

Sol-Gel ceramic nanolayers on restoratives: Adhesion, optics, and antibiofilm performance; A review article

Mohammad Reza Rahimi Ghajour^{1*}, Babak Akbari²

1- M.Sc. Student in Biomedical Engineering (Biomaterials), Department of Medical Technology and Tissue Engineering, School of Life Science Engineering, College of Interdisciplinary Science and Technologies, University of Tehran, Tehran, Iran

2- Associate Professor, Department of Medical Technology and Tissue Engineering, College of Interdisciplinary Sciences and Technology, University of Tehran, Tehran, Iran

Article Info

Article type:
Review Article

Article History:
Received: 3 Mar 2026
Accepted: 9 Jul 2026
Published: 13 Jul 2026

Corresponding Author:
Mohammad Reza Rahimi Ghajour

Department of Medical Technology and
Tissue Engineering, College of
Interdisciplinary Science and Technology,
University of Tehran, Tehran, Iran

(Email: mhmdrza.rahimi@hotmail.com)

Abstract

This review article elucidates sol-gel thin films as an engineering tool for the targeted tuning of restorative interphases within the structure-process-property-performance framework. The primary focus is placed on how low-temperature solution routes, through precursor selection, adjustment of deposition parameters, and control of condensation schedules, can lead to network organization, pore distribution, and the formation of surface functionalities; the components that play a decisive role in interfacial adhesion, light transmission, and initial microbial adhesion. In the adhesion domain, siliceous interphases generated via surface infiltration or overlapping thin coatings create silanol-rich surfaces on yttria-stabilized tetragonal zirconia, thereby enabling durable bonding with methacrylate-based systems. Concurrently, the design of zirconia-silica mixed oxides mitigates local incompatibilities and facilitates uniform primer spreading. In the optical domain, refractive index engineering is pursued through the incorporation of porous silica or nanoscale organic-inorganic networks, strategies that target antireflective behavior, preservation of surface gloss, and increased tolerance to layer thickness variations via gradient structures. In biofilm control, visible-light-responsive titania coatings exhibit effective performance under clinical illumination conditions. In contrast, the siliceous matrices or ion-doped organic-inorganic systems provide localized release of silver or zinc ions and light-independent antibacterial effects. Key challenges reported for these approaches include balancing refractive index reduction and hardness retention, improving hydrolytic stability to mitigate the risk of embrittlement, and preventing undesirable photocatalytic effects on surface color and gloss. From a clinical translation perspective, reproducibility remains dependent on defining narrow processing windows, precise monitoring of layer thickness and surface roughness, alignment with common airborne-particle abrasion and silanization workflows, and judicious adjustment of light dose. Overall, sol-gel nanolayers provide a modular engineering toolbox for selective interphase reinforcement, optical tuning, and surface bioactivation, provided that layer structure and quality control are considered as central design variables.

Keywords: Sol-Gel, Antibacterial, Antibiofilm, Dental materials

Cite this article as: Rahimi Ghajour MR, Akbari B. Sol-Gel ceramic nanolayers on restoratives: Adhesion, optics, and antibiofilm performance; A review article. J Dent Med-TUMS. 2026;39:26. [Persian]



نانو لایه‌های سرامیکی سل‌ژل بر روی مواد ترمیمی: چسبندگی، ویژگی‌های نوری و عملکرد ضد بیوفیلم؛ یک مقاله مروری

محمدرضا رحیمی قجور^{۱*}، بابک اکبری^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی پزشکی (بیومتریال)، گروه فناوری پزشکی و مهندسی بافت، دانشکده مهندسی علوم زیستی، دانشکده‌های علوم و فناوری‌های میان‌رشته‌ای، دانشگاه تهران، تهران، ایران
۲- دانشیار، گروه آموزشی فناوری پزشکی و مهندسی بافت، دانشکده مهندسی علوم زیستی، دانشکده‌های علوم و فناوری‌های میان‌رشته‌ای، دانشگاه تهران، تهران، ایران

چکیده	اطلاعات مقاله
این مقاله مروری، فیلم‌های نازک سل‌ژل را به عنوان ابزار مهندسی برای تنظیم هدفمند میان‌فازهای ترمیمی در چارچوب پیوند ساختار، فرایند، خواص و عملکرد تبیین می‌کند. تمرکز اصلی بر این موضوع قرار دارد که چگونه مسیرهای محلولی دما پایین، از طریق انتخاب پیش ماده‌ها، تنظیم پارامترهای رسوب دهی و کنترل برنامه‌های تراکم، به سازمان یابی شبکه، توزیع تخلخل و شکل‌گیری کارکردهای سطحی منجر می‌شوند. مؤلفه‌هایی که در چسبندگی بین سطحی، انتقال نور و چسبندگی اولیه میکروبی نقش تعیین‌کننده‌ای ایفا می‌کنند. در حوزه چسبندگی، میان‌فازهای سیلیکایی حاصل از نفوذ سطحی یا پوشش‌های نازک همپوش، سطوحی غنی از سیلانول بر روی زیرکونیای تترا گونال پایدار شده با ایتریا ایجاد کرده و امکان برقراری اتصال پایدار با سامانه‌های متاکریلاتی را فراهم می‌سازند، هم‌زمان، طراحی اکسیدهای ترکیبی زیرکونیاسیلیکا، ناسازگاری‌های موضعی را تعدیل کرده و انتشار یکنواخت پرایمر را تسهیل می‌کند. در حوزه نوری، مهندسی ضریب شکست از مسیر به کارگیری سیلیکای متخلخل یا شبکه‌های آلی معدنی نانومقیاس دنبال می‌شود، راهبردهایی که دستیابی به رفتار ضد بازتاب، حفظ براقیت سطح و افزایش تحمل نسبت به تغییرات ضخامت لایه را بر پایه ساختارهای گرادیانی هدف گذاری می‌کنند. در کنترل بیوفیلم، پوشش‌های تیتانیا پاسخ‌پذیر به نور مرئی در شرایط نوردهی بالینی عملکرد مؤثری نشان می‌دهند، در حالی که ماتریس‌های سیلیکایی یا سامانه‌های آلی معدنی یون‌دار، رهایش موضعی یون‌های نقره یا روی و اثرات ضد باکتریایی مستقل از نور را فراهم می‌آورند. چالش‌های کلیدی شامل ایجاد تعادل میان کاهش ضریب شکست و حفظ سختی، ارتقای پایداری هیدرولیتیکی در برابر خطر شکنندگی و پیشگیری از پیامدهای ناخواسته فوتوکاتالیز بر رنگ و براقیت سطح گزارش می‌شوند. از منظر کاربرد بالینی، باز تولید پذیری به تعریف پنجره‌های فرایندی محدود، پایش دقیق ضخامت و زبری سطح، هم‌راستایی با گردش کارهای رایج و تنظیم سنجیده دوز نور وابسته باقی می‌ماند. در مجموع، نانو لایه‌های سل‌ژل امکان تقویت انتخابی میان‌فاز، تنظیم نوری و زیست فعال سازی سطح را فراهم می‌سازند، مشروط بر آنکه ساختار لایه و کنترل کیفیت به عنوان متغیرهای محوری طراحی لحاظ شوند.	نوع مقاله: مقاله مروری دریافت: ۱۴۰۴/۱۲/۱۲ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۱۸ انتشار: ۱۴۰۵/۰۴/۲۲ نویسنده مسؤول: محمدرضا رحیمی قجور گروه آموزشی فناوری پزشکی و مهندسی بافت، دانشکده مهندسی علوم زیستی، دانشکده‌های علوم و فناوری‌های میان‌رشته‌ای، دانشگاه تهران، تهران، ایران (Email: mhmdrza.rahimi@hotmail.com)

کلید واژه‌ها: سل‌ژل، ضد باکتری، ضد بیوفیلم، مواد دندانپزشکی

مقدمه

دندانپزشکی ترمیمی در سال‌های اخیر بیش از پیش به حوزه‌ای مبتنی بر مهندسی فصل مشترک تبدیل شده است، جایی که دوام ترمیم به کیفیت برهم‌کنش آن با محیط پیرامونی در تبادل تنش، جرم و بار الکتریکی وابسته است. این برهم‌کنش باید هم‌زمان در برابر چالش‌های هیدرولیتیک و زیستی پایداری نشان دهد. در این چارچوب، نانو لایه‌های سرامیکی حاصل از فرایند سل‌ژل به عنوان بسترهایی چند کارکردی مطرح شده‌اند که امکان تنظیم چسبندگی سطحی، پاسخ‌های نوری و رفتار چسبندگی میکروبی را بر زیرلایه‌های گوناگون دندان، از زیرکونیا تا کامپوزیت‌های رزینی، فراهم می‌سازند. در مقایسه با روش‌های رسوب دهی مبتنی بر خلأ یا لعاب کاری در دماهای بالا، سل‌ژل با سنتز در دمای پایین، قابلیت تنظیم ترکیب شیمیایی و مقیاس پذیری در مسیرهای متداول پوشش دهی، گزینه‌ای کارآمد برای هندسه‌های پیچیده و مواد حساس به دما به شمار می‌رود (۱،۲).

در حوزه مواد دندان، بهره‌گیری از شیشه‌های زیست فعال حاصل از سل‌ژل و شیشه‌های، زیست فعال مزو حفره‌ای برای رمینرالیزاسیون و رهایش یون گسترش یافته است؛ رویکردی که با تکیه بر شبکه‌های محلول محور، کنترل تخلخل، شیمی سطح و برهم‌کنش‌های بین سطحی با بافت‌های دندان و سامانه‌های پلیمری را ممکن می‌سازد (۳،۴). با آن که بخش مهمی از این سامانه‌ها بر تبادل یون‌های درمانی متمرکز بوده‌اند، تمرکز این مرور بر پوشش‌های نانومتری و میان‌فازهای نفوذی حاصل از سل‌ژل است. میان‌فازهایی که با هدف ارتقای پیوند، کنترل پراکندگی نوری و محدود سازی شکل‌گیری بیوفیلم بر سطوح ترمیمی طراحی می‌شوند (۱).

فرایند سل‌ژل با هدایت پیش ماده‌های مولکولی از طریق واکنش‌های هیدرولیز و تراکم، به تشکیل شبکه‌های معدنی یا هیبریدی می‌انجامد و معمولاً با مرحله‌ای از تراکم در دمای پایین همراه است تا یکپارچگی مکانیکی و تخلخل قابل کنترل حاصل شود. ترکیب محیط واکنش، شرایط فرآوری، نحوه رشد شبکه، تجمع خوشه‌ها و سینتیک ژلاسیون را تعیین می‌کند و در نهایت ریز ساختار فیلم پس از خشک شدن و عملیات پس فرآوری را شکل می‌دهد (۲،۵). ساختار نانومقیاس لایه، شامل میزان تخلخل، آرایش پیوندهای فلزاکسیژن‌فلز و تراکم گروه‌های هیدروکسیل سطحی، نقش تعیین کننده‌ای در رفتار چسبندگی، ضریب شکست و

واکنش پذیری شیمیایی آن در شرایط پی اچ محیط دهانی دارد (۱). پس از رسوب دهی، فرایندهایی مانند تبادل حلال، پخت فرابنفش یا حرارتی و در سامانه‌های هیبریدی، درهم پیوندی آلی به کار گرفته می‌شوند تا جمع شدگی، تراکم و تنش‌های بین سطحی تنظیم شوند (۲،۶). برای دستیابی به کارکردهای زیست فعال یا کاتالیتیکی، دوپ کننده‌ها (doper) و تعدیل کننده‌های فازی در مرحله سل افزوده می‌شوند و پراکنش گونه‌های فعال را در شبکه و سطح لایه نهایی تعیین می‌کنند (۷-۹). در کاربردهای دندان، سیلیکا بستر مناسبی برای کوپلینگ سیلانی و تنظیم ویژگی‌های نوری فراهم می‌کند. تیتانیا عملکردهای فوتوکاتالیتیکی و مقاومت سایشی را تقویت می‌کند و زیرکونیا با افزایش پایداری مکانیکی و اصلاح ضریب شکست همراه است. هم افزایی این نقش‌ها در سامانه‌های هیبریدی برجسته‌تر گزارش شده است (۱۰،۱۱). شبکه‌های آلی معدنی نیز با افزایش انطباق پذیری و تحمل عیب، گرایش به ترک خوردگی را در سرامیک‌های با مدول بالا کاهش می‌دهند و برای پوشش دهی ترمیم‌های پلیمری مزیت عملکردی ایجاد می‌کنند (۲،۱۲). در زیرکونیای تترا گونال پلی کریستالی پایدار شده با ایتریا، نبود فاز شیشه‌ای امکان برقراری پیوند شیمیایی مستقیم با رزین‌ها و ادهزیوهای متاکریلاتی را محدود می‌سازد (۱۳). در چنین شرایطی، میان فازهای سیلیکایی حاصل از سل‌ژل با ایجاد لایه‌ای غنی از سیلیکا، بستر لازم برای کوپلینگ سیلانی و اتصال متاکریلاتی را فراهم می‌کنند (۱۴). شواهد موجود نشان داده‌اند که نفوذ یا اعمال پوشش‌های سیلیکایی مبتنی بر سل‌ژل، در مقایسه با روش‌های صرفاً مکانیکی نظیر سندبلاست آلومینا، می‌توانند ظرفیت مناسبی برای افزایش چقرمگی بین سطحی و بهبود اولیه دوام باند با سمان‌های رزینی فراهم کنند. با این حال، پایداری این میان فازها در شرایط پیر سازی طولانی مدت، همچنان به طور قابل توجهی به نوع پروتکل آزمون، شرایط پیر سازی و هم زمانی با سایر مداخلات کلینیکی وابسته است (۱۵-۱۷). پژوهش‌های جدیدتر نیز بر میان لایه‌های کامپوزیتی زیرکونیاسیلیکا و پروتکل‌های غوطه وری نظام‌مند تمرکز داشته‌اند راهبردهایی که با هدف بهینه سازی استحکام برشی در مقیاس میکرو و بدون آسیب به ریز ساختار زیرلایه دنبال شده‌اند (۱۸،۱۹). مرورهای نظام‌مند اخیر نیز نشان داده‌اند که راهبردهای هیبریدی مبتنی بر سیلیکا، رسوب دهی تریبوشیمیایی، بلاست آلومینا و منومرهای عاملی، در شرایط پیر سازی مصنوعی، پایداری باند

را در شرایط پیر سازی تأیید کرده‌اند، هرچند ناهمگونی پروتکل‌ها همچنان در تفسیر نتایج اثرگذار است (۲۰،۲۱). مسیرهای زیر سازی متداول هنوز برای ایجاد نگهداشت مکانیکی اهمیت دارند، اما دوام اتصال زمانی افزایش می‌یابد که این روش‌ها با شیمی مبتنی بر سیلیکا یا منومرهای عاملی همراه شوند (۲۶،۲۷).

هماهنگی نوری میان ترمیم، ادهزیو و ساختار دندان به کاهش ناپیوستگی ضریب شکست و محدود سازی پراکندگی نور وابسته است. در کامپوزیت‌ها، اختلاف ضریب شکست میان فیلرها و ماتریس پلیمری به طور مستقیم شفافیت و تطابق رنگ را تحت تأثیر قرار می‌دهد (۲۸). فیلم‌های پایدار شده سیلیکایی متخلخل با تنظیم تخلخل، ضریب شکست مؤثر را کاهش می‌دهند و در صورت تراکم مناسب، سختی لایه را حفظ می‌کنند، از این رو، مسیر طراحی کارآمدی برای کنترل بازتاب فرنل فراهم می‌آورند (۱۰،۲۲،۲۹). انتقال این منطق به زیرکونیا و سرامیک‌های نیمه شفاف می‌تواند عبور نور را بدون کاهش مقاومت سایشی بهبود دهد و تلفیق آن با شبکه‌های هیبریدی، پایداری عملکرد را تقویت کند (۱۱،۳۰). در کاربردهای عملی، حفظ جلای سطح، مقاومت در برابر رنگ پذیری و اجتناب از جابه‌جایی نامطلوب مختصات رنگی اهمیت دارد. هیبریدهای سل‌ژل با افزایش انعطاف پذیری شبکه و مقاومت در برابر ریزترک‌ها، از تشدید پراکندگی نور جلوگیری می‌کنند. همچنین ترکیب تخلخل سیلیکایی با ضریب شکست پایین و نانو دامنه‌هایی با ضریب شکست بالاتر، امکان شکل‌گیری پشته‌های گرادانی نوری را فراهم می‌سازد، رویکردی که با راهبردهای سرامیک‌های گرادانی هم‌راستا گزارش شده است (۱۱،۳۱).

ساعات اولیه پس از استقرار ترمیم در سامان یابی بیوفیلم نقش تعیین‌کننده‌ای دارد و نانو لایه‌های سل‌ژل دو مسیر اصلی، یعنی فوتوکاتالیز و رهایش کنترل شده یون، را برای مهار این فرایند فراهم می‌کنند. نانو لایه‌های تیتانیا با فاز بلوری مناسب و دوپینگ هدفمند، تولید گونه‌های فعال اکسیژن را ممکن می‌سازند، گونه‌هایی که غشا و ماتریکس پلیمری خارج سلولی را تخریب کرده و از طریق القای ابر آبدوستی سطح، چسبندگی اولیه باکتری‌ها را کاهش می‌دهند (۳۲). مرورهای تکمیلی نشان داده‌اند که فاز بلوری، نوع و میزان عیوب ساختاری و انتخاب دوپانت‌هایی مانند سریم در تنظیم کارایی کاتالیتیکی و پایداری عملکردی سطوح تیتانیومی نقش تعیین‌کننده دارند (۳۳،۳۴). نمونه‌های اصلاح شده با سریم نیز

بهبود یافته‌تری نسبت به روش‌های صرفاً مکانیکی فاقد آماده سازی شیمیایی ایجاد می‌کنند. با این حال، میزان این اثربخشی و دوام بلند مدت اتصال، به طور قابل توجهی تحت تأثیر نوع پروتکل پیر سازی، شرایط آزمون و هم افزایی میان متغیرهای فرآیندی قرار دارد (۲۰،۲۱). در زیرلایه‌های دارای سیلیکا، پوشش‌های سل‌ژل بیشتر برای مهندسی انرژی سطح، کنترل ریزبافت و بهبود همخوانی نوری به کار می‌روند. لایه‌های متخلخل یا دارای گرادیان سیلیکا با کاهش بازتاب فرنل و هموار سازی تغییرات ضریب شکست میان ترمیم و لایه ادهزیو رزینی، رفتار پایدار شده‌ای مؤثری ایجاد می‌کنند (۱۰،۲۲). در بلوک‌های پلیمری یا هیبریدی ساخته شده با سامانه‌های رایانه‌ای، پوشش‌های هیبریدی حاوی زیرکونیا برای ایجاد سطوحی شفاف، سخت و خود تمیز شونده به کار گرفته شده‌اند (۱۱). در کامپوزیت‌ها، نانو لایه‌های سیلیکایی یا هیبریدی با افزایش گروه‌های سیلانول، سیلانیزاسیون ثانویه را تقویت می‌کنند و امکان افزودن کارکردهای دوپ شده (doped) را بدون افت جلای سطح یا بروز تغییر رنگ نامطلوب فراهم می‌آورند. در لایه ادهزیو نیز شیشه‌های زیست فعال سل‌ژل و مزو حفراهی برای تقویت رمینرالیزاسیون ناحیه لایه هیبریدی به کار رفته‌اند، بی‌آنکه افت معنی داری در خواص مکانیکی گزارش شود (۴،۲۳،۲۴). در کامپوزیت‌های توده‌ای، عاملی سازی سطحی شیشه‌های زیست فعال مزو حفراهی امکان رهایش یون و بروز زیست فعالی را در کسرهایی پرکننده متناسب با کاربردهای بالینی فراهم ساخته است (۲۵).

