرد و زیبایی‌شناسی برتر ارائه می‌دهند، بهره‌مند شود [۴۵، ۴۶].

یکی دیگر از فرصت‌های امیدوارکننده، افزایش تقاضا برای روش‌های دندانپزشکی زیبایی، به ویژه در میان جمعیت جوان‌تر است. تمایل به لبخند زیبا و تأثیر فزاینده رسانه‌های اجتماعی بر تصورات شخصی، علاقه به درمان‌های زیبایی را افزایش داده و بازاری قوی برای ترمیم‌های مبتنی بر سرامیک ایجاد کرده است. این روند با افزایش درآمد قابل توجه، روز به روز در حال افزایش است. با افزایش تعداد زیباجویان، انتظار می‌رود تقاضا برای روکش‌های سرامیکی، تاج‌ها و سایر راه‌حل‌های زیبایی‌شناسی رشد قابل توجهی را تجربه کند [۴۷].

علیرغم فرصت‌های امیدوارکننده، بازار مواد سرامیکی دندانپزشکی با تهدیدها و چالش‌های خاصی نیز روبرو است که می‌تواند مانع رشد آن شود. یکی از محدودیت‌های قابل توجه، هزینه بالای ترمیم‌های سرامیکی است که می‌تواند دسترسی به آنها را برای برخی از بیماران محدود کند. در حالی که پیشرفت در فناوری، کارایی فرآیندهای تولید را بهبود بخشیده است، سرمایه‌گذاری اولیه مورد نیاز برای مواد و تجهیزات سرامیکی همچنان مانعی برای برخی از مطب‌های دندانپزشکی است. علاوه بر این، بازار با رقابت مواد جایگزین، مانند رزین‌های کامپوزیت و فلزات، روبرو است که ممکن است مزایای هزینه یا مزایای خاصی را در کاربردهای خاص ارائه دهند. پرداختن به این چالش‌ها برای فعالان بازار جهت حفظ و گسترش جایگاه خود در صنعت بسیار مهم خواهد بود [۴۸].

۵ نتیجه گیری

دندانپزشکی مدرن با ادغام فناوری CAD/CAM، تحولی دگرگون کننده را تجربه کرده است که به طور قابل توجهی بر انتخاب و کاربرد مواد تمام سرامیکی تأثیر گذاشته است. این نسخه خطی، تغییر اساسی از روش های سنتی به دیجیتال را برای پزشکان با هدف بهبود نتایج بیمار برجسته می کند. این مطالعه بر ضرورت انتخاب موادی که استحکام و دوام استثنایی را فراهم می کنند، تأکید می کند و در عین حال عوامل زیبایی شناختی، از جمله پایداری رنگ و شفافیت، که برای دستیابی به زیبایی ضروری هستند را نیز در نظر می گیرد. فناوری CAD/CAM پزشکان را قادر می سازد تا کنترل دقیقی بر طراحی و ساخت داشته باشند و در نتیجه، قرار ملاقات ها را بهینه کنند، راحتی بیمار را بهبود بخشند و همکاری بین رشته ای را ارتقا دهند. این راهنما به عنوان یک منبع عملی برای پزشکانی که پیچیدگی های انتخاب مواد تمام سرامیکی را در دندانپزشکی دیجیتال معاصر مدیریت می کنند، عمل می کند و به آنها در دستیابی به درمان های ترمیمی قابل اعتماد و طولانی مدت کمک می کند.

در کاربرد عملی، انتخاب مواد پروتز باید با ارزیابی جامع از سناریوی بالینی، شامل خواسته های بیومکانیکی ترمیم، انتظارات زیبایی شناختی بیمار و پایداری طولانی مدت ماده و سیستم سمان انتخاب شده، هدایت شود. برای ترمیم های قدامی، سرامیک های بسیار شفاف مانند پرسنل فلدسپاتیک و دی سیلیکات لیتیوم به دلیل خواص نوری شان ترجیح داده می شوند، ضمن اینکه نیاز آنها به پشتیبانی کافی و مدیریت دقیق اکلوژال^۱ نیز مورد توجه قرار می گیرد. در نواحی خلفی یا برای ترمیم های تحمل بار، مواد با استحکام بالا (مانند زیرکونیا، سیلیکات لیتیوم تقویت شده با زیرکونیا)، دوام و مقاومت در برابر شکستگی بیشتری را نشان می دهند و در نتیجه کاربرد این مواد افزایش می یابد. سرامیک های هیبریدی یک گزینه همه کاره ارائه می دهند که انعطاف پذیری و استحکام متوسط را برای موارد مختلف متعادل می کند. موفقیت طولانی مدت این ترمیم ها به شدت به انتخاب و کاربرد مناسب سیمان های رزینی وابسته است و عواملی مانند استحکام پیوند، مکانیسم پلیمریزاسیون و سازگاری مواد برای نتایج قابل پیش بینی تعیین کننده هستند.