هدف مشترک در این زیرلایه‌ها ایجاد میان فازی پیوسته و عیب پذیر است تا پایداری شیمیایی و مدول بالای سرامیک‌ها با انعطاف پذیری و سینتیک پلیمریزاسیون سامانه‌های متاکریلاتی تلفیق شود و کنترل بر برهم کنش‌های نور و ماده و چسبندگی اولیه میکروبی حفظ گردد. در فصل مشترک‌های زیرکونیا، میان لایه‌های سیلیکایی سل‌ژل از یک سو درگیری فیزیکی با ریز ناهمواری‌های سطح را تقویت می‌کنند و از سوی دیگر، از طریق سیلان‌های ارگانو فانکشنال، کوپلینگ شیمیایی پایدار با رزین‌های متاکریلاتی برقرار می‌سازند، سازوکاری که انتقال تنش را در چرخه‌های حرارتی و مکانیکی بهبود می‌دهد. مطالعات مکانیک شکست نشان داده‌اند که نفوذ یا پوشش سیلیکایی پیش از سیلانیزاسیون و سمان گذاری، چقرمگی مد یک را افزایش داده و حساسیت سامانه به تخریب هیدروترومال را کاهش می‌دهد (۱۶،۱۷). متا آنالیزها نیز کارایی این میان فازهای فعال

در شرایط کم نور، پاسخ نوری و فعالیت فوتوکاتالیتیکی بهتری نشان داده‌اند (۸). از منظر بالینی، پوشش‌های تیتانیا بر اباتمنت‌ها به ویژه در نواحی ترانس موکوزال مورد توجه قرار گرفته‌اند (۳۵). در امتداد این رویکرد، ماتریس‌های هیبریدی سل‌ژل با جای دهی یون‌های ضد باکتری یا به دام اندازی عوامل ضد میکروبی، امکان فعالیت پایدار را همراه با حفظ انسجام مکانیکی شبکه فراهم کرده‌اند. تثبیت گونه‌های یونی و نانو ذره‌ای نقره در شبکه‌های سیلیکایی و طراحی سامانه‌های رهایش کنترل شده برای آن‌ها پیش‌تر گزارش شده است (۷،۳۶). مسیرهای مبتنی بر اکسید روی و سامانه‌های بارگذاری شده با افزودنی‌های گیاهی نیز نشان داده‌اند که در صورت کنترل مقدار بارگذاری و اندازه ذرات، می‌توان مهار بیوفیلم را هم زمان با حفظ پایداری رنگ ایجاد کرد (۳۹-۳۷). در کامپوزیت‌ها و سیلانت‌ها، سامانه‌های فوتوکاتالیتیکی یا یون بارگذاری شده اثرات ضد باکتری را همراه با سازگاری مکانیکی نشان داده‌اند و همین منطق از انتقال کارکرد ضد باکتری به سطح خارجی پوشش‌های سل‌ژل حمایت می‌کند، زیرا در این حالت، اثرات جانبی ناخواسته در توده ماده کاهش می‌یابد (۴۰،۴۱). در اجزای ایمپلنتی پلیمری یا فلزی نیز پوشش‌های سل‌ژل به عنوان سامانه‌های رهایش دارو و سدهای ضد باکتری بررسی شده‌اند و قواعد طراحی قابل انتقالی برای اجزای ترمیمی مرتبط با ایمپلنت ارائه کرده‌اند (۴۲،۴۳).

با وجود این ظرفیت‌ها، چند چالش مهندسی مانع پذیرش گسترده نانو لایه‌های سل‌ژل در مواد ترمیمی باقی مانده است. پایداری هیدرولیتیک جایگاه محوری دارد، زیرا شبکه‌های سیلوکسانی دارای گروه‌های هیدروکسیل باقیمانده می‌توانند آب جذب کنند و در معرض خوردگی تنش قرار گیرند، رخدادی که شکنندگی فیلم‌های فوق نازک و تضعیف کوپلینگ بین سطحی را در چرخه‌های حرارتی تشدید می‌کند. سامانه‌های هیبریدی بخشی از این محدودیت را تعدیل می‌کنند، اما مسائلی مانند پلاستیسه شدن و کاهش پایداری رنگ را نیز پیش می‌کشند (۲۰۱۲). در پوشش‌های فوتوکاتالیتیکی تیتانیا، افزایش اثر ضد میکروبی ممکن است با خطر ناسازگاری با فازهای پلیمری مجاور همراه باشد، بنابراین تنظیم فاز بلوری، نوع و مقدار دوپانت و پاسخ نوری سامانه برای جلوگیری از تخریب ناخواسته فازهای رزینی ضرورت دارد (۴۴،۴۵). در اتصال به زیرکونیا نیز ناهمگونی پروتکل‌ها همچنان تفسیر نتایج را دشوار می‌کند. مرورهای نظام‌مند و شبکه‌ای، دوام پس از پیر سازی مصنوعی را شاخص

تعیین کننده دانسته‌اند و نشان داده‌اند که راهبردهای ترکیبی مبتنی بر شیمی سیلیکایی و منومرهای چسبنده نسبت به رویکردهای صرفاً مکانیکی عملکرد پایدارتر دارند (۲۰،۲۱). هم زمان، توسعه گلیزینگ و روش‌های تریوشیمیایی نشان می‌دهد که انتخاب راهبرد باید با نوع فرمولاسیون زیرکونیا و الزامات بالینی سازگار شود (۲۷،۴۶،۴۷). از منظر مقیاس پذیری، حساسیت سل‌ژل به رطوبت، پیرشدگی سل و شرایط اجرایی، نیاز به پنجره‌های فرایندی مشخص و پایش درون خطی را برجسته می‌سازد (۶،۴۸). کنترل ریسک‌های زیستی نیز باید بر زیست سازگاری سلولی، الگوی رهایش یون و اثرات اکولوژیک بر میکروبیوتای دهان متمرکز باشد، موضوعی که ضرورت استاندارد سازی آزمون‌ها و پروتکل‌های پیر سازی را تأیید می‌کند (۹،۴۹،۵۰).

این مرور روایتی با رویکرد مهندسی، شواهد مرتبط با نانو لایه‌های سرامیکی سل‌ژل در مواد ترمیمی دندان را گردآوری و تحلیل می‌کند و بر پیوند میان فرایند، ساختار، ویژگی‌ها و دوام عملکردی در محیط دهانی متمرکز است. مطالب در سه محور چسبندگی، ویژگی‌های نوری و عملکرد ضد بیوفیلم سامان دهی شده‌اند. در محور چسبندگی، نقش میان فازهای سل‌ژل در ایجاد اتصال شیمیایی و ارتقای چقرمگی بین سطحی بررسی می‌شود (۱۷،۲۱). در محور نوری، تنظیم شفافیت و رفتار پایدار شده همراه با دوام سطحی تبیین می‌گردد (۱۰،۲۸). در محور ضد بیوفیلم، اثر پوشش‌های فوتوکاتالیتیکی و یون‌دار بر چسبندگی اولیه و بلوغ بیوفیلم تحلیل می‌شود (۷،۳۲). هدف نهایی، ترسیم نقشه‌ای فرایند محور است که از شیمی پیش ماده‌ها آغاز می‌شود و رسوب دهی، عملیات پس فرآوری و عملکرد بین سطحی را دربر می‌گیرد. نقشه‌ای که بتواند انتخاب و بهینه سازی نانو لایه‌های سل‌ژل را برای دستیابی به ترمیم‌های پایدار، نوری سازگار و مقاوم در برابر چالش‌های بیوفیلم هدایت کند.

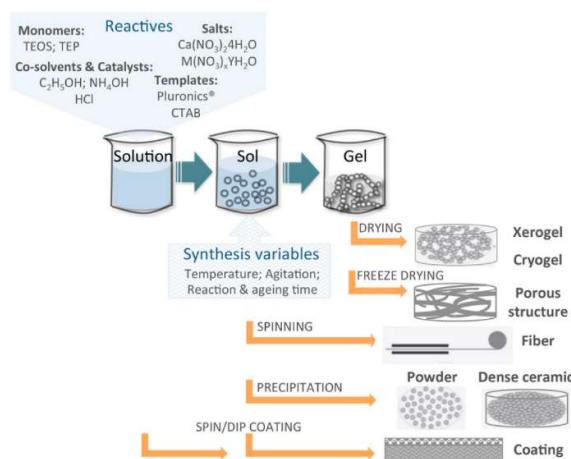
چسبندگی: طراحی میان فاز و دوام

۱- محدوده‌های فرآیندی

در این بخش، تمرکز بر پنجره‌های پارامتری واقعی به کار رفته بر روی زیرلایه‌های ترمیمی و ارتباط آن‌ها با عملکرد میان فاز قرار می‌گیرد. میان فازهای سیلیکایی مورد استفاده برای سرامیک‌های فاقد فاز شیشه‌ای و کامپوزیت‌ها، معمولاً از سل‌های مبتنی بر تترا آلکوکسی‌سیلان‌ها با منشأ مولکولی تشکیل می‌شوند. در این سامانه‌ها، هم تراکم اختیاری سیلان‌های

سطح زیرکونیا نسبت به سمان‌های رزینی دنبال شده است (۱۹). افزون بر این، سل‌های هیبریدی سیلیکونی زیرکونیایی به گونه‌ای فرآوری شده‌اند که پوسته‌هایی شفاف و مقاوم در برابر سایش بر روی سطوح پلیمری ایجاد شود. این نتایج نشان داده‌اند که ستون فقرات آلی دارای درهم پیوندی عرضی، امکان جای دهی دامنه‌های سرامیکی با ضریب شکست بالا را بدون افت چقرمگی مکانیکی فراهم می‌سازد (۱۱،۳۰).

در ارتباط با شرایط کاتالیزتی، مقدار پی اچ و محتوای آب، کاتالیز اسیدی در سامانه‌های سیلیکایی کاربرد گسترده‌تری دارد، زیرا به تشکیل الیگومرهای عمدتاً خطی منجر می‌شود که امکان ایجاد فیلم‌های نازک با مقاومت بالاتر در برابر ترک را فراهم می‌کنند. متناسب با تداخل مورد نظر، مراحل بازی ثانویه برای گسترش شبکه و تنظیم ریز ساختار به کار گرفته می‌شوند. نسبت آب به آلکوکسید نیز برای کنترل میزان پیشرفت هیدرولیز و شدت جمع شدگی شبکه تنظیم می‌شود. در مطالعات متمرکز بر پوشش یا نفوذ سیلیکا بر زیرکونیای دندان، معمولاً پایداری فرآیند بر تراکم تهاجمی اولویت داده شده است تا شفافیت نوری و پایداری فاز زیرکونیا حفظ شود (۱۶،۵۱). هنگامی که سیلان‌های ارگانو عملکردی مانند متا کریلوکسی پروپیل تری متوکسی سیلان به صورت هم تراکم وارد سامانه می‌شوند، گزینش نوع کاتالیز بر حفظ کارکرد متاکریلاتی مورد نیاز برای کوپلینگ پسینی اثر می‌گذارد (۲،۱۲). روش‌های نشان دادن نحوه مدیریت سل‌ها نقشی اساسی در عملکرد نهایی لایه ایفا می‌کنند. نمای شماتیک مراحل فرایند سل‌ژل و مسیرهای مختلف نشان دادن در شکل ۱ ارائه شده است.



شکل ۱- نمای کلی مراحل شیمیایی و مسیرهای فرآوری در فرایند سل‌ژل (۱)

ارگانودار دارای گروه‌های متاکریلاتی دنبال می‌شود تا کارکرد اتصال شیمیایی با سامانه‌های رزینی تقویت شود (۲،۱۲). در پژوهش‌های انجام شده بر روی زیرکونیای تترا گونال پلی کریستال پایدار شده با ایتریا، دو رویکرد اصلی برای ایجاد لایه‌های سیلیکایی گزارش شده است. رویکرد نخست، که در ادبیات علمی با عنوان «نفوذ سیلیکا» (silica infiltration) شناخته می‌شود، با هدف ایجاد یک میان فاز اصلاح شده در ناحیه زیر سطحی از طریق برهم‌کنش‌های شیمیایی حرارتی به کار گرفته می‌شود. با توجه به اینکه زیرکونیای کاملاً سیتتر شده دارای چگالی نزدیک به مقدار تئوری ($\leq 99\%$) بوده و عملاً فاقد تخلخل باز ساختاری است، این فرآیند را نمی‌توان صرفاً به نفوذ مکانیکی سل در امتداد مرزخانه‌ها نسبت داد. در واقع، طی تیمار حرارتی متعاقب، انحلال موضعی محدود فاز زیرکونیا در فصل مشترک، همراه با پدیده‌های نفوذی در حالت جامد، رخ می‌دهد که در نهایت به تشکیل یک میان فاز پایدار و غنی از سیلیکا در امتداد مرزخانه‌های ناحیه سطحی منجر می‌شود (۱۴،۱۶،۱۷،۵۱). در این مطالعات، نشان دادن سیلیکا بر روی زیرکونیا عمدتاً از مسیر پوشش دهی غوطه وری انجام شده است. در این فرایند، سرعت بیرون کشی به صورت کنترل شده تنظیم می‌شود. سل تا دستیابی به ویسکوزیته مناسب برای پوشش دهی تحت پیر سازی قرار می‌گیرد. سپس پخت‌های دما پایین اعمال می‌شوند تا پایداری فازی زیرکونیا پیش از لوتینگ حفظ شود (۱۶،۱۷). برای تیمار سیلیکایی سرامیک‌های پر قدرت فراتر از زیرکونیا نیز از همین مسیرهای پوشش دهی غوطه وری یا پوشش دهی چرخشی پیش از سیلانیزاسیون و باندینگ استفاده شده است (۱۵،۵۲).

نانو لایه‌های حاوی دی اکسید تیتانیوم که به واسطه کارکردهای ضد باکتری و نوری اهمیت دارند، عموماً از آلکوکسیدهای تیتانیوم مانند تترا ایزوپروپوکسید تیتانیوم منشأ می‌گیرند. در این سامانه‌ها، برنامه‌های تراکم نقش تعیین کننده‌ای در تنظیم ترکیب فازی و میزان گروه‌های هیدروکسیل ایفا می‌کنند. هنگامی که دی اکسید تیتانیوم به عنوان بخشی از یک میان لایه هیبریدی بر روی ترمیم‌های پلیمری یا اجزای اباتمنت اعمال می‌شود، این تنظیمات به صورت مستقیم بر چسبندگی نهایی سامانه اثر می‌گذارد (۵،۴۲). در امتداد این راهبرد، پیش ماده‌های دی اکسید زیرکونیوم مانند پروپوکسیدهای زیرکونیوم در کنار سیلیکا به کار گرفته شده‌اند تا میان لایه‌های کامپوزیتی زیرکونیاسیلیکا تشکیل شوند. هدف از این هم نشانی، برقراری تعادل در ضریب انبساط حرارتی و ارتقای خیس شوندگی

این فرآیند از طریق گذار محلول به سل و سپس ژل و تحت تأثیر متغیرهای سنتز مانند دما، شدت هم زدن و مدت زمان واکنش یا پیرسازی انجام می‌گیرد. پس از تشکیل ژل، مسیرهای گوناگون پس فرآوری یا نشانندن می‌توانند به محصولات متفاوتی منتهی شوند، به گونه‌ای که خشک کردن به تشکیل زروژل، کریوژل یا ساختارهای متخلخل می‌انجامد، پوشش دهی چرخشی یا غوطه وری برای ایجاد لایه‌های پوششی نازک به کار می‌رود، رسوب دهی امکان تولید پودر یا سرامیک متراکم را فراهم می‌سازد و ریسش برای ساخت الیاف مورد استفاده قرار می‌گیرد. این نمای شماتیک صرفاً نقاط ورود متغیرهای طراحی را در مسیر توسعه نانو لایه‌های سرامیکی بر روی زیرلایه‌های ترمیمی نشان می‌دهد. پوشش دهی غوطه وری به دلیل سادگی فرایند و امکان کنترل ضخامت از طریق تنظیم سرعت بیرون کشی و ویسکوزیته سل، پوشش یکنواخت بر روی کرون‌ها و دیسک‌ها را فراهم می‌سازد. پوشش دهی چرخشی عمدتاً برای نمونه‌های تخت به کار می‌رود و به ویژه در مطالعات نوری که نیازمند کنترل دقیق لایه هستند، کاربرد پیدا می‌کند. پوشش دهی پاششی نیز برای نشانندن لایه بر روی هندسه‌های پیچیده و برای کاربردهای نزدیک به شرایط بالینی در محیط درمانی مورد استفاده قرار می‌گیرد (۱۶). فرایندهای پس از رسوب گذاری دامنه‌ای گسترده را دربر می‌گیرند و بسته به نوع سامانه تغییر می‌کنند. این فرایندها از خشک کردن در دمای محیط و اعمال اتصال عرضی نوری یا حرارتی در سامانه‌های هیبریدی آغاز می‌شوند. در ادامه، تیمارهای حرارتی کم دما برای حذف باقی مانده‌های آلی و واکنشی اعمال می‌شوند، به گونه‌ای که یکپارچگی زیرلایه و پایداری ریز ساختار حفظ شود (۱۶،۱۷). خروجی‌های گزارش شده برای زیرکونیا شامل تشکیل لایه‌های سیلیکایی با ضخامت در بازه نانومتری تا زیرمیکرونی بوده است. این لایه‌ها در مقایسه با نمونه‌های بلاست شده، کاهش زبری سطحی را نشان داده‌اند. مقدار دقیق ضخامت و میزان کاهش زبری به سن سل و سرعت بیرون کشی در فرایند پوشش دهی وابسته گزارش شده است (۱۶،۱۷). بر روی زیرلایه‌های پلیمری نیز فیلم‌های هیبریدی سیلیکا و زیرکونیا شفافیت بالا و جلای پایدار را در آزمون‌های سایشی حفظ کرده‌اند. این رفتار تشکیل شبکه‌های هم بسته را در ضخامت‌های کم تأیید کرده است (۱۱،۳۰). در نهایت، شواهد موجود نشان می‌دهند که نانو لایه‌ها و میان لایه‌های

مبتنی بر سیلیکا می‌توانند از طریق تغییر ترکیب شیمیایی و ریز ساختار سطح، قابلیت اتصال زیرکونیا به رزین را بهبود دهند. در مطالعه He و همکاران (۱۹)، پوشش زیرکونیا سیلیکا با نسبت بهینه ۵:۱ بیشترین زبری سطح را ایجاد کرد ($2/13 \pm 0/15 \mu\text{m}$) و بیشترین مقدار سیلیسیم سطحی را نشان داد ($21/7 \pm 2/21 \%$). این تغییرات، در حضور عامل سیلان، با افزایش استحکام باند برشی همراه بود، به طوری که مقدار آن در بهترین گروه به $22/92 \pm 2/79 \text{ MPa}$ در شرایط اولیه و $9/91 \pm 0/92 \text{ MPa}$ پس از 5000 سیکل حرارتی رسید (۵۳). همچنین، در مطالعه Ramos و همکاران (۱۷)، میان لایه‌های سیلیکایی، به ویژه زیرکونیا نفوذ یافته با شیشه، به افزایش چقرمگی شکست بین سطحی و پایداری بهتر اتصال پس از پیرسازی کمک کردند، اگرچه در این مطالعه زاویه تماس یا انرژی سطحی به عنوان پارامتر عددی گزارش نشده بود. به منظور جمع بندی تأثیر پنجره‌های حرارتی و شرایط فرآوری بر عملکرد نهایی میان لایه‌ها و پوشش‌های سل‌ژل، جدول ۱ محدوده‌های منتخب دما و زمان تیمار حرارتی گزارش شده برای سامانه‌های سیلیکایی، تیتانیای و هیبریدهای زیرکونیا سیلیکا را به همراه برخی از خواص نوری و مکانیکی حاصل نشان می‌دهد.