واژه نامه

Glass Ceramic	شیشه سرامیک
Leucite	لوسیت
Apatite	آپاتیت
Monoclinic	مونوکلینیک
Tetragonal	تتراگونال
Cubic	مکعبی
Fluorescence	فلورسانس

^۱ اکلوژال یکی از مهم ترین مفاهیم در علم دندان پزشکی است که به نحوه برخورد و تماس دندان ها با یکدیگر هنگام بستن فک ها اشاره دارد.

- [١] J.R. Kelly, "Dental ceramics: current thinking and trends", *Dental Clinics*, vol.48, no.2 , pp. 513-530, 2004.
- [٢] L.H.d. Silva, E.d. LIMA, R.B.d.P. Miranda, S.S. Favero, U. Lohbauer, P.F. "Cesar, Dental ceramics: a review of new materials and processing methods", *Brazilian oral research*, vol. 31, pp. e58, 2017.
- [٣] A.H. Nejat, "Overview of current dental ceramics", *Dental Clinics*, vol. 69. no.2, pp. 155-171, 2025.
- [٤] B.B. Dor, A. Villa, C. Hayes, E. Alpert, D.S. Shepard, S.T. Sonis, "Financial burden of dental care among patients with head and neck cancer", *JAMA Otolaryngology–Head & Neck Surgery* , vol. 150, no.9 pp. 811-818,2024.
- [٥] S. Habibzadeh, F. Khamisi, S.A. Mosaddad, G.V.d.O. Fernandes, A. Heboyan, "Full-ceramic resin-bonded fixed dental prostheses: A systematic review", *Journal of Applied Biomaterials & Functional Materials*, vol. 22,pp. 310-342, 2024 .
- [٦] N.C. Lawson, J.O. Burgess, "Dental ceramics: a current review", *Compendium of Continuing Education in Dentistry*, vol.35, no.3,2014.
- [٧] Y. Jiang, C. Zhang, J. Xu, J. Xu, X.Q. Zhan, N .Ma, F.C. Tsai, "An overview of dental glass–ceramics: From material design to the manufacturing process", *International Journal of Ceramic Engineering & Science*, vol. 6, no.4, pp.1120-1139, 2024.
- [٨] X. Liu, X. Yao, R. Zhang, L. Sun, Z. Zhang, Y. Zhao, T. Zhang, J. Yan ,Y. Zhang, X. Wu, "Recent advances in glass-ceramics: performance and toughening mechanisms in restorative dentistry", *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials*, vol. 112, no.1, pp.11-36, 2024.
- [٩] F.P.d.F.C. Pietoso, S.F. Santos, L.H.d. Silva, P.F. Cesar, "Production and characterization of feldspathic-muscovite glass composite for dental prosthesis", *Brazilian oral research*, vol. 39, pp.110-132, 2025.
- [١٠] S. Gali, K. Ravikumar, B. Murthy, B. Basu, "Zirconia toughened mica glass ceramics for dental restorations", *Dental Materials*, vol. 34, no.3, pp.36-45, 2018.
- [١١] S. Uno, M. Okada, H. Taketa, Y. Torii, T. Matsumoto, "Toughening of highly translucent zirconia by monoclinic ZrO₂ and SiO₂ particle coating", *Dental materials journal*, vol. 39, no.2,pp. 295-301, 2020.
- [١٢] Z.G.A.-k. Al-Jlaihawi, "Study of the physical properties of a novel lithium aluminosilicate dental glass-ceramic", Sheffield Hallam University (United Kingdom)2020.
- [١٣] C. Li, G. Wang, S. Wang, W. Shen, Y. Zhang, J. Kang, Z. Xiao, "Fluorapatite Glass-Ceramics in Dentistry: Synthesis, Properties", *Forming Technology, Applications, Challenges, and Future Perspectives, Materials*, vol. 18, no.4,pp. 804-815,2025.
- [١٤] R.N. Raghavan, "Ceramics in dentistry", *Sintering of Ceramics-New Emerging Techniques* March 2nd,2014.
- [١٥] Y. Zhang, H .Guo, H. Zhang, Y. Deng, B. Wang, J. Yang, "Effect of added mullite whisker on properties of lithium aluminosilicate (LAS) glass-ceramics prepared for dental restoration", *Journal of biomedical nanotechnology*, Vol. 14, no.11, pp.1944-1952, 2018.
- [١٦] D.U. Tulyaganov, M.F. Alves, K. Dimitriadis, S. Murtazaev, S. Agathopoulos, H.R. Fernandes, "Fundamentals and advances in production and application of non-stoichiometric lithium disilicate glass-ceramics: A brief review", *Ceramics International*,2025.
- [١٧] L.D. Silva, V.O .Soares, O. Peitl Filho, F.C. Serbena, M. Rampf, C. Ritzberger, M. Dittmer, E.D. Zanutto, "Exploring new machinable, strong lithium metasilicate-based glass-ceramics for dental applications", *Ceramics International*, Vol. 50, no.17, pp. 31335-31344, 2024.

- [١٨]D. Abozaid, A. Azab, M.A. Bahnsawy, M. Eldebawy, A. Ayad, R. Soomro, E. Elwakeel, M.A. Mohamed, "Bioactive restorative materials in dentistry: a comprehensive review of mechanisms, clinical applications, and future directions", *Odontology*, Vol.1, pp.1-29, 2025.
- [١٩]S. Scutt ,D. Gillam, "The Application of Degradable/Bioactive Glasses in Dentistry: An Overview", *Clinical Oral Science and Dentistry*,2025.
- [٢٠]W. Höland, V. Rheinberger, E. Apel, C. van't Hoen, M. Höland, A. Dommann, M. Obrecht, C. Mauth, U. Graf-Hausner, "Clinical applications of glass-ceramics in dentistry", *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, Vol.17, pp.11, 1037-1042,2006.
- [٢١]O. Akhlaghi, E. Camposilvan, V. Garnier, Z. Goharibajestani, S. Khabbaz, C. Ow-Yang, Y. Jorand, L. Gremillard, "Conventional sintering of nano-crystalline Yttria-Stabilized Zirconia enables high-strength, highly translucent and opalescent dental ceramics", *Dental Materials*, Vol.40, no.7, pp.1031-1040,2024.
- [٢٢]A.A. Madfa, F.A. Al-Sanabani, N.H. Al-Qudami, J.S. Al-Sanabani, A.G. Amran, "Use of zirconia in dentistry: An overview", *The Open Biomaterials Journal*, Vol. 5, no.1,pp. 1-9, 2014.
- [٢٣]B.F. Costa, L. Durães, E.A. da Silva, I.I. Costa, V.A. Khomchenko, R.A. Vezo, A. Ramalho, "Synthesis, Structural, and Mechanical Properties of Alumina–Yttria-Stabilized Zirconia Nanocomposites for Prospective Dental Ceramics", *Advanced Engineering Materials*, Vol.27, no.6, pp. 980-992,2025.
- [٢٤]F. Zhang, K. Zhang, Y. Zuo, X. Jin, J. Yang, "Effect of inert glass on the physical and mechanical properties of zirconia dental ceramics fabricated by digital light processing", *Journal of the American Ceramic Society*, Vol.107, no.7,pp. 4689-4704, 2024.
- [٢٥]N. Golriz, N. Hosseinabadi, "Additive manufacturing of ceria and yttria incorporated toughened monolithic zirconia dental ceramic crowns: In vitro simulated aging behavior", *The Journal of Prosthetic Dentistry*, Vol.132, no.3,pp.16-25,2024.
- [٢٦]F. Sharifianjazi, A.H. Pakseresht, M.S. Asl, A. Esmailkhanian, H.W. Jang, M. Shokouhimehr, "Hydroxyapatite consolidated by zirconia: applications for dental implant", *Journal of Composites and Compounds*, Vol. 2, no.2, pp.26-34, 2020.
- [٢٧]S. Gali, Z. Patel, Y. Akanksha, V. Karuveetil, "Effect of Coloring Pigments on the Properties of Dental Zirconia—A Systematic Review and Meta-Analysis", *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry*, Vol. 37, no.6, pp. 1419-1442,2025.
- [٢٨]H. Zhu, J. Jiang, Y. Wang, S. Wang, Y. He, F. He, "Additive manufacturing of dental ceramics in prosthodontics: The status quo and the future", *Journal of Prosthodontic Research*, Vol. 68, no.3,pp. 380-399, 2024.
- [٢٩]L.H. Schlichting, T.H. Resende, K.R. Reis, A.R. Dos Santos, I.C. Correa, P. Magne, "Ultrathin CAD-CAM glass-ceramic and composite resin occlusal veneers for the treatment of severe dental erosion: An up to 3-year randomized clinical trial", *The Journal of Prosthetic Dentistry*, Vol. 128, no.2,pp.120-136,2022.
- [٣٠]E. Jaber, E.S. Elsubeihi, "Influence of Vita Enamic Hybrid Ceramic with Different Thicknesses and Translucencies on the Polymerization of Light-Cured Resin Cement: An In Vitro Study", *European Journal of Dentistry*,2025.
- [٣١]M.B. Blatz, J. Conejo, A. Alammar, J. Ayub, "Current protocols for resin-bonded dental ceramics", *Dental Clinics*, Vol.66, no.4,pp. 603-625,2006.
- [٣٢]L.A. Crins, N.J. Opdam, C.M. Kreulen, B.A. Sterenborg, E.M. Bronkhorst, W.A. Fokkinga, M.-C.D. Huysmans, B.A. Loomans, "Prospective study on CAD/CAM nano-ceramic (composite) restorations in the treatment of severe tooth wear", *The Journal of Adhesive Dentistry*, Vol. 24. pp.1110-1123, 2022.
- [٣٣]J. Attal, G. Tirlet, M. LeCorre, P. Boitelle, E. Dursun, A. Benoit ,L. Valtaud, E. Caussin, P. François, "Posterior Cantilevered Single-Retainer All-Ceramic Resin-Bonded Fixed Dental Prostheses: A 12-Year Clinical Case and Proposed Clinical Recommendations", *Operative Dentistry*, Vol. 50, no.3, pp. 235-244, 2025.
- [٣٤]X. Dong, G. Wang ,S. Wang, X. Yang, D. Wen, L. Zhang, "Designing and additive manufacturing of biomimetic interpenetrating phase zirconia-resin composite dental restorations with TPMS structure", *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, Vol. 160,pp.136-150, 2024.