۲- شیمی و ساختار بین سطح

در مقایسه میان فرآیند نفوذ شیمیایی حرارتی سیلیکا و پوشش دهی سطحی آن، در رویکرد نخست، گونه‌های سیلیکایی حاصل از هیدرولیز، از طریق برهم کنش‌های وابسته به دما و مکانیسم‌های انحلال رسوب در مقیاس اتمی، با ساختار زیر سطحی زیرکونیا تتر گونال پایدار شده با ایتریا وارد واکنش می‌شوند. با توجه به فقدان تخلخل ماکروسکوپی در زیرکونیا متراکم، این فرآیند عمدتاً به جای نفوذ فیزیکی ساده به درون شبکه، بر پایه نفوذ عناصر و تشکیل ساختارهای سیلیکاتی مشترک در امتداد مسیرهای مرزخانه‌ای سطحی شکل می‌گیرد. در نتیجه، یک میان فاز غنی از سیلیکا، شامل ترکیبات شبه سیلیکاتی پایدار، در ناحیه زیر سطحی ایجاد می‌شود که از نظر ساختاری و مکانیکی با بدنه سرامیکی یکپارچگی قابل توجهی دارد. این میان فاز همچنین قابلیت بالایی برای انجام فرآیند سیلانیزاسیون فراهم می‌آورد و در ترکیب با سمان‌های رزینی، موجب افزایش چقرمگی و استحکام بین سطحی اتصال می‌شود (۱۶،۱۷،۵۱). در مقابل، در حالت پوشش دهی، یک فیلم مجزای سیلیکا

جدول ۱- پنجره‌های منتخب فرآوری حرارتی گزارش شده برای فیلم‌ها و میان‌لایه‌های سل‌ژل مبتنی بر سیلیکا، تیتانیا و هیبریدهای زیرکونیاسیلیکا، همراه با روش نشانیدن و برخی از خواص نوری، مکانیکی و بین سطحی حاصل

نوع لایه / میان لایه	سامانه سل‌ژل و پیش ماده‌ها	روش نشانیدن / فرآوری	برنامه حرارتی	خواص حاصل / اثر گزارش شده	منابع
فیلم متخلخل SiO ₂ پایدار شده	TEOS/EtOH/HCl/H ₂ O sol + CYMEL 303LF	Spin coating	خشک کردن در ۸۰ °C به مدت ۱۵-۲۰ min سپس annealing در ۵۰۰ °C به مدت ۲ h با نرخ گرمایش ۵ °C/min	ایجاد تخلخل ناشی از تجزیه template، عبوردهی حدود ۹۱/۱٪، سختی ۱H، کاهش بازتاب و حفظ پایداری مکانیکی	(۱۰)
فیلم متخلخل SiO ₂ با ضریب شکست تنظیم شده	TEOS/MTES + Pluronic® P-۱۲۳	Dip coating	تیمار حرارتی در ۵۰۰ °C به مدت ۱۵ min یا ۱ h	عبوردهی تا ۹۹/۸٪ در ۶۰۰ nm و کاهش ضریب شکست تا حدود ۱،۲۱۵ با افزایش پایداری شدهی، اما مقاومت سایشی و سختی را کاهش داد. تیمار ۱۵ min نسبت به ۱ h پایداری سایشی بهتری نشان داد	(۵۴)
پوشش هیبریدی شفاف Silicone/ZrO ₂ sol hybrid	Silicone/ZrO ₂ sol hybrid	Coating + thermal curing	خشک کردن در دمای اتاق به مدت ۲۴ h سپس curing در ۶۰ °C به مدت ۲۴ h	عبوردهی بالاتر از ۹۸٪ برای نمونه پوشش‌داده شده روی شیشه؛ سختی ۴H-۶H، انعطاف پذیری تا قطر خمش حدود ۵ mm چسبندگی تا حدود ۲/۸۹ MPa بسته به زیرلایه آزمون	(۳۰)
پوشش هیبریدی ZrO ₂ -SiO ₂ آب گریز روی پلی کربنات	TEOS/MTES/GPTMS + ZrO ₂ sol PFTS +	Dip-lift coating	خشک کردن زیرلایه در ۸۰ °C به مدت ۱ h curing پوشش در ۹۰ °C به مدت ۲ h اصلاح سطحی و خشک کردن نهایی در ۹۰ °C به مدت ۱ h	افزایش عبوردهی PC پوشش‌داده شده تا میانگین ۹۳/۹٪ و بیشینه ۹۵/۱٪؛ زبری سطحی پایین، Ra ≈ ۱،۰۷ nm؛ زاویه تماس آب ۱۱۳°؛ پایداری آب گریزی پس از آزمون سایش	(۱۱)
میان لایه Zr/Si بر روی زیرکونیای دندانی	ZrOCl ₂ ·8H ₂ O + TEOS	Immersion coating + sintering	خشک کردن اولیه در ۱۰۰ °C؛ سپس sintering در ۱۴۵۰ °C به مدت ۲ h	تشکیل شبکه Zr-O-Si و افزایش استحکام باند رزین زیرکونیا	(۱۹)
زیرکونیای نفوذ یافته با سیلیکا	Sodium silicate-derived silica sol	Silica infiltration	خشک کردن در ۱۰۰ °C به مدت ۲ روز؛ سپس sintering در ۱۵۳۰ °C به مدت ۲ h	تشکیل میان فاز غنی از سیلیکا، تغییر رفتار سطحی و بهبود قابلیت اتصال زیرکونیا	(۱۶)
فیلم Ce-TiO ₂ با فاز آنتاز	TIP/PrOH/AcAc/HNO ₃ sol + Ce(NO ₃) ₃ ·6H ₂ O	Flow coating	خشک کردن در ۱۰۰ °C به مدت ۱ h سپس تیمار حرارتی در ۴۵۰ °C به مدت ۲ h با نرخ گرمایش ۳ °C/min	تشکیل فاز آنتاز پس از تیمار ۴۵۰ °C؛ تغییر فعالیت فوتوکاتالیستی برحسب مقدار Ce	(۸)

بر سطح سرامیک تشکیل می‌شود که تراکم بالایی از گروه‌های سیلانول را فراهم می‌آورد. این فیلم بستری مناسب برای برقراری پیوند با سیلان‌ها ایجاد می‌کند، در حالی که ریز ساختار حجمی زیرکونیا بدون تغییر باقی می‌ماند (۱۵). هر دو ساختار در نهایت بر معرفی پیوندهای سیلیسیم، اکسیژن، زیرکونیوم و سیلیسیم، اکسیژن، سیلیسیم متمرکز هستند. این پیوندها پس از سیلانیزاسیون، برای نمونه با متا کریلوکسی پروپیل تری متوکسی سیلان، امکان برقراری اتصال شیمیایی با سمان‌های مبتنی بر متاکریلات را فراهم می‌سازند.

در این میان، کوپلینگ سیلانی، به ویژه با بهره‌گیری از متاکریلات‌دار پروپیل تری متوکسی سیلان، نقش تعیین کننده‌ای ایفا می‌کند. سیلان‌های ارگانو فانکشنال پیوند واسط میان لایه معدنی و چسب آلی را

برقرار می‌کنند. این ترکیب از یک سو گروه‌های متاکریلاتی لازم برای هم پلیمریزاسیون با ماتریس‌های رزینی را فراهم می‌سازد و از سوی دیگر گروه‌های تری‌آلکوکسی سیلان را برای تراکم با گروه‌های سیلانول موجود بر سطح سل‌ژل مهیا می‌کند (۵۵). کارایی این کوپلینگ به تراکم کافی گروه‌های سیلانول و کنترل دقیق رطوبت در حین کاربرد وابسته باقی می‌ماند (۱۲، ۱۵). در شرایطی که سطح زیرکونیا فاقد سیلیکا باشد، اغلب از منومرهای عاملی مانند منومر فسفات ۱۰-MDP استفاده می‌شود. با این حال، حضور سیلیکای حاصل از فرایند سل‌ژل سطحی ایجاد می‌کند که با شیمی کلاسیک سیلان سازگاری نشان می‌دهد. این سطح در صورت نیاز، امکان ترکیب با پرایمرهای فسفات را نیز فراهم می‌سازد (۲۷، ۲۰).

میان لایه‌های کامپوزیتی حاوی زیرکونیا و سیلیکا با هدف ایجاد

شبکه‌های اکسیدی مختلط طراحی شده‌اند تا هم خیس شوندگی سطح بهبود یابد و هم احتمال بروز کرنش‌های ناشی از عدم تطابق در فصل مشترک چسب کاهش یابد. نتایج نشان داده‌اند که این فیلم‌ها در مقایسه با زیرکونیای بدون پوشش، پس از اعمال پرایمینگ استاندارد، می‌توانند استحکام باند را به طور قابل توجهی افزایش دهند، به طوری که در بهترین حالت، افزایش استحکام تا حدود دو برابر گزارش شده است (۱۹). افزون بر این، پشته‌های گرادیانی متشکل از سیلیکا با ضریب شکست پایین تا زیرکونیا با ضریب شکست بالاتر در سامانه‌های هیبریدی نوری مورد بررسی قرار گرفته‌اند. این ساختارها مسیری را برای هم زمان سازی ویژگی‌های چسبندگی و انتقال نور فراهم ساخته‌اند، به گونه‌ای که دوام سطحی نیز در این چارچوب حفظ می‌شود (۳۰،۳۱).

راهبردهای هیبریدی نیز چشم اندازی گسترده‌تر را ترسیم می‌کنند. در این رویکردها، شبکه‌های معدنی حاصل از فرایند سل‌ژل با ارگانوسیلان‌های پلیمریزاسیون پذیر یا ستون فقرات‌های سیلیکونی به صورت هم تراکم شکل می‌گیرند. این هم تراکمی تحمل ترک را افزایش می‌دهد و هم زمان جایگاه‌های مهاری بیشتری را برای سیلان‌ها و منومرهای چسبنده فراهم می‌سازد. در ترمیم‌های پلیمری، به کارگیری هیبریدهای غنی شده با زیرکونیا به تشکیل پوسته‌ای سخت و شفاف منجر می‌شود. این پوسته علاوه بر برخورداری از جایگاه‌های واکنش پذیر مناسب برای باندینگ، پتانسیل مقاومت در برابر آلودگی سطحی را نیز نشان می‌دهد. مجموعه این ویژگی‌ها بیانگر شکل گیری یک ساختار میان فازی چند کارکردی است (۲،۱۱،۳۰).

۳- عملکرد باند و روش‌ها

روش‌های آزمون استحکام باند معمولاً بر پایه اندازه گیری استحکام برشی در مقیاس میکرو، استحکام کششی در مقیاس میکرو یا استحکام برشی در مقیاس ماکرو انجام می‌شوند. در این آزمون‌ها، الگوهای شکست به سه گروه شکست چسبنده، شکست همگن و شکست مختلط طبقه بندی می‌شوند. پروتکل‌های متداول شامل به کارگیری گروه‌های کنترل بدون تیمار یا سطوح سنباده زنی شده با ذرات هستند و در صورت لزوم از پرایمرهای حاوی 10-MDP یا مراحل سیلانیزاسیون استفاده می‌شود (۱۳). ثبت شکست‌های پیش از آزمون ضروری تلقی می‌شود. این شکست‌ها بسته به طراحی مطالعه یا مقدار دهی می‌شوند که اغلب

به صورت صفر گزارش می‌شوند یا از تحلیل کنار گذاشته می‌شوند. این تصمیم‌ها بر تحلیل آماری اثر می‌گذارند. این اثرگذاری در نهایت بر تفسیر نتایج نهایی مطالعه تأثیر می‌گذارد (۲۰،۲۶).

به منظور ارزیابی دوام اتصال، معمولاً از پروتکل‌های پیر سازی مصنوعی شامل ترموسایکلینگ، نگهداری در محیط آبی و آزمون‌های خستگی مکانیکی استفاده می‌شود. مرورهای نظام‌مند نیز تأکید کرده‌اند که حفظ استحکام باند پس از پیر سازی، یکی از مهم‌ترین شاخص‌ها در مقایسه اثربخشی پیش‌تیمارهای سطحی محسوب می‌شود (۲۱،۲۶). در این راستا، راهبردهای مبتنی بر نفوذ یا پوشش سیلیکا بر سطح زیرکونیای تترا گونال پایدار شده با ایتریا نشان داده‌اند که پس از اعمال فرآیندهای پیر سازی، مقادیر استحکام باندی قابل مقایسه و در برخی پروتکل‌ها اندکی بالاتر از روش متداول بلاست آلومینا ایجاد می‌کنند. با این حال، میزان این بهبود به شرایط آزمون وابسته است. شواهد موجود نشان می‌دهد که در صورت استفاده از پروتکل‌های استاندارد کلینیکی، شامل بلاست آلومینا همراه با پرایمرهای حاوی 10-MDP، تفاوت آماری معنی داری میان این رویکردها، به ویژه پس از ترموسایکلینگ طولانی مدت، مشاهده نمی‌شود. افزون بر این، پایداری اتصال به طور قابل توجهی تحت تأثیر جزئیات پروتکل پیر سازی، از جمله نوع آزمون، مدت زمان مواجهه و شرایط محیطی قرار دارد (۱۵،۲۰،۵۱).

یافته‌های شاخص در این حوزه نشان داده‌اند که راهبردهای مبتنی بر نفوذ سیلیکا می‌توانند موجب بهبود چقرمگی بین سطحی و افزایش نسبی پایداری باند میان رزین و زیرکونیا شوند، هرچند این رفتار در شرایط چالشی نظیر پیر سازی هیدروترمال یا ترموسایکلینگ طولانی مدت، در تمامی مطالعات به صورت یکنواخت گزارش نشده است (۱۶،۱۷،۱۹). همچنین، شواهد حاصل از متآنالیزهای شبکه‌ای و مرورهای چتری، ضمن تأیید ظرفیت بالای شیمی سیلیکا در ارتقای واکنش پذیری سطحی، بیان می‌کنند که این راهبردها لزوماً برتری قطعی و تعمیم پذیری نسبت به پروتکل‌های متداول، از جمله سندبلاست همراه با پرایمرهای حاوی MDP، ارائه نمی‌دهند. در واقع، دوام و ماندگاری اتصال در سامانه‌های مبتنی بر سیلیکا تا حد زیادی به کنترل دقیق فرآیند سل‌ژل، شرایط اعمال پوشش یا نفوذ، و نیز نوع و شدت پروتکل‌های پیر سازی وابسته است. افزون بر این، ناهمگونی قابل توجه در طراحی مطالعات، شرایط آزمون و پارامترهای پیر سازی، امکان نتیجه گیری قطعی درباره برتری مطلق این

روش‌ها را محدود می‌سازد (۲۰، ۲۱، ۵۶).

در این مطالعات، گروه‌های کنترل و روش‌های مقایسه گر نقش تعیین کننده‌ای ایفا می‌کنند. پوشش سیلیکا به روش تریبوشیمیایی و بلاست آلومینا همچنان به عنوان مقایسه گرهای متداول به کار گرفته می‌شوند. در روش تریبوشیمیایی، سیلیکا از طریق ضربه ذرات پرنانری به درون سطح وارد می‌شود. در مقابل، بلاست آلومینا بدون اتکا به شیمی سیلیکا، صرفاً با ایجاد زبری و نگهداشت مکانیکی عمل می‌کند. مرورهای منتشر شده نشان داده‌اند که روش‌های تریبوشیمیایی عملکرد قابل قبولی ارائه می‌دهند. با این حال، مسیرهای مبتنی بر فرایند سل‌ژل این مزیت را فراهم می‌سازند که ترکیب و ساختار پوشش‌ها به صورت دقیق کنترل شود. این مسیرها همچنین امکان ایجاد ساختارهای گرادیانی را مهیا

می‌کنند. چنین قابلیت‌هایی در برخی شرایط به بهبود رفتار باند پس از فرایندهای پیر سازی منجر می‌شود (۲۷، ۵۷). جدول ۲ مسیرهای فرایند سل‌ژل، انواع زیرلایه‌ها، شیمی میان لایه، روش‌های آزمون مکانیکی، برنامه‌های پیر سازی و نتایج اصلی مطرح‌شده در این بخش را به صورت یکپارچه جمع بندی می‌کند.

۴- دوام و سازوکارهای شکست

تخریب هیدرولیتیک و بروز پدیده پلاستیس شدن از چالش‌های مهم در لایه‌های سل‌ژل به شمار می‌آیند. در فیلم‌های فوق نازک، باقی ماندن مقادیر قابل توجهی از گروه‌های سیلانول (Si-OH) و ناکامل بودن تراکم شبکه می‌تواند جذب آب را افزایش دهد که این امر به نوبه خود

جدول ۲- خلاصه مطالعات چسبندگی با استفاده از مسیرهای سل‌ژل بر روی زیرلایه‌های ترمیمی

مسیر	زیرلایه	میان لایه یا شیمی	آزمون و پیر سازی	پارامترها و خروجی‌های عددی گزارش شده	نتیجه نسبت به کنترل	منابع
نفوذ سیلیکا با غوطه وری، با روش سل‌ژل	زیر کونپای تترا گونال پایدار شده با ایتیریا	زیر سطح غنی از سیلیکا با قابلیت سیلانیزاسیون	آزمون چقرمگی بین سطحی یا استحکام باند؛ ترموسایکلینگ و/یا ماندگاری در آب	۲۰×۲ دقیقه غوطه وری؛ ۴۰۰۰ TC؛ در ۲۰×۲۰ Ramos، بیشترین SBS پس از پیر سازی: ۵/۷۷ MPa	بهبود وابسته به پروتکل؛ در ۲۰×۱۹ Ramos نیاز به همگن سازی نفوذ گزارش شد، و در ۲۰×۲۰ Ramos بهترین نتیجه پس از پیر سازی برای نفوذ سریع سه مرحله‌ای گزارش شد	(۱۷، ۵۱)
نفوذ سیلیکا با غوطه وری، با روش سل‌ژل	زیر کونپای تترا گونال پایدار شده با ایتیریا	فیلم همساز دی اکسید سیلیسیم به همراه سیلان	آزمون استحکام برشی در مقیاس میکرو؛ پیر سازی مصنوعی در صورت اعمال	زمان رسوب دهی ۲۴-۱۴۱ ساعت؛ ۶۰۰۰ TC؛ بیشترین SBS سل‌ژل: ۷/۹۷±۳/۷۲ MPa خشک و ۲/۳۳±۰/۷۹ MPa پس از TC	استحکام باند با افزایش زمان رسوب دهی بیشتر شد، اما در همان مطالعه از سندبلاست کمتر بود	(۱۵)
پوشش کامپوزیتی زیر کونپاسیلیکا	زیر کونپای تترا گونال پایدار شده با ایتیریا	شبکه اکسیدی مختلط زیر کونپاسیلیکا	آزمون استحکام برشی در مقیاس میکرو؛ پیرایمینگ استاندارد؛ ماندگاری پس از پخت	نسبت بهینه $Zr/Si=0.5/1$ زبری $Zr/Si=0.5/1$ ؛ ۲/۱۳±۰/۱۵ SBS با سیلان؛ ۲۲/۹۲±۲/۷۹ MPa اولیه و ۹/۹۱±۰/۹۲ MPa پس از TC ۵۰۰۰	افزایش استحکام باند نسبت به زیر کونپای بدون پوشش	(۱۹)
پوشش سیلیکا	آلومینای شیشه نفوذ	لایه دی اکسید سیلیسیم برای امکان سیلانیزاسیون	آزمون استحکام برشی در مقیاس ماکرو؛ پیر سازی طبق گزارش	پس از پیر سازی: کنترل ۱/۵۹۴±۰/۱۱۱ MPa؛ سیلان ۲/۱۲۰±۰/۳۳۹ MPa سل‌ژل+سیلان ۲/۰±۹۵۵/۱۱۳ MPa	افزایش استحکام باند نسبت به بدون تیمار؛ بازیابی واکنش پذیری سیلان	(۵۲)
نفوذ سیلیکا با فرآیند کنترل شده	زیر کونپای تترا گونال پایدار شده با ایتیریا	سیلیکای سل‌ژل با برنامه زمان بندی تنظیم شده	آزمون‌های استحکام برشی یا کششی در مقیاس میکرو؛ پیر سازی	۲۰۲۵ Lara-Hernández: میانگین SBS سیلیکا پوشش ۱۵ MPa بدون TC و ۱۱/۹۷ MPa پس از TC؛ کنترل: ۶/۴۱ و ۸/۴۵ MPa	بهبود نسبت به کنترل بدون تیمار و افت کمتر پس از پیر سازی؛ اما با ناهمگونی پروتکل‌ها	(۲۰، ۲۱)
پوشش سیلیکا تریبوشیمیایی یا بلاست آلومینا (گروه مقایسه)	زیر کونپای تترا گونال پایدار شده با ایتیریا	سیلیکای ضربه نشسته یا زیر سازی مکانیکی	آزمون‌های استحکام باند؛ ترموسایکلینگ یا ماندگاری در آب	۲۰۲۴ Lima پس از پیر سازی، ۲۲ مطالعه برتری تریبوشیمیایی/سیلان و ۱۷ مطالعه نبود تفاوت معنی دار را گزارش کردند	عملکرد متغیر؛ روش‌های مکانیکی در ترکیب با سیلیکا یا پرایمرها بهبود می‌یابند	(۲۶، ۲۷)
پوشش سیلیکا پیش از سیلانیزاسیون	زیر کونپای تترا گونال پایدار شده با ایتیریا	فیلم دی اکسید سیلیسیم	آزمون استحکام برشی؛ پیر سازی طبق گزارش	رسوب دهی ۲۴-۱۴۱ ساعت؛ Si سطحی در گروه‌های سل‌ژل: ۹/۰-۴۱/۰٪ اتمی؛ همه گروه‌ها پس از پوشش دهی سیلانیزه شدند	ایجاد سطح سیلیکادار برای سیلانیزاسیون؛ اثر باند به زمان رسوب دهی وابسته بود	(۱۵)

بر ریز ساختار و در نهایت رفتار مکانیکی لایه تأثیرگذار است. در این راستا، نشان داده شده است که پارامترهایی نظیر نسبت آب به پیش ماده و درجه تراکم شبکه، نقش تعیین کننده‌ای در فرایندهای هیدرولیز و تراکم و در نتیجه خواص مکانیکی پوشش دارند (۱۲). همچنین، به کارگیری فیلم‌های هیبریدی اگرچه می‌تواند به کاهش رفتار شکننده کمک کند، اما در صورت افزایش سهم فاز آلی، این سامانه‌ها ممکن است در حضور حلال‌ها مستعد پلاستیسه شدن باقی بمانند، به طوری که افزایش جزء آلی با کاهش پایداری حرارتی همراه بوده و برای مثال، با افزایش درصد فاز آلی، دمای آغاز تخریب از حدود ۲۹۹ به ۲۷۴ درجه سانتی گراد کاهش یافته است (۲). در سوی رزینی فصل مشترک نیز جذب آب و تورم ناشی از آن می‌تواند الگوی توزیع تنش را در طول فرایندهای پیر سازی تغییر دهد و پایداری اتصال را تحت تأثیر قرار دهد. در زمینه رقابت پرایمرها و سازگاری شیمیایی، ترکیب میان فازهای سیلیکایی با پرایمرهای فسفات‌مانند ۱۰-MDP همواره با چالش‌هایی همراه بوده است. در چنین شرایطی، مداخلات رقابتی و وابستگی‌های متغیر پرایمرها ممکن است به نتایج ناهمخوان منجر شوند، مگر آنکه توالی کاربرد مراحل به صورت دقیق و استاندارد تعریف شود. مرورهای نظام‌مند نیز نشان داده‌اند که ناهمگونی پروتکل‌ها به عنوان یکی از عوامل مداخله‌گر کلیدی در این حوزه عمل می‌کند (۲۰، ۲۱). افزون بر این، تازگی سیلان، نوع حلال انتخابی و کنترل دقیق رطوبت از جمله متغیرهای عملی مهمی به شمار می‌روند که کارایی فرایند کوپلینگ را تعیین می‌کنند (۱۵). از سوی دیگر، تنش‌های پسماند و ریز عیوب ایجاد شده در ساختار نانولایه نیز اهمیت قابل توجهی دارند. جمع شدگی ناشی از فرایند خشک کردن و عدم تطابق ضریب انبساط حرارتی میان نانولایه و زیرلایه به ایجاد تنش‌های پسماند منجر می‌شود. در شرایطی که تراکم به صورت بیش از حد تهاجمی اعمال شود، احتمال شکل گیری ریز ترک‌ها افزایش می‌یابد. این ریز ترک‌ها می‌توانند به عنوان هسته‌های آغازین شکست چسبنده عمل کنند. چنین نواقصی برای پشته‌های تنظیم شده نوری نیز مسئله ساز باقی می‌مانند و با افزایش پراکندگی نور همراه می‌شوند. در این چارچوب، به کارگیری ستون فقرات‌های هیبریدی و ترکیب‌های گرادینانی مفید گزارش شده است. این راهبردها با کاهش تمرکز تنش، ارتباط مستقیمی با حفظ بهتر مقاومت سایشی و

پایداری جلای سطحی نشان داده‌اند (۳۰، ۳۱). در نهایت، الگوهای شکست هدایت شده توسط فرایندهای پیر سازی نیز مورد توجه قرار گرفته‌اند. پس از اعمال ترموسایکلینگ یا نگهداشت طولانی مدت در آب، در سطوحی که تراکم لایه ناکافی بوده یا پرایمینگ به صورت ضعیف انجام شده است، الگوهای شکست عمدتاً به سمت حالت‌های چسبنده یا مختلط در ناحیه میان فاز گرایش پیدا می‌کنند (۵۳). در مقابل، نفوذ سیلیکا که به ایجاد یکپارچگی ساختاری در ناحیه زیر سطحی زیرکونیا منجر می‌شود، با الگوهای شکست پایدارتر همراه گزارش شده است (۵۸). این پایداری با مقادیر بالاتر چقرمگی اندازه گیری شده هم‌خوانی نشان می‌دهد (۱۷، ۵۱).

در جمع بندی نتایج مطالعات، به کارگیری سیلیکا به روش سل‌ژل، چه به صورت نفوذ در ناحیه زیر سطحی و چه به صورت پوشش نازک بر سطح زیرکونیای پایدار شده با ایتریا، ظرفیت مناسبی برای ایجاد جایگاه‌های فعال اتصال شیمیایی فراهم می‌کند. با این حال، این راهبردها لزوماً در تمامی شرایط پیر سازی طولانی مدت، منجر به استحکام باند بالاتر نسبت به روش‌های متداول زبر سازی مکانیکی نمی‌شوند (۲۰، ۵۱). همچنین، میان لایه‌های هیبریدی مبتنی بر زیرکونیاسیلیکا، به دلیل بهبود خیس شونده‌گی و افزایش واکنش پذیری سطحی، به عنوان گزینه‌ای کارآمد مطرح شده‌اند (۱۹). با این حال، ادعاهای مرتبط با «دوام برتر» این سامانه‌ها باید با احتیاط تفسیر شود، زیرا در بسیاری از مطالعات، عملکردی مشابه با پروتکل استاندارد شامل بلاست آلومینا و پرایمرهای حاوی MDP گزارش شده است. از این رو، دستیابی به بهبودهای پایدار در این سامانه‌ها به کنترل دقیق پارامترهای فرآیند، از جمله شرایط سل‌ژل، توالی کاربرد پرایمرها و نحوه مدیریت شکست‌های پیش از آزمون وابسته است. افزون بر این، ناهمگونی قابل توجه میان طراحی مطالعات و پروتکل‌های آزمون، بخش عمده‌ای از پراکندگی نتایج گزارش شده را توضیح می‌دهد (۲۱، ۲۶). با وجود این محدودیت‌ها، در شرایطی که الزامات هم زمانی نظیر محدودیت‌های نوری یا ملاحظات مرتبط با سایش مطرح باشد، شبکه‌های هیبریدی سل‌ژل همچنان می‌توانند به عنوان گزینه‌ای جایگزین با چقرمگی و سازگاری عملکردی مناسب مورد توجه قرار گیرند (۲۰، ۳۰).

ویژگی‌های نوری: تطبیق ضریب شکست، کنترل پراکندگی و پایداری رنگ

۱- راهبردهای مهندسی ضریب شکست

یکی از رویکردهای کلیدی در بهینه سازی ویژگی‌های نوری فیلم‌های سل‌ژل، بهره گیری از سیلیکا با ضریب شکست پایین از طریق کنترل هدفمند تخلخل دنبال می‌شود. با تنظیم دقیق میزان تخلخل در ساختار سیلیکا، ضریب شکست مؤثر به شرایط نوری زیرلایه‌های دندان و محیط اطراف نزدیک می‌شود (۵۴). این هم‌ترازی نوری، همراه با تنظیم ضخامت فیلم در محدوده بهینه حدود ۱۰۰ نانومتر، منجر به کاهش بازتاب فرنل و افزایش عبوردهی نوری می‌شود. در این راستا، گزارش شده است که فیلم‌های متخلخل SiO_2 با طراحی بهینه قادر به دستیابی به عبوردهی حدود ۹۱/۱۰٪ و افزایش عبوردهی خورشیدی تا ۳/۲۴٪ در بازه ۳۸۰-۱۱۰۰ nm هستند. رفتار پایدار شده در این فیلم‌ها به ضخامت لایه و کسر حجمی حفرات وابسته باقی می‌ماند و هنگامی که تراکم دهی به گونه‌ای انجام شود که بخشی از تخلخل‌های عملکردی حفظ شوند، تعادل مناسبی بین خواص نوری و پایداری مکانیکی برقرار می‌شود، به طوری که فیلم حاصل علاوه بر عملکرد نوری مطلوب، دارای سختی در حد H نیز گزارش شده است (۱۰، ۵۴). همان گونه که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، تغییر در برنامه‌های تراکم دهی و تیمار حرارتی می‌تواند به صورت مستقیم بر تخلخل، ضریب شکست مؤثر، سختی و عبوردهی نوری فیلم‌های سل‌ژل اثر بگذارد. هرچند بسیاری از این مفاهیم در ابتدا در حوزه‌های نوری و انرژی شکل گرفته‌اند، منطق فرایندی آن‌ها بر پایه تنظیم ضریب شکست از طریق کنترل تخلخل و پدیده‌های تداخلی وابسته به ضخامت بنا شده است. این منطق به خوبی به فیلم‌های نازک دندانی انتقال یافته است. بر همین اساس، این رویکردها در سطوح ترمیمی غنی از سیلیکا به کار گرفته شده‌اند و امکان بهبود رفتار نوری بدون ایجاد اختلال در سایر ویژگی‌های عملکردی را فراهم کرده‌اند (۱۰). در کنار این رویکرد، به کارگیری شبکه‌های هیبریدی حاوی اکسیدهای با ضریب شکست بالا، مانند زیرکونیا، می‌تواند به بهبود هم زمان شفافیت نوری و پایداری مکانیکی پوشش کمک کند. افزودن زیرکونیا به ماتریس‌های سیلیکایی یا سیلوکسانی، از طریق تشکیل پیوندهای Zr-O-Si و افزایش سهم ساختارهای اکسیدی سخت، موجب بهبود استحکام و پایداری پوشش می‌شود، در حالی که شفافیت نوری

تا حد زیادی حفظ می‌گردد. در مطالعه Zhang و همکاران (۱۱)، پوشش هیبریدی زیرکونیاسیلیکا روی پلی کربنات، میانگین عبوردهی نوری را در بازه ۴۰۰-۸۰۰ nm به ۹۳/۹٪ و بیشینه عبوردهی را در ۷۰۰ nm به ۹۵/۱٪ رساند، در حالی که بیشینه عبوردهی پلی کربنات بدون پوشش ۹۰٪ گزارش شد. همچنین سطح پوشش بسیار هموار بود و مقادیر زبری $Ra=1/07$ nm و $Rq=1/66$ nm برای آن به دست آمد. پس از اصلاح سطحی با PFTS، زاویه تماس آب به ۱۱۳ درجه افزایش یافت و پوشش حتی پس از ۲۰ چرخه سایش با سنباده، زاویه تماس بالاتر از ۱۰۰ درجه را حفظ کرد. در سامانه‌ای متفاوت، Sun و همکاران (۳۰) یک پوشش هیبریدی زیرکونیاسیلیکا حاوی KH 832 ، TEOS و تلومر آمفی فیلک را گزارش کردند که در آزمون عبوردهی روی زیرلایه شیشه‌ای، عبوردهی بالاتر از ۹۸٪ نشان داد. این پوشش همچنین سختی ۴ تا ۶H، انعطاف پذیری با قطر خمش حدود ۵ mm و چسبندگی تا حدود $2/89$ MPa را، بسته به نوع آزمون و زیرلایه، نشان داد. بنابراین، این مطالعه به عنوان شاهی برای امکان حفظ شفافیت بالا در برخی شبکه‌های هیبریدی حاوی زیرکونیا قابل استناد است، اما عدد ۹۸٪ مستقیماً به پوشش $\text{ZrO}_2\text{-SiO}_2$ روی پلی کربنات تعمیم داده نمی‌شود (۱۱، ۳۰). بر پایه همین منطق، در حوزه دندانپزشکی نیز سرمایه‌های گرادانی طراحی شده‌اند تا ناهماهنگی‌های نوری و مکانیکی در ساختارهای چندلایه را به صورت یکپارچه هم ساز کنند (۳۱). عامل دیگری که بر کارایی پایدار شده اثر می‌گذارد، تداخل وابسته به ضخامت و کنترل رنگ محسوب می‌شود. در طراحی کلاسیک پوشش‌های پایدار شده، ضخامت معادل یک چهارم طول موج به عنوان معیار بهینه در نظر گرفته می‌شود (۱۰). با این حال، در کاربردهای دندانی به دلیل انحنای پیچیده سطوح ترمیمی و حضور تابش با طول‌موج‌های متعدد، دستیابی به کنترل دقیق پدیده تداخل با محدودیت مواجه می‌شود. از این رو، به کارگیری پوشش‌های پایدار شده پهن باند که بر پایه سیلیکای با تخلخل تنظیم شده و ضخامت میانگین طراحی می‌شوند، جذابیت عملی بیشتری پیدا می‌کند. افزون بر این، پشته‌های هیبریدی با گرادان توزیع ضریب شکست، حساسیت سامانه را نسبت به خطاهای جزئی در ضخامت کاهش می‌دهند (۲۹). این پشته‌ها با حذف مرزهای تیز و جایگزینی آن‌ها با تغییرات تدریجی، پنجره فرایندی گسترده‌تری را فراهم می‌سازند (۱۰، ۳۰).

۲- سنجه‌ها و پروتکل‌ها

ارزیابی شفافیت و رنگ در مواد ترمیمی دندان معمولاً بر پایه شاخص‌های شفافیت مانند TP یا TP00 انجام می‌شود. تغییرات رنگ نیز با استفاده از فضای رنگی CIE Lab و آستانه‌های ΔE یا $\Delta E00$ برای قابلیت ادراک و قابلیت پذیرش به صورت کمی بیان می‌شود (۵۹). افزون بر این، آزمون‌های نوری شامل اندازه‌گیری هیز، عبور کل و عبور مستقیم نور و نیز جلای سطح انجام می‌شوند. این سنجش‌ها با هدف پایش میزان پراکندگی نور و کیفیت نهایی سطح ترمیم به کار گرفته می‌شوند (۲۸،۳۰). در کامپوزیت‌ها، عامل اصلی تعیین‌کننده شفافیت به عدم تطابق ضریب شکست میان فیلر و ماتریس پلیمری وابسته است. بر این اساس، به کارگیری نانو لایه‌های خارجی که بازتاب سطحی را کاهش می‌دهند و ریزبافت سطح را هموار می‌سازند، به بهبود معنی‌دار در هم آمیزی بصری منجر می‌شود. این بهبود بدون نیاز به تغییر در شیمی فیلر توده‌ای حاصل می‌شود (۲۸).

در ارتباط با شرایط آزمون، هنگام ارزیابی هیبریدهای نوری، آزمون‌هایی مانند سایش یا شبیه‌سازی مسواک‌زدن، غوطه‌وری در محلول‌های رنگ‌زا و مواجهه با تابش فرابنفش یا حرارت به طور متداول برای بررسی دوام انجام می‌شوند. به عنوان نمونه، پوشش‌های شفاف هیبریدی مبتنی بر سیلیکون و زیرکونیا که به روش سل‌ژل تهیه شده‌اند، پس از انجام آزمون‌های سایشی، حفظ شفافیت و جلای سطحی را نشان داده‌اند. این پوشش‌ها هم زمان ویژگی‌های ضدآلودگی سطحی و پایداری مکانیکی قابل توجهی بروز داده‌اند. مجموعه این نتایج تاب‌آوری عملی

این پوشش‌ها را در شرایط شبیه‌سازی‌شده بالینی تأیید می‌کند (۳۰). همچنین فیلم‌های متخلخل سیلیکا با عملکرد پایدار شده که برای کاربردهای نیازمند عبوردهی نوری بالا توسعه یافته‌اند، نشان داده‌اند که ریز ساختارهای خود قالب‌گیر چگونه امکان تأمین هم زمان عبوردهی مناسب نور و سختی مکانیکی را فراهم می‌کنند. این ویژگی‌ها به طور مستقیم با الزامات کاربردهای نوری در دندانپزشکی ارتباط برقرار می‌کنند (۱۰). جدول ۳ راهبردهای مهندسی نوری را همراه با بازه‌های متداول ضخامت و شرایط آزمون مرتبط با آن‌ها شامل شاخص‌های شفافیت، تغییرات رنگ، میزان هیز، عبور نور و جلای سطح یکپارچه‌سازی می‌کند و در مواردی که داده‌ها در دسترس بوده‌اند، ملاحظات مربوط به دوام عملکردی را نیز گزارش می‌دهد.

۳- کوپلینگ نوری مکانیکی

رابطه میان شفافیت و سختی در فیلم‌های سل‌ژل همواره به عنوان یک چالش مهندسی مطرح بوده است. افزایش میزان تخلخل اگرچه به کاهش ضریب شکست و در نتیجه بهبود شفافیت منجر می‌شود، اما هم زمان می‌تواند سختی فیلم را کاهش داده و حساسیت آن را نسبت به تشکیل ریز ترک‌ها افزایش دهد. در مقابل، واردسازی دامنه‌های سرامیکی مانند زیرکونیا یا تیتانیا موجب افزایش سختی و مقاومت سایشی می‌شود، اما این اقدام ضریب شکست را بالا می‌برد و در صورت توزیع غیریکنواخت دامنه‌ها، پراکندگی نور را تشدید می‌کند. شواهد نشان می‌دهد که در ماتریس‌های هیبریدی، مانند ترکیب‌های سیلیکونی همراه

جدول ۳- راهبردهای مهندسی نوری و نکات دوام برای نانو لایه‌های سل‌ژل

منابع	نکات دوام	سنجه‌های نوری	ضخامت نمایه*	راهبرد ضریب شکست
(۱۰)	تراکم دهی به گونه‌ای که سختی حفظ شود؛ توجه به مقاومت سایشی	کاهش بازتاب سطحی؛ حفظ عبوردهی نور و سختی؛ رهگیری شفافیت ادراکی و کدورت در صورت گزارش	نانومتري تا در مقیاس میکرو	فیلم پایدار شده سیلیکا با تخلخل تنظیم شده
(۳۰)	آزمون‌های سایش، حفظ جلا و دوام مکانیکی را نشان داده‌اند	شفافیت بالا و حفظ جلا؛ رفتار ضد فولینگ	نازک، اتصال عرضی شده	پوسته شفاف هیبرید سیلیکون/زیرکونیا
(۱۱)	مقاومت در برابر خراش و پایداری نوری گزارش شده است	خود تمیز شوندگی همراه با شفافیت بالا	نازک و یکنواخت	هیبرید غنی از زیرکونیا بر بستر پلیمری
(۳۱)	هم راستا با روش‌های سرامیک گرادینانی برای مدیریت هم زمان گرادینان‌های نوری و مکانیکی	هموار سازی ضریب شکست؛ کاهش پراکندگی نور	لایه‌لایه یا گرادینانی	پشته‌های سرامیکی گرادینانی
(۲۸)	پوسته پایدار شده بیرونی می‌تواند همسان‌سازی ادراکی رنگ را تقویت کند	تطابق ضریب شکست فیلر و ماتریس بر شفافیت و تغییر رنگ اثرگذار است	-	تنظیم شفافیت کامپوزیت در بافت حجمی

*مقادیر دقیق ضخامت تنها در تحلیل‌های کمی و مستقیماً بر اساس مطالعه نوری مربوطه استخراج شوند.