[٣٤]S.S. Hashemikamangar, A.M. Nahavandi, M. Daryadar, S. Valizadeh, M. Özcan, "Effect of glazing and polishing on opalescence and fluorescence of dental ceramics", *Clinical and Experimental Dental Research*, Vol. 8, no.6,pp. 1645-165, 2024.

[٣٥]Y. Yang, C. Hu, Q. Liu, J. Li, "Research progress and prospects of colored zirconia ceramics: A review", *Journal of Advanced Ceramic*, 1,2024.

[٣٦]P.M. Abd El Aziz, "Applications of Cerium Oxide Nanoparticles in Dentistry: A Review Article", *ERU Research Journal*, Vol. 4, no.2,2581-2594, 2025.

[٣٧]A.K. Lakshya, K.K. Jha, A. Chowdhury, "Stabilization of phase-pure tetragonal zirconia ceramics with minimum CeO₂ doping and associated benefits", *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 107, no.10, pp. 6791-6805, 2024.

[٣٨]C. Volpato, A. Philippi, C. Petter, M. Fredel, "Ceramic materials and color in dentistry", *intech open Access Publisher London*, UK2010.

[٣٩]T. Nakamura, S. Okamura, H. Nishida, A. Kawano, S. Tamiya, K. Wakabayashi, T. Sekino, "Fluorescence and physical properties of thulium and erbium co-doped dental zirconia", *Dental Materials Journal*, Vol. 40, no.5, 1080-1085, 2021.

[٤٠]D.A. Aloraini, H.M. Almutairi, A.S. Alzahrani, K.S. Shaaban, E.A. Wahab, "Enhancement the structural, mechanical and radiation shielding of borosilicate glasses doped vanadium ions", *Silicon*, Vol. 16, no.7,pp. 2791-2800, 2024.

[٤١]N. Nikkerdar, A. Golshah, M.S. Mobarakeh, N. Fallahnia, B. Azizie, E. Shoochanizad, "Recent progress in application of zirconium oxide in dentistry", *Journal of Medicinal and Pharmaceutical Chemistry Research*,vol. 6, pp.1042-107, 2024.

[٤٢]I. Dmitrieva, ER-DOPED GLASS-CERAMICS,2025.

[٤٣]D.-c. Li, W.-b. Liu, S.-j. Zhao, H.-s. Feng, D.-h. Yang, S.-j. Gao, "Effect of cerium oxide and erbium oxide as colorants on the chromaticity and mechanical properties of dental zirconia ceramic" ,*Chinese Journal of Tissue Engineering Research*, vol. 15, no.47, pp.10-36, 2011.

[٤٤]N. Maiti, N. Mahapatra, D. Patel, J. Chanchad, A.S. Shah, S.M. Rahaman, P. Surana, "Application of CAD-CAM in Dentistry", *Bioinformation*, vol.20, no.5, pp.547-590, 2024.

[٤٥]L. Tavares, D. Ferraz, K. Dolenkei, K. Zancopé, A.A. Silva, L. Raposo, "Variations in Microstructural, Thermal, and Mechanical Properties of Different CAD/CAM Lithium Disilicate Reinforced Glass Ceramics", *Operative Dentistry*, vol.50, no.3, pp. 333-344, 2025.

[٤٦]H.S. Dettlinger, F. Fuchs, H. Hoelzig, J. Dörschner, J.J. Choi, P. Kemmesies, E. Günther, A. Koenig, "Optical properties and microstructure of CAD/CAM silicate glass-ceramics with different levels of translucency", *Dental Materials* ,2025

[٤٧]P. Xiao, "Frontiers in ceramics" *grand challenges*, Frontiers Media SA, 2023.