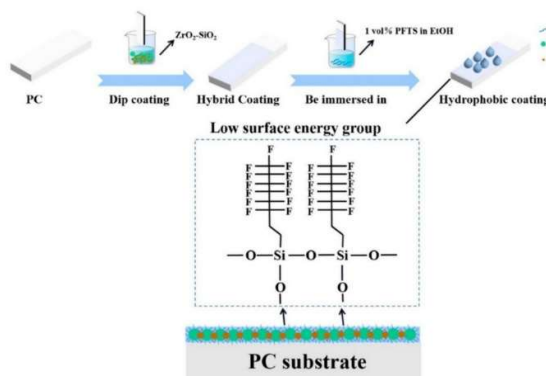
کیفیت نوری ایفا می‌کنند. این ساختارها با جلوگیری از تمرکز تنش و محدود سازی ایجاد نواحی آسیب پذیر، از افت شفافیت ناشی از آسیب‌های سطحی پیشگیری می‌کنند (۳۱).

با وجود این مزایا، پایداری بین سطحی پوشش‌های سل‌ژل هیبریدی روی زیرلایه‌های پلیمری یا رزینی باید به عنوان یک محدودیت مستقل در نظر گرفته شود. در سامانه‌های پوشش و زیرلایه، تفاوت در ضریب انبساط حرارتی و مدول الاستیک میان بستر پلیمری و شبکه‌های اکسیدی یا هیبریدی غنی از سیلیکا و زیرکونیا می‌تواند طی چرخه‌های حرارتی، تنش‌های کششی و برشی در فصل مشترک ایجاد کند و زمینه رشد ریز ترک یا جداسازی موضعی پوشش را فراهم سازد (۶۰، ۶۱). بنابراین، چسبندگی اولیه یا نتایج حاصل از آزمون‌های استاتیک، به تنهایی، برای پیش بینی پایداری بلند مدت در محیط دهان کافی نیستند. هرچند در برخی پوشش‌های هیبریدی حاوی زیرکونیا چسبندگی مناسبی، مانند حدود $2/89 \text{ MPa}$ ، گزارش شده است، این مقادیر عمدتاً در شرایط آزمون محدود و بدون ترموسایکلینگ دهانی به دست آمده‌اند (۳۰). از این رو، ارزیابی چسبندگی پس از ترموسایکلینگ طولانی مدت، ماندگاری در محیط مرطوب و در صورت امکان بارگذاری مکانیکی چرخه‌ای برای قضاوت درباره دوام بالینی این پوشش‌ها ضروری است (۶۲).

۴- پیر سازی و رنگ پذیری

رنگ پذیری ناشی از نوشیدنی‌ها و مواجهه با تابش فرابنفش از محورهای کلیدی در ارزیابی دوام نوری مواد ترمیمی به شمار می‌آیند (۵۹). پروتکل‌های متداول برای بررسی رنگ پذیری معمولاً شامل غوطه وری نمونه‌ها در محلول‌هایی مانند قهوه یا چای هستند و در برخی طرح‌ها این شرایط با تابش فرابنفش یا اعمال حرارت همراه می‌شوند. نتایج مطالعات نشان داده‌اند که پوشش‌های هیبریدی شفاف پس از اعمال این چالش‌ها توان حفظ جلای سطحی را نشان داده‌اند و رفتار ضد فولینگ تقویت شده‌ای را بروز داده‌اند. این رفتار نشان می‌دهد که شبکه‌های آلی معدنی با انرژی سطحی تنظیم شده جذب آلودگی‌های رنگ‌زا را کاهش می‌دهند و در نتیجه فرایند تمیز سازی سطح را تسهیل می‌کنند (۳۰، ۶۳). در کامپوزیت‌ها، ایجاد توازن میان شفافیت حاصل از تنظیم ضریب شکست و مقاومت در برابر رنگ پذیری به عنوان یک مسئله ماده ویژه مطرح می‌شود. در این چارچوب، به کارگیری پوسته‌های پایدار شده بیرونی که انرژی سطحی را اصلاح می‌کنند، بدون

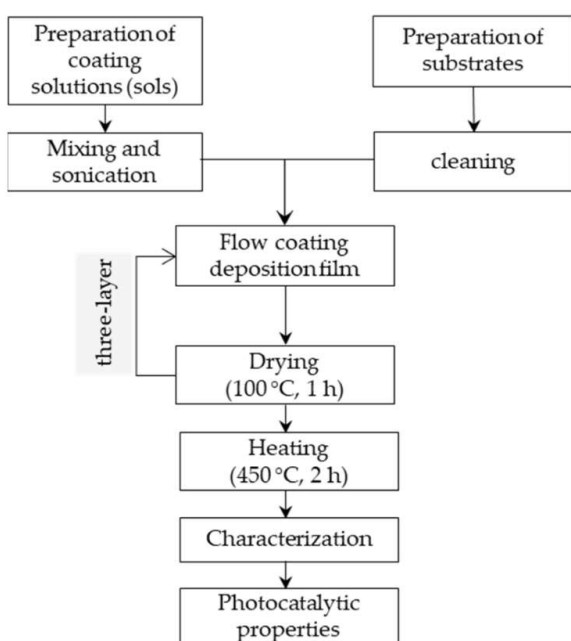
با زیرکونیا، دستیابی هم زمان به شفافیت نوری و دوام مکانیکی امکان پذیر باقی می‌ماند، مشروط بر آنکه دامنه‌های سرامیکی در مقیاس نانو و با توزیع یکنواخت در ساختار تثبیت شوند (۱۱، ۲۹، ۳۰). یک شماتیک از فرایند سل‌ژل هیبریدی مبتنی بر زیرکونیا و سیلیکا، به همراه لایه نهایی کپ از جنس سیلان‌های پرفلوروآلکیل با انرژی سطحی پایین و مدل متناظر فصل مشترک، در شکل ۲ ارائه شده است.



شکل ۲- شماتیک پوشش سل‌ژل هیبریدی زیرکونیا/سیلیکا همراه با لایه نهایی با انرژی سطحی پایین (۱۱)

جریان فرایند با غوطه وری زیرلایه پلیمری در سل حاوی زیرکونیا و سیلیکا آغاز می‌شود و به تشکیل یک لایه هیبریدی می‌انجامد. در ادامه، نمونه در محلول یک درصد حجمی پرفلوروآلکیل سیلان در اتانول غوطه ور می‌گردد و در نهایت یک پوشش آب گریز بر سطح شکل می‌گیرد. طرح بین سطحی بیانگر حضور گروه‌های با انرژی سطحی پایین، شامل زنجیره‌های فلئوئوردار متصل به شبکه سیلوکسانی، است که آب گریزی سطح و پایداری جلای آن را تأمین می‌کنند. در ارتباط با خراش پذیری و حفظ جلای سطحی باید توجه داشت که ریز ترک‌های سطحی و آثار شیار به عنوان کانون‌های مؤثر پراکندگی نور عمل می‌کنند و به تضعیف درخشش سطحی منجر می‌شوند. به کارگیری هیبریدهای دارای اتصال عرضی، گسترش ترک‌ها را به حداقل می‌رساند و پایداری ساختاری را افزایش می‌دهد. افزون بر این، استفاده از سیلیکای متراکم با اندازه حفره تنظیم شده، به شکل گیری توپوگرافی سطحی هموارتر منجر می‌شود و حساسیت سطح به ایجاد هیز ناشی از خراش را کاهش می‌دهد (۱۰، ۳۰). همچنین پشته‌های گرادیانی با توزیع یکنواخت تنش و کاهش تغییرات ناگهانی موضعی در مدول، نقش تعیین کننده‌ای در حفظ

شرایط محیط دهانی، بهبود یابد (۸،۳۲،۶۴). شکل ۳ یک مسیر الگویی سل‌ژل برای تهیه فیلم‌های تیتانیا اصلاح شده با سرب را نمایش می‌دهد. مرورهای اخیر درباره سطوح ریز و نانوساختار تیتانیا نشان داده‌اند که بلور شناسی سطح، زبری در مقیاس زیرمیکرون و ایجاد خاصیت ابر آبدوستی به صورت هم افزا در کاهش چسبندگی باکتری نقش دارند. این عوامل به طور هم زمان از چسبندگی و زیست‌پذیری سلول‌های پستانداران پشتیبانی می‌کنند. چنین اصولی در قالب فیلم‌های سل‌ژل نیز قابل بازآفرینی هستند و امکان به کارگیری آن‌ها برای طراحی پوشش‌های ترمیمی با عملکرد ضد بیوفیلم و سازگار با بافت را فراهم می‌سازند (۳۳،۳۴).



شکل ۳- نمودار جریان آماده سازی فیلم‌های تیتانیا اصلاح شده با سرب به روش پوشش دهی جریان‌ی مبتنی بر فرایند سل‌ژل (۸)

شکل ۴ یک نمای شماتیک تلفیقی از فوتوکاتالیز تیتانیا تهیه شده به روش سل‌ژل در محدوده نور مرئی را نمایش می‌دهد. در این طرح، نقش مراکز تیتانیوم سه ظرفیتی و نقص‌های اکسیژنی در افزایش جذب نور، مهار بازترکیب الکترون حفره و تقویت خود تمیز شوندگی ناشی از تشکیل لایه هیدراته برجسته می‌شود. در شرایط تابش نور مرئی، برانگیزش نوارهای انرژی منجر به تولید گونه‌های فعال اکسیژن شامل سوپراکسید، رادیکال هیدروکسیل و پراکسید هیدروژن می‌شود که توانایی غیر فعال سازی میکروارگانیسم‌ها و آلاینده‌های آلی را دارند (۶۴).

ایجاد تغییر در پیگمنت‌های حجمی، یک مزیت عملی برای بهبود پایداری رنگی فراهم می‌سازد (۲۸).

از سوی دیگر، نقش فوتوکاتالیز و احتمال بروز زردشدگی نیز باید مورد توجه قرار گیرد. لایه‌های فوتوکاتالیتیک مبتنی بر تیتانیا از نظر نظری این پتانسیل را دارند که تحت تابش نور، از طریق واکنش‌های سطحی، بر پایداری رنگ اثر بگذارند. در این چارچوب، نانو ذرات فعال شونده با نور مرئی که رفتار ابر آبدوست نشان می‌دهند، توانسته‌اند مهار چسبندگی باکتری‌ها را گزارش کنند. با این حال، نتیجه عملی آن است که شدت فعالیت کاتالیتیکی و دوز نوری باید به صورت دقیق تنظیم شوند تا از بروز تغییرات رنگی ناخواسته در سطوح زیبایی پیشگیری شود (۳۲،۴۵).

در طراحی نوری، سیلیکای سل‌ژل با تخلخل تنظیم شده ضریب شکست مؤثر را کاهش می‌دهد و رفتار پایدار شده پهن باند همراه با گرادیان شکست هموارتر ایجاد می‌کند، مشروط بر آنکه فرایند تراکم دهی به گونه‌ای انجام شود که سختی و جلای سطحی حفظ شود (۱۰). شبکه‌های هیبریدی سیلیکون و زیرکونیا، در عین تقویت سطح، شفافیت بالا و رفتار ضد فولینگ را حفظ می‌کنند و مسیری عملی برای دستیابی به زیبایی ناحیه قدامی بر روی زیرلایه‌های ترمیمی منحنی فراهم می‌سازند (۱۱،۳۰). فارغ از مسیر انتخابی، منافع ادعا شده باید در برابر چالش‌های سایش و رنگ پذیری مورد راستی آزمایی قرار گیرند و این ارزیابی از طریق رهگیری کمی هیز، عبوردهی نور، جلای سطح و شاخص‌های رنگ انجام شود تا پایداری عملکردی در کاربرد بالینی تضمین شود (۲۸،۳۰).

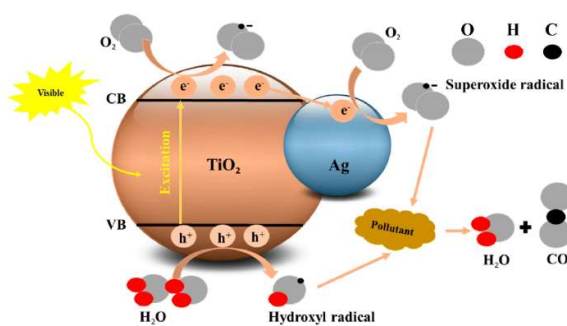
عملکرد ضد بیوفیلم: فوتوکاتالیز، مسیرهای یون محور و راهبردهای هیبریدی

۱- سازوکارها

فوتوکاتالیز مبتنی بر تیتانیا یکی از راهبردهای شناخته شده برای افزایش عملکرد ضد باکتریایی سطوح ترمیمی محسوب می‌شود. تیتانیا تحت تابش مناسب، گونه‌های فعال اکسیژن تولید می‌کند که به غشاهای باکتریایی و ماتریکس پلیمری خارج سلولی آسیب وارد می‌کنند. فرایند دوپینگ، برای نمونه با سرب، یا مهندسی عیوب ساختاری، حساسیت تیتانیا به نور مرئی را افزایش می‌دهد. این تنظیم ساختاری انتقال بار را به گونه‌ای هدایت می‌کند که کارایی فوتوکاتالیتیکی در شدت‌های تابشی پایین، مشابه

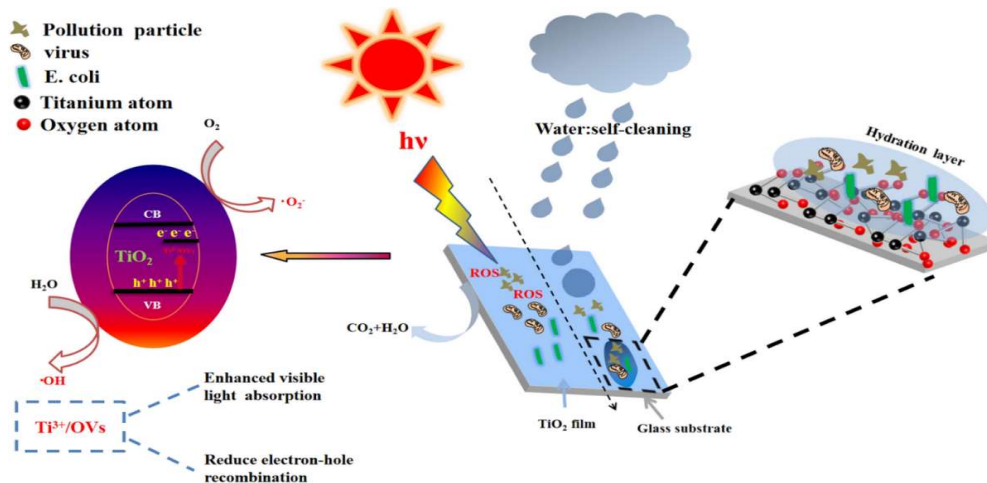
هیبریدهای پلیمری سل ژل نیز به طور مشابه امکان جای دهی نانو ذرات نقره را فراهم می‌کنند و الگوی رهایش کنترل شده‌ای ایجاد می‌کنند (۲،۳۶). در همین راستا، سامانه‌های مبتنی بر روی شامل نانو ذرات اکسید روی و اکسید روی همراه با اسانس‌های گیاهی، فعالیت مؤثری در مهار پاتوژن‌های دهانی نشان داده‌اند. این شواهد بیانگر آن است که پوشش‌های عملکردی با محتوای روی، قابلیت ایجاد اثرات ضد بیوفیلمی سازگار با سطوح ترمیمی را فراهم می‌کنند (۳۷-۳۹). علاوه بر این، سریم به واسطه مشارکت در چرخه‌های اکسایش کاهش چهارظرفیتی و سه ظرفیتی، توانایی جاروب رادیکال‌های آزاد و تعدیل تعادل گونه‌های فعال اکسیژن را نشان می‌دهد. در برخی مطالعات، کامپوزیت‌هایی که در آن‌ها سیلیکای مزوحفره با اکسید سریم تزئین شده و در ماتریس رزینی جای‌گذاری شده است، بروز اثرات ضد باکتری قابل توجهی را گزارش کرده‌اند (۴۵).

راهبردهای هیبریدی آلی معدنی فرصت‌های تازه‌ای را در این حوزه ایجاد کرده‌اند. هیبریدهای سل ژل این امکان را فراهم می‌سازند که عوامل کاتالیتیکی مانند تیتانیا و عوامل یونی نظیر نقره و روی به صورت هم مکان در ساختار قرار گیرند، در حالی که شبکه‌های حاصل یکپارچگی سطح را در برابر چالش‌هایی مانند مسواک‌زدن و جویدن حفظ می‌کنند (۳۹). یک نمای شماتیک مکانیکی از هم افزایی نور مرئی در تیتانیای اصلاح شده با نقره در شکل ۵ ارائه شده است که در آن نقره نقش مخزن الکترونی را ایفا می‌کند، بازترکیب جفت‌های الکترون حفره را مهار می‌سازد و تولید گونه‌های فعال اکسیژن را افزایش می‌دهد.



شکل ۴- فوتوکاتالیز در محدوده نور مرئی و رفتار خودتمیز شوندگی در فیلم‌های تیتانیا تهیه شده به روش سل ژل (نمای شماتیک مفهومی) (۳۲)

حضور مراکز تیتانیم سه ظرفیتی و نقص‌های اکسیژن، جذب نور در بازه مرئی را افزایش داده و بازترکیب الکترون حفره را کاهش می‌دهد. هم زمان، در تماس با آب یک لایه پایدار هیدراته در سطح تشکیل می‌شود که با کاهش چسبندگی اولیه باکتری‌ها، بروز رفتار خود تمیز شوندگی را تسهیل می‌کند. این تصویر صرفاً یک شماتیک مفهومی است و شامل داده‌های کمی نمی‌شود. کنش ضد باکتریایی علاوه بر مسیر فوتوکاتالیز، از طریق رهایش یون‌ها نیز محقق می‌شود. ماتریکس‌های سیلیکایی تولید شده به روش سل ژل قابلیت تثبیت یون‌های ضد میکروبی و رهایش کنترل شده آن‌ها را فراهم می‌سازند (۹). به عنوان نمونه، نقره در شبکه‌های سیلیکایی ادغام می‌شود و فعالیت ضد باکتریایی پایدار را همراه با حفظ یکپارچگی ساختاری ارائه می‌دهد.



شکل ۵- شماتیک فوتوکاتالیز در محدوده نور مرئی در لایه‌های نازک تیتانیا اصلاح شده با نقره (۳۳)

در شرایط تابش نور مرئی، الکترون‌ها از نوار ظرفیت تیتانیا به نوار رسانش آن برانگیخته می‌شوند و سپس به نانو ذرات نقره انتقال می‌یابند. نقره با ایفای نقش تله الکترونی، بازترکیب جفت الکترون حفره را مهار می‌کند. در ادامه، کاهش اکسیژن مولکولی به تشکیل گونه سوپر اکسید منجر می‌شود و اکسیداسیون آب، رادیکال‌های هیدروکسیل را ایجاد می‌کند. این گونه‌های فعال اکسیژن، ترکیبات آلی و اجزای باکتریایی موجود بر سطح پوشش را اکسید کرده و آن‌ها را به دی اکسید کربن و آب تبدیل می‌نمایند. این تصویر یک شماتیک مفهومی است که مستقل از نوع زیرلایه ترسیم شده و مقیاس مشخصی ندارد. نمونه‌های سیلیکون و زیرکونیا نشان داده‌اند که دستیابی هم زمان به دوام مکانیکی، تنظیم انرژی سطح و رفتار ضد فولینگ امکان پذیر می‌ماند و این پدیده به طور غیر مستقیم تجمع بیوفیلم را کاهش می‌دهد (۲۰۳۰). در حوزه ایمپلنت‌های پلیمری یا فلزی نیز پوشش‌های سل‌ژل مبتنی بر تیتانیا به عنوان لایه‌های رهاپس دارو به کار گرفته شده‌اند. این رویکرد یک مفهوم انتقال پذیر ارائه می‌دهد که قابلیت به کارگیری مستقیم در نواحی اباتمنت ترمیمی در دندانپزشکی را دارا است (۴۲،۴۳).

۲- مدل‌های آزمون و شاخص‌ها

مدل‌های بیوفیلم مورد استفاده در مطالعات مرتبط با مواد ترمیمی دامنه گسترده‌ای را شامل می‌شوند. این مدل‌ها از آزمون‌های تک‌گونه‌ای با تمرکز بر باکتری‌های پوسیدگی‌زا آغاز می‌شوند و تا سامانه‌های چند گونه‌ای پیچیده و سطوحی که با پلیکول بزاقی شرطی سازی شده‌اند گسترش می‌یابند (۶۶). برای ارزیابی این مدل‌ها، شاخص‌های متعددی به کار گرفته می‌شوند. این شاخص‌ها شامل شمارش واحدهای تشکیل‌دهنده کلنی، کمی سازی ماتریکس پلیمری خارج سلولی، تصویربرداری زنده و مرده با استفاده از میکروسکوپ لیزری کانفوکال، آزمون‌های متابولیکی و همچنین رهگیری گونه‌های میکروبی از طریق واکنش زنجیره‌ای پلیمرز کمی می‌شوند (۴۰،۴۱). در سامانه‌هایی که با نور مرئی فعال می‌شوند، گزارش دقیق پارامترهای تابش، شامل بازه طول موج، شدت تابش و مدت زمان تابش، ضروری است. این ضرورت از آن‌جا ناشی می‌شود که پیامدهای ضد باکتریایی به طور مستقیم و شدید به دوز نوری وابسته هستند (۳۲،۴۵).

در حوزه بافت کامپوزیت‌ها و سیلانت‌ها نیز، افزودن تیتانیا و

سامانه‌های ترکیبی نقره‌تیتانیا یا مس‌تیتانیا به سیلانت‌های فیشر و پیت نشان داده است که امکان ایجاد فعالیت ضد باکتریایی بدون وارد شدن آسیب معنی دار به خواص مکانیکی فرمولاسیون وجود دارد. این امکان در شرایطی محقق می‌شود که ترکیب مواد به صورت دقیق و کنترل شده تنظیم شود. این یافته‌ها انگیزه‌ای برای توسعه پوشش‌های سطح محور مبتنی بر سل‌ژل ایجاد کرده‌اند. در این رویکرد، کارایی ضد باکتریایی به سطح خارجی منتقل می‌شود. در نتیجه، نیاز به مصالحه‌های ناخواسته در خواص توده‌ای مواد به حداقل می‌رسد (۴۱). علاوه بر این، پژوهش‌های مستقلی که بر نانو ذرات تیتانیا در برابر گونه‌های پوسیدگی‌زا متمرکز بوده‌اند، شواهد مكملی درباره بروز کنش آنتاگونیستی با واسطه گونه‌های فعال اکسیژن ارائه داده‌اند (۴۰).

پوشش‌های مرتبط با ایمپلنت نیز به عنوان شاخص‌های جانشین برای ارزیابی دوام و عملکرد ضد باکتری مورد توجه قرار گرفته‌اند (۶۷). مرورهایی که به بررسی پوشش‌های تیتانیا بر روی اباتمنت‌ها و ایمپلنت‌های دندان‌های نانو ذره پوشش‌دار پرداخته‌اند، داده‌های ارزشمندی از مطالعات درون تنی و برون تنی درباره پاسخ‌های بافتی و اثرات ضد باکتری گردآوری کرده‌اند. این شواهد امکان پذیری به کارگیری لایه‌های اکسیدی نانومقیاس را در نواحی ترانس موکوزال تقویت کرده‌اند و هم زمان مبنایی برای طراحی پروتکل‌های ارزیابی پوشش‌ها بر روی اجزای اباتمنت ترمیمی فراهم آورده‌اند (۳۵،۶۸).

۳- موازنه‌ها و ایمنی

در بررسی پنجره‌های زیست سازگاری، نکته محوری برقراری توازن میان شدت اثر ضد باکتری و سازگاری با سلول‌های میزبان محسوب می‌شود. در پوشش‌های مبتنی بر رهاپس یون، دوز و سینتیک رهاپس نقش تعیین کننده‌ای ایفا می‌کنند (۹). در این چارچوب، امکان طراحی ماتریکس‌های سیلیکا و سامانه‌های آلی معدنی به گونه‌ای فراهم می‌شود که رهاپس اولیه انفجاری تعدیل شود و فعالیت ضد باکتریایی به صورت پایدار حفظ گردد (۷،۳۶). مرورهای انجام شده بر پوشش‌های ضد میکروبی به کار رفته در تجهیزات پزشکی نیز بر ضرورت استاندارد سازی آزمون‌های سمیت سلولی و انجام ارزیابی‌های پایداری بلند مدت تأکید کرده‌اند تا از بروز پاسخ‌های بافتی ناخواسته پیشگیری شود (۵۰،۶۶). از منظر شید و زیبایی شناسی، لازم است توجه شود که افزودن نقره

انگیزه‌ای برای به کارگیری تیتانیا دوپ شده یا ذرات مهندسی شده دارای عیوب ساختاری در پوسته‌های سل‌ژل ایجاد کرده است تا کارایی عملکردی در شرایط کلینیکی افزایش یابد (۸،۳۲). برای مهار بیوفیلم بر روی سطوح ترمیمی، نانو لایه‌های تیتانیا پاسخ گو به نور مرئی، از جمله فیلم‌های اصلاح شده با سریم، دامنه فعالیت میانجی گری شده توسط گونه‌های فعال اکسیژن را در چارچوب رژیم‌های نوری عملی گسترش می‌دهند (۸،۳۲). هیبریدهای سیلیکایی با رهایش یون‌های نقره یا روی، یک سازوکار مکمل و مستقل از نور برای مهار بیوفیلم فراهم می‌کنند. با این حال، کارایی این سامانه‌ها باید از طریق تنظیم دقیق میزان بارگذاری و سینتیک رهایش با زیست سازگاری سلولی و پایداری رنگ به صورت هم زمان متعادل شود (۷،۳۶). از آن جا که فازهای ضد باکتری مستقر بر سطح می‌توانند توپوگرافی را دستخوش تغییر کنند و فرایندهای دگرگونی رنگ را تسریع نمایند، ارزیابی سایش دندان آنتاگونیست و پیامدهای زیبایی شناختی باید به صورت صریح و هم زمان در همان پروتکل‌هایی انجام شود که برای راستی‌آزمایی کارایی ضد باکتری به کار گرفته می‌شوند (۴۵،۶۷،۶۹). جدول ۴ سازوکارهای ضد باکتریایی بررسی‌شده شامل فوتوکاتالیز، سازوکارهای یون محور و سامانه‌های هیبریدی را به همراه مدل‌های بیوفیلم به کار رفته و مهم‌ترین نتایج گزارش شده در این بخش به صورت یکپارچه خلاصه می‌کند.

یا تیتانیا، در صورت بارگذاری بیش از حد یا در شرایطی که فوتوکاتالیز به تغییر رنگ زاهای آلی سطحی منجر شود، بر تهرنگ ترمیم‌ها اثر می‌گذارد. این اثر به ویژه در سامانه‌های تیتانیا فعال شونده با نور مرئی اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. در چنین شرایطی، کالیراسیون دقیق دوز نوری برای حفظ ثبات رنگ و جلوگیری از زردشدگی یا افت جلا در نواحی قدامی ضرورت پیدا می‌کند (۳۲،۴۵). پیامدهای سایش نیز بخش دیگری از این ملاحظات را تشکیل می‌دهند. فیلم‌های سخت با ماهیت کاتالیتیکی یا لایه‌هایی که حاوی مقدار بالای نانو ذرات هستند، در صورت افزایش بیش از حد زبری سطح، احتمال تشدید سایش دندان‌های آنتاگونیست را به همراه دارند. در این چارچوب، مطالعات مربوط به نفوذ سیلیکا بر روی زیرکونیای نیمه شفاف از نظر سایش آنتاگونیست و میزان بقا ارزیابی شده‌اند و نتایج نشان داده‌اند که شیمی سیلیکا، در صورت کنترل دقیق فرایند و اعمال پرداخت نهایی مناسب سطح، با عملکرد اکلوژالی سازگار باقی می‌ماند (۶۹).

در نهایت، امکان تأمین عملی نور برای فعال سازی فوتوکاتالیز در محل کاربرد اهمیت ویژه‌ای پیدا می‌کند. شرایط تابش نوری در محیط دهان بسیار متغیر باقی می‌ماند و سامانه‌هایی که تحت نور مرئی و با شدت‌های متوسط فعال می‌شوند، از نظر بالینی کاربرد پذیری بیشتری نسبت به سامانه‌های وابسته به تابش فرابنفش نشان می‌دهند. این واقعیت

جدول ۴- خلاصه سازوکارهای ضد بیوفیلم، مدل‌های آزمون و نتایج اصلی در سامانه‌های مرتبط با فرایند سل‌ژل

سازوکار ضد بیوفیلم	مدل آزمون	نتیجه اصلی	منابع
نانو ذرات تیتانیا فعال شونده با نور مرئی	آزمون چسبندگی باکتری و شمارش واحدهای تشکیل کلنی؛ ارزیابی ترشوندگی سطح	کاهش چسبندگی باکتری و بروز اثر ضد باکتری تحت نور مرئی	(۳۲)
فیلم‌های سل‌ژل تیتانیا دوپ شده با سریم	آزمون‌های فوتوکاتالیز	تقویت پاسخ فوتوکاتالیتیکی نسبت به نمونه بدون دوپ؛ سازوکار مبتنی بر تله‌گذاری بار	(۸)
سیلیکای سل‌ژل بارگذاری شده با نقره در قالب شیشه یا هیبرید	ارزیابی ضد باکتری در شرایط آزمایشگاهی	فعالیت ضد باکتری پایدار با میانجی‌گری یون نقره	(۷،۳۶)
تیتانیا در سیلانت‌ها شامل تیتانیا، نقره‌تیتانیا و مس تیتانیا	آزمون‌های مکانیکی همراه با ارزیابی ضد باکتری	بروز اثرات ضدپوسیدگی همراه با حفظ خواص مکانیکی کلیدی در صورت بهینه سازی ترکیب	(۴۱)
نانو ذرات تیتانیا علیه گونه‌های پوسیدگی‌زا	آزمون ضد باکتری تک‌گونه‌ای	بروز رفتار آنتاگونیستی با میانجی‌گری گونه‌های فعال اکسیژن	(۴۰)
سیلیکای مزوحرره تزئین شده با اکسید سریم در کامپوزیت‌ها	ارزیابی ضد باکتری کامپوزیت	بروز خواص ضد باکتری همراه با سازگاری مناسب با ماتریس رزینی	(۶۵)
پوشش‌های سل‌ژل مبتنی بر تیتانیا روی ایمپلنت و اباتمنت	ارزیابی پاسخ بافتی همراه با آزمون‌های ضد باکتری	تأیید امکان پذیری کاربرد و جمع بندی ملاحظات مربوط به بافت نرم	(۳۵،۴۹)
پوشش‌های هیبریدی سل‌ژل روی تیتانیوم با کارکرد دارورسانی	ویژگی‌یابی ساختاری و زیستی	بروز توان ضد باکتری همراه با قابلیت رهایش کنترل شده	(۴۲،۴۳)
نانو ذرات اکسید روی و اکسید روی بارگذاری شده با اسانس‌های گیاهی	آزمون‌های ضد باکتری مرتبط با پاتوژن‌های دهانی	کاهش ضد باکتری مؤثر که بیانگر قابلیت پوشش‌های غنی از روی است	(۳۷،۳۸)

ترکیب مهندسی و چارچوب تصمیم‌گیری

۱- نگاشت‌های «ساختار، فرآیند، خواص، عملکرد»

این بخش به‌جای ارائه قواعد تجویزی، یک سنتز عمل‌گرایانه و چارچوبی برای تصمیم‌گیری فراهم می‌سازد که هدف آن ترسیم ارتباط میان متغیرهای فرایندی، ساختار میان‌فاز و برون‌دادهای کارکردی در سه محور چسبندگی، ویژگی‌های نوری و رفتار ضد بیوفیلیم است. اهرم‌های عملی شامل نسبت پیش‌ماده‌ها، شرایط کاتالیزتی و پی‌اچ، نسبت آب به آلکوکسید، سن یا ویسکوزیته سل، مسیر و سرعت نشانیدن و همچنین برنامه پخت یا تراکم دهی در نظر گرفته می‌شوند. این مجموعه عوامل تعیین می‌کنند که فیلم نهایی به صورت یک ناحیه زیر سطحی غنی از سیلیکا، یک پوسته اکسیدی مختلط و مجزا، یا یک ساختار هیبریدی سازگار شکل گیرد. در نتیجه، مشخص می‌شود که آیا فصل مشترک ایجاد شده از نظر شیمیایی قابل کویل باقی می‌ماند، انتقال نور را با شفافیت مناسب دنبال می‌کند و در برابر شکل‌گیری اولیه بیوفیلیم مقاومت نشان می‌دهد (۱۶، ۱۷).

از دیدگاه چسبندگی، در سرامیک‌های فاقد فاز شیشه‌ای مانند زیرکونیای تتراگونال پایدار شده با ایتریا، نفوذ سیلیکا به روش پوشش دهی غوطه‌وری همراه با برنامه‌های حرارتی محافظه‌کارانه، به ایجاد ناحیه‌ای زیر سطحی غنی از گروه‌های سیلانول منجر می‌شود. پس از انجام سیلانیزاسیون، این پیکربندی با افزایش چقرمگی بین سطحی و بهبود استحکام باند نسبت به زبر سازی مکانیکی صرف همراه گزارش شده است (۱۷، ۵۱). در شرایطی که هدف، ایجاد فیلم‌های مجزا دنبال می‌شود، پوشش‌های سیلیکا یک پوسته سطحی غنی از گروه‌های سیلانول ایجاد می‌کنند، در حالی که ساختار حجمی زیرکونیا بدون تغییر باقی می‌ماند (۱۴). هر دو رویکرد با سیلان‌های متداول سازگاری نشان می‌دهند و در صورت نیاز، امکان به کارگیری هم‌زمان با پرایمرهای فسفات‌ه نیز حفظ می‌شود (۱۵، ۲۰). همچنین میان لایه‌های کامپوزیتی زیرکونیا و سیلیکا ساختار را به سوی تشکیل شبکه‌های اکسیدی مختلط هدایت می‌کنند. این شبکه‌ها خیس شوندگی سطح را بهبود می‌بخشند و عدم تطابق موضعی در فصل مشترک را تعدیل می‌کنند. به همین دلیل، در مقایسه با زیرکونیای بدون اصلاح، استحکام باند بالاتری گزارش شده است (۱۹).

در حوزه اپتیک، به کارگیری سیلیکای با تخلخل تنظیم شده به کاهش ضریب شکست مؤثر در فصل مشترک با هوا و هموار سازی

گرادیان ضریب شکست به‌سوی زیرلایه منجر می‌شود. پیامد مستقیم این تنظیم، کاهش بازتاب فرنل و محدود شدن هیز سطحی گزارش می‌شود. در این چارچوب، تراکم دهی کنترل شده‌ای که در عین حفظ تخلخل هدف، انسجام شبکه را تقویت می‌کند، نقشی تعیین‌کننده در حفظ سختی و جلای سطحی ایفا می‌کند (۱۰). در همین راستا، پوسته‌های هیبریدی سیلیکونی حاوی زیرکونیا با جای دهی دامنه‌هایی با ضریب شکست بالا در چارچوب اتصال عرضی، سطوحی شفاف و مقاوم در برابر سایش ایجاد می‌کنند. این سطوح دارای پروفایل گرادیانی هستند و حساسیت کمتری نسبت به تغییرات ضخامت و انحنا سطح نشان می‌دهند. این راهبرد با منطق طراحی سرامیک‌های گرادیانی هم‌راستا گزارش می‌شود (۳۰، ۳۱).

از نظر رفتار ضد بیوفیلیم، نانو لایه‌های تیتانیا که از سل‌های آلکوکسیدی حاصل می‌شوند و با دپانته‌ها یا مهندسی عیوب ساختاری اصلاح می‌گردند، تحت تابش نور مرئی به تولید گونه‌های فعال اکسیژن منجر می‌شوند. این فرایند، چسبندگی اولیه باکتری‌ها را مهار می‌کند و سازمان یافتگی ماتریکس پلیمری خارج سلولی را برهم می‌زند. حضور سریم جدایش بار را پایدارتر می‌سازد و دامنه پاسخ طیفی سامانه را در شرایط نوری عملی گسترش می‌دهد (۸، ۳۲). در رویکردی دیگر، هیبریدهای سیلیکایی با کارکرد یونی به گونه‌ای طراحی می‌شوند که یون‌های نقره را روی را به صورت مخزن‌های پایدار درون ماتریکس‌های هم‌پسته جای دهند. این راهبرد امکان بروز اثر ضد باکتری مداوم را فراهم می‌سازد، در حالی که یکپارچگی ساختاری فیلم و پایداری عملکردی آن حفظ می‌شود (۷، ۳۶). در نواحی مجاور ایمپلنت و بخش‌های ترانس موکوزال نیز، پوشش‌های اکسیدی حاصل از فرایند سل‌ژل نقش حامل یا مانع عملکردی را ایفا می‌کنند و بدین ترتیب امکان انتقال این ساختارهای مهندسی شده را به اجزای اباتمنت ترمیمی فراهم می‌سازند (۳۵، ۴۲).

با این حال، در تمامی این محورها دو ریسک میان‌بر نیازمند مدیریت دقیق هستند. نخست آنکه حضور گروه‌های سیلانول باقیمانده و ریز عیوب ساختاری مسیرهای نفوذ هیدرولیتیک را فعال کرده و تمرکز تنش را تشدید می‌کند. در مقابل، به کارگیری شبکه‌های هیبریدی و ترکیب‌های گرادیانی امکان کاهش ترک خوردگی را فراهم می‌سازد. با این وجود، در این راهبردها باید از بروز پدیده پلاستیسه شدن جلوگیری شود تا پایداری مکانیکی و عملکردی لایه حفظ گردد (۱۲). دومین ریسک اساسی،

ناهمگونی پروتکل‌ها محسوب می‌شود. متغیرهایی مانند توالی کاربرد پرایمرها، برنامه‌های پخت و شیوه‌های پیر سازی می‌توانند ارتباط میان ساختار میان فاز و ویژگی‌های عملکردی را مخدوش سازند، مگر آنکه این جزئیات به صورت دقیق، شفاف و قابل تکرار ثبت و کنترل شوند. مروره‌های نظام‌مند به طور مکرر بر اهمیت این مسئله تأکید کرده‌اند (۲۰،۲۱).

۲- ماتریس تصمیم

وقتی دستیابی به باندینگ بلند مدت بر روی زیرکونیای پایدار شده با ایترا تحت شرایط پیر سازی سخت گیرانه به عنوان اولویت طراحی مطرح می‌شود، شواهد معتبر نشان می‌دهند که اتکاپذیرترین مسیر، استفاده از یک میان فاز سیلیکایی است. این میان فاز می‌تواند به صورت نفوذی یا به شکل پوشش نازک ایجاد شود و در ادامه با سیلانیزاسیون و به کارگیری یک سمان رزینی سازگار با توالی پرایمر انتخاب شده تکمیل گردد. چنین رویکردی به تشکیل یک ناحیه زیر سطحی یا یک پوسته سطحی فعال از نظر شیمیایی منجر می‌شود که از کوپلینگ سیلان پشتیبانی کرده و چقرمگی بین سطحی را افزایش می‌دهد. متآنالیزها نیز تأیید کرده‌اند که این راهبرد، در مقایسه با زیر سازی مکانیکی صرف، در صورت اجرای استاندارد و کنترل شده مراحل کاربرد، عملکرد مطلوب‌تری پس از پیر سازی نشان می‌دهد (۲۱،۵۱). در شرایطی که نگرانی‌هایی درباره خیس شوندگی سطح و عدم تطابق موضعی مطرح باشد یا ملاحظات اجرایی استفاده از یک فیلم تک مرحله‌ای را ترجیح دهد، پوشش‌های مختلط زیرکونیا و سیلیکا به عنوان یک گزینه جایگزین منطقی معرفی شده‌اند. این شبکه‌های اکسیدی مختلط، با افزایش انرژی سطحی و کاهش زاویه تماس، خیس شوندگی و پخش یکنواخت سمان رزینی را بهبود می‌دهند و در مقایسه با زیرکونیای بدون اصلاح، با افزایش قابل توجه و قابل اندازه گیری در استحکام باند گزارش شده‌اند (۱۹).

در شرایطی که زیبایی نواحی قدامی مستلزم خاصیت پایدار شده همراه با مقاومت سایشی باشد، شواهد موجود از مزیت پوسته‌های هیبریدی سیلیکونی حاوی زیرکونیا حکایت می‌کنند. در این ساختارها، ستون فقرات دارای اتصال عرضی امکان جای دهی دامنه‌های نانومقیاس با ضریب شکست بالا را فراهم می‌سازد و به دستیابی هم زمان به دوام مکانیکی و شفافیت نوری منجر می‌شود. در مواردی که بازتاب سطحی

در فصل مشترک با هوا همچنان باقی بماند، افزودن یک لایه فوق نازک سیلیکا با تخلخل تنظیم شده گرادیان ضریب شکست را نرم می‌کند. ترکیب این دو رویکرد یک پروفایل گرادیان پایدار ایجاد می‌کند که حساسیت کمتری نسبت به خطاهای ضخامت و انحنا سطح نشان می‌دهد و در برابر سایش ناشی از مسواک زنی نیز عملکرد مقاوم‌تری نسبت به فیلم‌های کم ضریب شکست و شکننده ارائه می‌دهد (۱۰،۱۱،۳۰). با این حال، باید توجه داشت که شفافیت کامپوزیت صرفاً به حضور لایه‌های سطحی وابسته نیست، بلکه به میزان تطابق ضریب شکست میان فیلرها و ماتریس حجمی نیز ارتباط مستقیم دارد. از این رو، لایه‌های پایدار شده سطحی باید به عنوان راهکاری مکمل در سطح ترمیم تلقی شوند. این لایه‌ها جایگزین اصلاحات مربوط به ترکیب حجمی کامپوزیت محسوب نمی‌شوند، بلکه نقش آن‌ها به بهبود رفتار نوری در فصل مشترک و کاهش بازتاب‌های سطحی محدود می‌ماند (۲۸).

در صورت نیاز به ایجاد فعالیت ضد باکتریایی سطحی، شواهد نوظهور دو دسته اصلی از پوشش‌ها را پیشنهاد می‌دهند. دسته نخست شامل فیلم‌های تیتانیا پاسخ گو به نور مرئی است که با غلبه فاز آنازات و از مسیر دوپینگ یا مهندسی عیوب ساختاری اصلاح شده‌اند. این فیلم‌ها تحت دوزهای نوری عملی، توان تولید گونه‌های فعال اکسیژن را نشان می‌دهند و از این طریق چسبندگی اولیه باکتری‌ها و تشکیل ماتریکس پلیمری خارج سلولی را مهار می‌کنند. در این راهبرد، شدت فعالیت کاتالیتیکی و رژیم نوردهی باید به صورت دقیق تنظیم شود تا از بروز تغییرات نامطلوب در رنگ یا جلای سطح جلوگیری گردد. دسته دوم به هیبریدهای سیلیکایی عملکردی شده با یون‌های نقره یا روی اختصاص دارد که امکان رهایش پایدار یون را با حداقل اثرات بصری فراهم می‌کنند. تحقق این عملکرد مستلزم نگهداشتن بارگذاری در سطوح پایین و توزیع یکنواخت نانو دامنه‌ها در ساختار پوشش باقی می‌ماند (۳۸،۳۹،۷۰). در زمینه بافت‌های مجاور ایمپلنت، پوشش‌های هیبریدی یا سامانه‌های دارای رهایش دارو توانسته‌اند اثرات ضد باکتریایی را به صورت هم زمان با حفظ سازگاری بافتی فراهم سازند (۴۳،۴۲).

در شرایطی که سایش دندان آنتاگونیست و بقای ترمیم به عنوان محدودکننده‌های اصلی مطرح می‌شوند، برای نمونه در زیرکونیای نیمه شفاف نواحی پرتحمل، شواهد با قدرت متوسط نشان داده‌اند که تیمار سیلیکا همراه با کنترل دقیق فرایند و تکمیل پرداخت نهایی،

در مقایسه با فیلم‌های زیر غنی از نانو ذره، رویکرد مناسب‌تری به شمار می‌آید. داده‌های حاصل از آزمون‌های سایش آنتاگونیست و تحلیل بقا نشان داده‌اند که در صورت اجرای صحیح مراحل پرداخت نهایی و پرهیز از ایجاد زبری بیش از حد در برنامه‌های پوشش دهی، حفظ سازگاری با عملکرد اکلوزالی امکان پذیر باقی می‌ماند (۶۹).

در همین راستا، به منظور افزایش شفافیت کاربردی، مینی پروتکل‌های سناریو محور بر پایه مطالعات مرجع پیشنهاد شده‌اند. در باندینگ بلند مدت زیر کونای ترا گونال پلی کریستال پایدار شده با ایترا، پروتکل با پاک سازی سطح زیر کونیا و در صورت نیاز، زیر سازی ملایم آغاز می‌شود. سپس سل سیلیکایی مبتنی بر تترا اتیل اورتوسیلیکات با نسبت‌های کاتالیست و نسبت آب به آلکوکسید هم راستا با مقالات مرجع تهیه می‌شود و تا دستیابی به ویسکوزیته مناسب پیر سازی می‌گردد. در ادامه، پوشش دهی غوطه وری با سرعت بیرون کشی کنترل شده انجام می‌شود تا با نفوذ زیر سطحی از طریق چرخه‌های نازک تکراری حاصل شود یا یک فیلم نازک همساز بر سطح شکل گیرد. پس از خشک سازی و اعمال پخت حرارتی محافظه کارانه، مرحله سیلانیزاسیون با کنترل دقیق رطوبت اجرا می‌شود و سپس توالی پرایمر و سمان مطابق پروتکل تکمیل می‌گردد. کارایی اتصال از طریق آزمون استحکام برشی در مقیاس میکرو یا استحکام کششی در مقیاس میکرو و در مقایسه با گروه‌های کنترل سندبلاست شده یا روش تریبوشیمیایی ارزیابی می‌شود و در نهایت، اثرات پیر سازی مصنوعی مانند ترموسایکلینگ یا ماندگاری در آب مورد بررسی قرار می‌گیرد (۱۵،۱۷،۵۱). دامنه اثر این رویکرد به تازگی سیلان و توالی به کارگیری پرایمر وابسته است و ناهمگونی مشاهده شده میان مطالعات، ضرورت انجام آزمون‌های محلی تحت شرایط پیر سازی را ایجاب می‌کند (۲۰،۲۱).

در سناریوی مربوط به پوشش قدامی پایدار شده و مقاوم به سایش، پروتکل با پولیش سطح تا دستیابی به جلای بالا آغاز می‌شود. در ادامه، سل هیبریدی سیلیکون و زیر کونیا با استفاده از پیش ماده‌های سیلیکونی دارای قابلیت اتصال عرضی و نانو دامنه‌های حاوی زیر کونیا تهیه می‌شود. سپس یک فیلم نازک و پیوسته از طریق پوشش دهی غوطه وری یا پوشش دهی چرخشی بر سطح نشاند می‌شود. پس از اعمال اتصال عرضی یا پخت حرارتی مطابق گزارش‌های مرجع، در صورتی که بازتاب سطحی همچنان باقی بماند، یک لایه فوق نازک سیلیکا با تخلخل پایین و ضریب شکست کم افزوده می‌شود. کارایی نوری این ساختار با استفاده

از شاخص‌های شفافیت، هیز، عبور کل و مستقیم نور، تغییرات رنگ در فضای رنگی استاندارد و نیز حفظ جلای سطح پس از آزمون‌های سایش یا شبیه سازی مسواک زنی ارزیابی می‌شود (۱۰،۱۱،۳۰). محدودیت اصلی این پروتکل به حساسیت بالای عملکرد پایدار شده نسبت به ضخامت لایه و نیز احتمال کاهش سختی در اثر افزایش تخلخل مربوط می‌شود، از این رو انجام ارزیابی‌های موضعی پس از آزمون‌های سایش یا تغییر رنگ برای اطمینان از پایداری عملکرد ضرورت دارد.

افزون بر حساسیت عملکرد پایدار شده به ضخامت، تخلخل و زبری سطح، پایداری فصل مشترک پوشش و زیر لایه نیز باید در ماتریس تصمیم لحاظ شود. در زیر لایه‌های پلیمری یا کامپوزیتی، اختلاف رفتار ترمومکانیکی میان بستر آلی و شبکه هیبریدی غنی از اکسید می‌تواند طی چرخه‌های حرارتی دهان به تجمع تنش بین سطحی، رشد ریز ترک و در نهایت جداشدگی موضعی پوشش منجر شود (۶۰،۶۱). بنابراین، انتخاب این پوشش‌ها نباید فقط بر اساس شفافیت، سختی، آب گزیری یا چسبندگی اولیه انجام گیرد. دوام چسبندگی پس از ترموسایکلینگ، ماندگاری در آب و آزمون‌های خستگی مکانیکی باید به عنوان معیارهای مکمل تصمیم گیری در نظر گرفته شوند، زیرا ترموسایکلینگ یکی از روش‌های رایج برای شبیه سازی تنش‌های حرارتی در ارزیابی آزمایشگاهی مواد و ترمیم‌های دندان است (۶۲).

در سناریوی ایجاد حاشیه‌ای با فعالیت ضد باکتری وابسته به نور مرئی، سل تیتانیا از پیش ماده‌های آلکوکسیدی و بر پایه راهبردهای دوپینگ یا مهندسی عیوب، متناسب با سامانه نوری گزارش شده در مطالعات مرجع، آماده سازی می‌شود. فیلم نازک تیتانیا پس از نشانند، با اعمال فرایندهای بلورینگی یا تراکم دهی کنترل شده به فاز بلوری هدف هدایت می‌شود. در ارزیابی ضد باکتری، رژیم نوری شامل طول موج، شدت و مدت زمان تابش مطابق با شرایط مرجع تعریف می‌گردد. برای رهگیری پیامدهای زیستی، شاخص‌هایی مانند شمارش واحدهای تشکیل کلنی، آزمون‌های چسبندگی و تصویربرداری زنده و مرده با میکروسکوپ لیزری کانفوکال به کار گرفته می‌شوند. هم زمان، تغییرات رنگ و جلا نیز پایش می‌شوند تا ریسک‌های زیبایی شناختی کنترل شوند. در این مسیر، هیبریدهای سیلیکایی عملکردی شده با یون‌های نقره یا روی به عنوان گزینه‌های مکمل یا جایگزین مطرح می‌شوند، مشروط بر آنکه میزان بارگذاری در سطح پایین حفظ شود و

پخت نیز لازم است با ذکر کامل زمان و دما و نوع اتصال عرضی، چه فرابنفش و چه حرارتی، به ویژه در سامانه‌های هیبریدی تشریح گردد. برای فیلم‌های به دست آمده، ارائه شاخص‌هایی مانند ضخامت لایه، زبری سطح، انرژی سطحی و زاویه تماس آب ضروری است و در صورت ارتباط با عملکرد نوری، هر سنج‌ای که بازتاب دهنده وضعیت تخلخل باشد باید به طور مشخص گزارش شود. در بخش آزمون‌های باندینگ، لازم است روش به کار رفته به طور دقیق مشخص شود، خواه استحکام برشی در مقیاس میکرو، استحکام کششی در مقیاس میکرو یا استحکام برشی در مقیاس ماکرو به کار رفته باشد. هندسه دقیق نمونه‌ها و نحوه برخورد با شکست‌های پیش آزمون باید به صورت کامل تشریح شود. همچنین، توالی کاربرد پرایمرها و سیلان‌ها و جزئیات پروتکل‌های پیر سازی، شامل تعداد و دمای چرخه‌ها در ترموسایکلینگ، مدت زمان ماندگاری در آب و در صورت استفاده، آزمون‌های خستگی مکانیکی، باید به طور شفاف و نظام‌مند گزارش شوند. برای ارزیابی نوری، لازم است شاخص‌های شفافیت مانند تی پی یا صفر صفر تی پی، سامانه رنگ سنجی سی آی ای لب و مقادیر تغییر رنگ دلتای یا صفر صفر دلتای همراه با شرایط دقیق آزمون گزارش شوند. علاوه بر این، اندازه گیری عبوردهی کل و مستقیم نور، میزان هیز و جلا باید به طور نظام‌مند ثبت گردد. هر یک از این سنج‌ها لازم است در پیوند با شرایط آزمون متناظر، از جمله سایش، غوطه وری در محلول‌های رنگ زا یا مواجهه با تابش فرابنفش و حرارت، ارائه شوند تا امکان مقایسه پذیری و تفسیر معتبر نتایج فراهم گردد. در آزمون‌های ضد بیوفیلیم، لازم است نوع مدل به کار رفته به روشنی مشخص شود، چه مدل‌های تک‌گونه‌ای و چه سامانه‌های چند گونه‌ای و همچنین شرایط آماده سازی سطح از جمله شرطی سازی با پلیکول بزاق باید گزارش شوند. شاخص‌های متداول ارزیابی شامل شمارش واحدهای تشکیل کلنی، کمی سازی ماتریکس پلیمری خارج سلولی، تصویربرداری زنده و مرده با میکروسکوپ لیزری کانفوکال، آزمون‌های متابولیک و رهگیری گونه‌های میکروبی با روش‌های مولکولی هستند. در سامانه‌هایی که بر پایه فوتوکاتالیز عمل می‌کنند، گزارش دقیق رژیم نوری شامل بازه طول موج، شدت تابش و مدت زمان اعمال نور ضروری است، زیرا پاسخ ضد باکتریایی به این پارامترها وابستگی مستقیم دارد. همچنین در سامانه‌های یون رها مانند نقره یا روی، لازم است پروفایل رهایش

پراکنش نانومقیاس به صورت یکنواخت انجام گیرد (۷۸،۳۲). اندازه اثر ضد باکتری در این رویکرد به نوع دوپانت و شدت تابش وابسته است. محدودیت اصلی این روش به شرایط متغیر نور در محیط دهان باز می‌گردد. علاوه بر این، احتمال بروز تغییر در رنگ یا کاهش جلا نیز به عنوان یک ملاحظه مهم مطرح می‌شود (۳۲،۴۵).

در نهایت، در مورد زیرکونیای نیمه شفاف در نواحی پرتحمل که سایش دندان آنتاگونیست و بقای ترمیم به عنوان محدودیت‌های اصلی مطرح هستند، تیمار سیلیکا به صورت نفوذ یا پوشش نازک همراه با کنترل دقیق فرایند نشان دادن و برنامه پخت پیشنهاد می‌شود تا از ایجاد برآمدگی‌های زیر نانومقیاس پیشگیری گردد. انجام پایان کاری و پولیش کامل پیش از لوتینگ ضروری است. علاوه بر این، آزمون‌های سایش دندان آنتاگونیست و تحلیل بقا باید تحت شرایط گزارش شده در مطالعات مرجع اجرا شوند. ارزیابی استحکام برشی در مقیاس میکرو یا استحکام کششی در مقیاس میکرو پس از اعمال پروتکل‌های پیر سازی نیز ضرورت دارد تا حفظ استحکام باند در شرایط بالینی اطمینان بخش تلقی شود (۲۱،۶۹). این راهبرد بر این نکته تأکید دارد که رفتار سایشی به شدت به زبری نهایی سطح و کیفیت پایان کاری وابسته است، از این رو لازم است پروتکل‌هایی برگزیده شوند که ضمن حفظ مزایای شیمیایی ایجاد شده در فصل مشترک، از افزایش زبری ناخواسته جلوگیری کرده و سایش دندان آنتاگونیست را در پایین‌ترین حد ممکن نگه دارند (۶۹).

برای تضمین قابلیت مقایسه و باز تولید پذیری یافته‌ها، لازم است در گزارش روش‌ها، جزئیات پیش ماده‌ها و شرایط سنتز به صورت کامل و شفاف ارائه شوند. نوع پیش ماده‌ها و نسبت‌های به کار رفته، شامل ترکیباتی مانند تترا اتیل اورتوسیلیکات یا ارگانوسیلان‌ها، و نیز پیش ماده‌های فلزی نظیر تترا ایزوپروپوکسید تیتانیوم یا پروپوکسید زیرکونیوم باید به طور دقیق مشخص گردند. افزون بر این، نوع کاتالیست مورد استفاده، مقدار آن و نحوه تنظیم پی اچ، نسبت آب به آلکوکسید و ترکیب حلال‌ها ضروری است که به دقت ثبت شوند. همچنین سن سل و ویسکوزیته آن در زمان نشان دادن به عنوان شاخص‌های حیاتی مطرح هستند که نقش تعیین کننده‌ای در باز تولید شرایط پوشش دهی و تفسیر نتایج دارند. پارامترهای نشان دادن شامل سرعت بیرون کشی در روش دیپ کوتینگ، الگوی چرخش در اسپین کوتینگ یا تنظیمات اعمال شده در اسپری کوتینگ باید به صورت شفاف و دقیق گزارش شوند. برنامه

یون‌ها به صورت مستند ارائه شود تا امکان تحلیل ارتباط میان مکانیسم آزاد سازی و کارایی ضد باکتریایی فراهم گردد (۴۵، ۴۱، ۴۰، ۳۲).

بحث و نتیجه گیری

۱- تلفیق یافته‌ها در حوزه‌های چسبندگی، نوری و ضد بیوفیلیم
برآیند شواهد نشان می‌دهد که نانو لایه‌های حاصل از فرایند سل‌ژل یک راهبرد قابل تنظیم و انعطاف پذیر برای مهندسی میان فاز بر روی زیرلایه‌های ترمیمی فراهم می‌آورند. این قابلیت از طریق کنترل شیمی پیش ماده‌ها، شرایط نشانند و عملیات متراکم‌سازی در دماهای پایین حاصل می‌شود و امکان ایجاد شبکه‌هایی با ساختارهای هدفمند و قابل طراحی را فراهم می‌سازد. در حوزه چسبندگی به سرامیک‌های فاقد فاز شیشه‌ای، میان فازهای مبتنی بر سیلیکا، چه به صورت نفوذ سطحی و چه در قالب لایه‌های نازک همپوش، به طور پیوسته محیطی غنی از گروه‌های سیلانول ایجاد کرده‌اند که بستر لازم برای تقویت پیوندهای کلاسیک سیلانی را فراهم می‌کند. این ویژگی در نهایت به بهبود شاخص‌های استحکام باند پس از اعمال فرایندهای پیر سازی منجر شده و عملکردی برتر نسبت به سطوح صرفاً سندبلاست شده نشان داده است (۵۱، ۱۵).
سازمان دهی شیمی سیلیکا در قالب ساختارهای زیر سطحی گرادیدانی، به ویژه در زیرکونیای نفوذ یافته با شیشه، با افزایش چقرمگی شکست بین سطحی همراه گزارش شده است. در مطالعه Ramos و همکاران (۱۷)، انرژی شکست بین سطحی (Gc) به عنوان شاخص مقاومت فصل مشترک در برابر گسترش ترک ارزیابی شد. نتایج نشان دادند که در شرایط بارگذاری کششی خالص ($\theta = 0^\circ$)، گروه زیرکونیای نفوذ یافته با شیشه نسبت به گروه کنترل و گروه نفوذ سیلیکایی سل‌ژل انرژی شکست بالاتری داشت. همچنین، پس از پیر سازی حرارتی، در شرایط بارگذاری غالباً برشی ($\theta = 25^\circ$)، انرژی شکست بین سطحی در گروه کنترل و گروه سل‌ژل به طور معنی دار کاهش یافت، در حالی که گروه زیرکونیای نفوذ یافته با شیشه پایدار باقی ماند و مقدار Gc آن حدود 500 N/m گزارش شد. در مقایسه، مقادیر تقریبی گروه کنترل و سل‌ژل پس از پیر سازی به ترتیب حدود 40 و 80 N/m بود. این یافته نشان می‌دهد که در چنین سامانه‌هایی، درهم تیدگی مکانیکی با زیرلایه و قابلیت کوپلینگ شیمیایی می‌توانند به صورت هم زمان در چارچوب یک راهبرد واحد بهینه سازی شوند و به بهبود دوام اتصال رزین زیرکونیا کمک کنند.

به کارگیری طرح‌های مخلوط اکسیدی دامنه کاربرد را گسترش می‌دهد. میان لایه‌های حاصل از هم تراکم سل‌ژل زیرکونیا و سیلیکا با بهبود ترشوندگی سطح و تعدیل ناسازگاری‌های موضعی در فصل مشترک، در مقایسه با زیرکونیای بدون اصلاح، به استحکام باند بالاتری منجر شده‌اند (۱۹). این یافته‌ها، در کنار تحلیل‌های شبکه‌ای که بر پایداری عملکرد پس از پیر سازی تأکید دارند، ضرورت فاصله گرفتن از پیش تیمارهای صرفاً مکانیکی و حرکت به سوی راهبردهای مبتنی بر کنترل فرآیند را برجسته می‌سازند. با این حال، حساسیت این سامانه‌ها به توالی کاربرد پرایمرها و برنامه‌های حرارتی همچنان به عنوان یک عامل تعیین کننده باقی می‌ماند و باید به طور نظام‌مند در طراحی و تفسیر نتایج لحاظ شود (۲۱، ۲۰).

در حوزه نوری، سیلیکا با تخلخل مهندسی شده و لایه‌های ترکیبی سیلیکون و زیرکونیا دو راهبرد مکمل را شکل می‌دهند. سیلیکای زیرمیکرونی که تخلخل آن به صورت هدفمند تنظیم شده است، با کاهش ضریب شکست مؤثر در فصل مشترک با هوا و هموار سازی گرادیدان ضریب شکست به سمت زیرلایه، بازتاب فرنل را کاهش می‌دهد. هم زمان، در صورت اعمال تراکم دهی کنترل شده، استحکام و جلای سطحی حفظ می‌شود و بدین ترتیب تعادل میان شفافیت نوری و دوام مکانیکی برقرار می‌ماند (۱۰). در مقابل، شبکه‌های ترکیبی که در آن نانو دامنه‌های سرامیکی با ضریب شکست بالا در یک ماتریس اتصال عرضی شده جای می‌گیرند، ضمن حفظ شفافیت در برابر سایش، مقاومت در برابر آلودگی سطحی را نیز تقویت می‌کنند و امکان ایجاد لایه‌های نازک، شفاف و پایدار را بر روی بسترهای پلیمری یا هیبریدی ساخت رایانه‌ای فراهم می‌سازند (۳۰، ۱۱). همچنین، راهبردهای گرادیدانی سرامیکی زبان طراحی مناسبی برای هم زمان سازی گرادیدان‌های نوری و مکانیکی ارائه می‌دهند، به گونه‌ای که رفتار پایدار شده و پایداری جلای سطحی در پوشش‌های نازک به صورت هم زمان محقق می‌شود و حساسیت سامانه نسبت به تغییرات موضعی ضخامت یا تنش کاهش می‌یابد (۳۱).

در بعد ضد بیوفیلیم، دو خانواده سازوکار قابل تفکیک است. نخست، نانو لایه‌های فوتوکاتالیستی تیتانیا که از مسیرهای سل‌ژل مهندسی شده و از طریق دوپانت‌ها یا تنظیم عیوب ساختاری تعدیل می‌شوند، در شرایط نور مرئی گونه‌های فعال اکسیژن تولید می‌کنند و از این طریق چسبندگی اولیه باکتری‌ها را مهار می‌نمایند. کارایی این سازوکار هم در مقیاس

۲- ملاحظات مهندسی: توازن ها و قواعد طراحی

بر پایه شواهد موجود، سه دسته مصالحه مهندسی به صورت مکرر در طراحی نانو لایه‌های سل ژل مشاهده شده‌اند. نخستین مصالحه به رابطه میان کاهش ضریب شکست و حفظ سختی و مقاومت در برابر خراش مربوط می‌شود. کاهش ضریب شکست مؤثر از طریق افزایش تخلخل در ساختار سیلیکا عملکرد پایدار شده را تقویت می‌کند، اما در صورتی که تراکم لایه ناکافی باشد یا ضخامت بیش از حد کاهش یابد، خطر افت سختی و شکل‌گیری ریز ترک‌ها افزایش می‌یابد. برای مواجهه با این چالش، وارد سازی نانو دامنه‌های زیرکونیا در ساختارهای هیبریدی پیشنهاد شده است، زیرا این راهبرد مقاومت در برابر خراش را بازایی می‌کند و در صورت توزیع یکنواخت دامنه‌ها در مقیاس نانو، شفافیت لایه نیز حفظ می‌شود (۱۰،۳۰). دومین مصالحه مهندسی به پیوند میان فوتوکاتالیز و پایداری رنگ مربوط می‌شود. هرچند تیتانیا فعال شونده در محدوده نور مرئی توان مهار چسبندگی اولیه باکتری‌ها را نشان داده است، اما افزایش بیش از اندازه فعالیت کاتالیتیکی یا اعمال دوزهای نوری بالا می‌تواند به دگرگونی رنگ‌دانه‌ها یا افت جلای سطحی منجر شود. از این رو، گزینش نوع دوپانت و تنظیم دقیق شدت و مدت نوردهی باید متناسب با الزامات زیبایی شناختی ناحیه هدف انجام گیرد تا تعادل میان عملکرد ضد باکتری و ثبات نوری سطح حفظ شود (۳۲،۴۵). سومین مصالحه به تعادل میان تراکم میان فاز و شکندگی مربوط می‌شود. افزایش تراکم شبکه و کاهش گروه‌های هیدروکسیل باقیمانده، مقاومت هیدرولیتیکی را ارتقا می‌دهد، اما هم زمان تنش‌های ناشی از خشک شدن را افزایش داده و آمادگی برای ترک خوردگی را بیشتر می‌کند. در این چارچوب، به کارگیری ساختارهای هیبریدی و پشته‌های گرادانی یک راه حل میانی فراهم می‌آورد که با توزیع تدریجی تنش و ایجاد مسیرهای اتلاف انرژی انعطاف‌پذیر، خطر ایجاد و گسترش ترک‌ها را کاهش می‌دهد (۱۲،۳۱).

هنگامی که دوام ترمیم به طور هم زمان به پایداری مکانیکی و کاهش سایش آنتاگونیست وابسته باشد، کنترل روش اصلاح سطح و پرداخت نهایی زیرکونیای شفاف اهمیت ویژه‌ای دارد. در مطالعه آزمایشگاهی Alves و همکاران (۶۹)، ترمیم‌های زیرکونیایی تحت آزمون خستگی-سایش طولانی مدت قرار گرفتند و نشان داده شد که نفوذ سیلیکا می‌تواند سایش آنتاگونیست را کاهش دهد، به طوری که کاهش حجم آنتاگونیست در گروه زیرکونیای نفوذ یافته با سیلیکا حدود 0.64 mm^3 گزارش شد، در حالی که این مقدار در گروه گلیر شده حدود 1.19 mm^3 بود. با این حال، از آنجا که بقای ترمیم در همه گروه‌های نفوذ یافته یکسان نبود، استفاده از شیمی سیلیکا زمانی قابل دفاع است که فرآیند نفوذ، یکنواختی سطح و پرداخت نهایی به دقت کنترل شوند. در سامانه‌های باندینگ نیز شیشه‌های زیست فعال حاصل از فرایند سل ژل، چه به صورت افزودنی در چسب‌های عاجی و چه در قالب نانو لایه‌های سطحی، یک محور عملکردی مکمل شامل رمینرالیزاسیون و بافرینگ پی‌اچ معرفی کرده‌اند. این محور عملکردی به گونه‌ای طراحی شده است که بتواند به طور هم زمان با الزامات چسبندگی و ملاحظات نوری هم راستا شود و شواهد موجود نشان می‌دهند که ادغام این کارکردها در حال گذار از سطح مفهومی به راهبردهای قابل پیاده سازی در مواد ترمیمی است (۴،۲۳).

در چارچوب این سه گانه‌ها، امکان استخراج قواعد طراحی مبتنی بر شواهد فراهم می‌شود. برای مثال، زمانی که دوام باندینگ زیرکونیا تحت شرایط ترموسایکلینگ به عنوان اولویت طراحی مطرح باشد، ایجاد یک میان فاز سیلیکا از طریق نفوذ یا تشکیل یک فیلم نازک همپوش، همراه با سیلانیزاسیون و به کارگیری توالی پرایمر سازگار، توصیه می‌شود. همچنین در شرایطی که ترشوندگی ناکافی یا ناسازگاری موضعی مانع از

گسترش مناسب پرایمر بر سطح شود، استفاده از لایه‌های میان فازی زیرکونیا و سیلیکا به عنوان گزینه‌ای کارآمد و قابل اتکا مطرح می‌گردد (۱۹،۵۱). در شرایطی که زیبایی قدامی همراه با نیاز هم زمان به رفتار پایدار شده و مقاومت سایشی مدنظر قرار گیرد، به کارگیری لایه‌های هیبریدی سیلیکون و زیرکونیا مزیت عملکردی نشان می‌دهد. در صورت باقی ماندن اختلاف ضریب شکست در فصل مشترک با هوا، افزودن یک لایه بسیار نازک سیلیکا با تخلخل کنترل شده می‌تواند به هموار سازی گرادیان ضریب شکست و کاهش بازتاب سطحی کمک کند. با این حال، پس از اعمال چالش‌های بالینی شبیه سازی‌شده مانند مسواک زنی، ارزیابی مجدد میزان کدورت و حفظ براقیت سطح ضروری است تا اطمینان حاصل شود که بهبود نوری با افت دوام یا کیفیت ظاهری همراه نشده است (۱۰،۳۰). زمانی که هدف دستیابی به عملکرد ضد باکتری سطحی در نواحی مرئی مطرح باشد، به کارگیری تیتانیا دوپ شده همراه با نوردهی کالبره شده، به ویژه در موقعیت‌هایی که پایداری رنگ اهمیت بالایی دارد، گزینه‌ای مناسب به شمار می‌آید. در این رویکرد، تنظیم دقیق نوع دوپانت و رژیم نوردهی برای دستیابی به تعادل میان کارایی ضد باکتری و حفظ ویژگی‌های زیبایی شناختی ضروری است. به عنوان مسیر جایگزین، استفاده از هیبریدهای سیلیکایی حاوی یون‌های نقره یا روی با مقادیر کنترل شده مطرح می‌شود که امکان ایجاد اثر ضد باکتریایی مستقل از نور را فراهم می‌سازند، مشروط بر آنکه بارگذاری یونی و یکنواختی توزیع به گونه‌ای تنظیم شود که زیست سازگاری سلولی و پایداری رنگی سطح حفظ گردد (۷،۳۶).

از سوی دیگر، سایش و کیفیت پرداخت سطح به عنوان یکی از اهرم‌های کلیدی طراحی اهمیت می‌یابد. در زیرکونیای شفاف، تیمارهای مبتنی بر سیلیکا همراه با پولیش کامل، ضمن محدود سازی سایش دندان مقابل، مزایای شیمیایی میان فاز را حفظ می‌کنند. این هم زمانی به ویژه در ترمیم‌های خلفی که تحت بارگذاری‌های بالا قرار دارند، اهمیت بیشتری پیدا می‌کند و نشان می‌دهد که با کنترل دقیق فرآیند و پایان کاری، می‌توان سازگاری اکلوزالی را بدون چشم‌پوشی از عملکرد بین سطحی تأمین کرد (۶۹). افزون بر این، در موقعیت‌هایی که هدف، تقویت معدنی سازی مجدد است، به کارگیری شیشه‌های زیست فعال حاصل از فرایند سل‌ژل، چه به صورت افزودنی در سامانه‌های چسب و چه در قالب نانو لایه‌های خارجی نازک، مورد توجه قرار می‌گیرد. با این

حال، برای پیشگیری از بروز پدیده‌هایی مانند نرم شدگی سطح یا کاهش شفافیت، لازم است میان راهبردهای رهایش یونی، شیمی چسبندگی در فصل مشترک و پایداری نوری تعادل دقیقی برقرار شود تا عملکرد ترمیمی بدون افت خواص مکانیکی یا زیبایی شناختی حفظ گردد (۴،۲۳).

۳- دلالت‌های ترجمانی: باز تولید پذیری، کنترل کیفیت و مقیاس پذیری

باز تولید پذیری پوشش‌ها مستلزم تعریف پنجره‌های فرآیندی است که توان تحمل تغییرپذیری‌های آزمایشگاهی و تولیدی را داشته باشند. حساسیت سامانه‌های سل‌ژل به شرایط محیطی از جمله رطوبت و دما، همچنین به زمان پیرشدن سل و سرعت برداشت نمونه، ضرورت اعمال راهبردهای کنترلی مشابه خطوط صنعتی سل‌ژل را برجسته می‌سازد. این راهبردها شامل تنظیم دقیق نسبت پیش ماده‌ها، کنترل پی اچ محیط واکنش و طراحی برنامه‌های پخت مناسب می‌شود. مرورهای میان رشته‌ای نیز بر اهمیت به کارگیری ابزارهای پیش درون خطی و توسعه ساختارهای هیبریدی مقاوم به نقص تأکید کرده‌اند. ساختارهایی که توان جذب نوسانات جزئی فرآیندی را داشته و پایداری عملکردی پوشش را در مقیاس عملی تضمین می‌کنند (۶،۴۸). در کاربردهای دندان، روش دیپ کوتینگ برای پوشش دهی روکش‌ها و دیسک‌ها همچنان روشی عملی و قابل اتکا محسوب می‌شود، در حالی که اسپری کوتینگ برای هندسه‌های پیچیده تر و شرایط ترمیمی با دسترسی محدود مناسب‌تر ارزیابی می‌گردد. با این حال، در هر دو روش، کنترل دقیق ویسکوزیته سل و به کارگیری راهبردهای مناسب ماسک گذاری ضرورت دارد تا از تجمع بیش از حد پوشش در لبه‌ها، جاری شدن ناخواسته لایه و ایجاد ناهمگنی ضخامت جلوگیری شود. این ملاحظات فرآیندی نقش تعیین کننده‌ای در دستیابی به پوشش‌های یکنواخت، پایدار و قابل باز تولید ایفای می‌کنند (۱). پایداری بارگذاری‌های عملکردی در میان رده‌های گوناگون سامانه‌ها از اهمیت بنیادی برخوردار است. در هیبریدهای یون رها، غلظت نقره یا روی باید در بازه‌هایی تنظیم شود که هم با الزامات رنگی و هم با معیارهای زیست سازگاری هم‌خوانی داشته باشد. همچنین، محدود سازی رهایش به سازوکارهای انتشار کنترل شده می‌تواند از طریق طراحی ساختار حفره‌ای یا تنظیم شیمی پیوند میان یون‌ها و ماتریس انجام گیرد تا پایداری عملکردی در بلند مدت حفظ شود (۷۰،۷۱). در خصوص

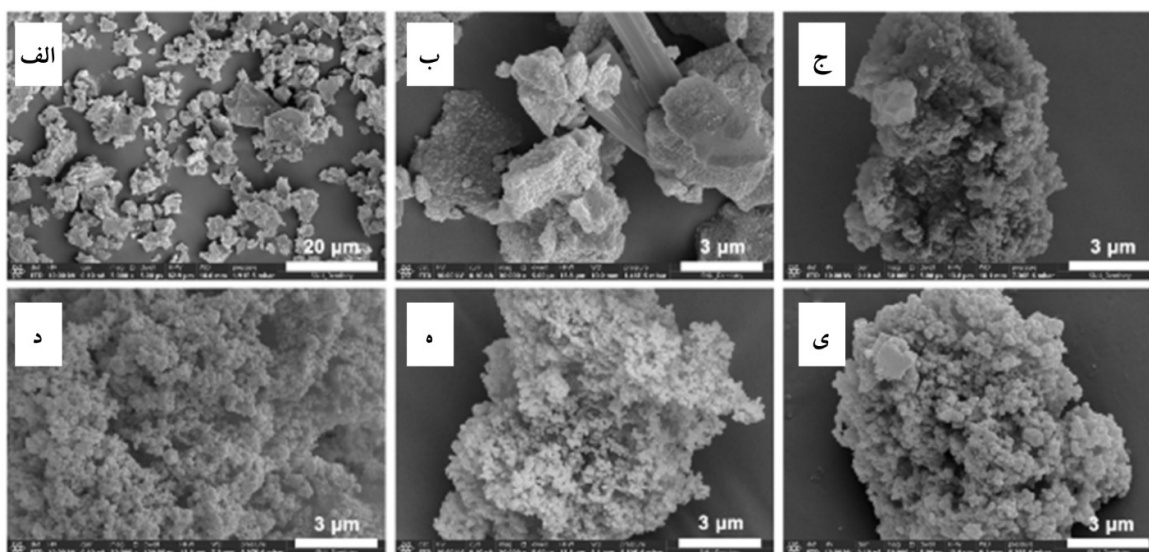
اثرات ضد باکتریایی در شرایط درون تنی با دشواری همراه خواهد بود (۳۲،۳۵). دستورالعمل‌های مهندسی فرابخشی توصیه می‌کنند که برای حفظ یکنواختی خروجی در مقیاس‌های متفاوت، از نقشه‌های فرایندی مدون همراه با حلقه‌های بازخورد کنترلی استفاده شود. این رویکرد امکان پایش و اصلاح پیوسته متغیرهای کلیدی را فراهم می‌سازد و نوسانات ناخواسته را مهار می‌کند. چنین منطقی به صورت مستقیم به خطوط فرایندی سل‌ژل برای ساخت قطعات دندان قابل انتقال است و زمینه استقرار تولید پایدار و باز تولید پذیر را فراهم می‌آورد (۶،۴۸).

در نهایت، هم‌خوانی با رویه‌های بالینی عامل تعیین کننده در پذیرش این راهبردها محسوب می‌شود. توالی‌های پیش تیمار لازم است با فرایندهای رایج مانند سندبلاست، سیلانیزاسیون و کاربرد پرایمر سازگار باقی بمانند تا زمان و پیچیدگی بالینی افزایش نیابد. تجربه حاصل از گزینه‌های مبتنی بر گلیر نشان داده است که آزمایشگاه‌ها و کلینیک‌ها مسیرهایی را ترجیح می‌دهند که بدون نیاز به تجهیزات اضافی قابل اجرا باشند و بتوانند در چارچوب گردش کار معمول ادغام شوند (۴۶،۵۷). در مورد اجزای ایمپلنتی، سابقه به کارگیری پوشش‌های سل‌ژل هیدروکسی‌آپاتیت و تیتانیای هیبریدی، زیست سازگاری این سامانه‌ها را به طور تجربی تأیید کرده است و زمینه‌ای برای شکل گیری انتظارات منطقی در خصوص پایداری بلند مدت و اُسیواینتگریشن فراهم ساخته است (۴۲،۷۵).

شیشه‌های زیست فعال، باز تولید پذیری ترکیب شیمیایی و مزوساختار به طور مستقیم بر فرایند معدنی‌سازی مجدد و یکپارچگی مکانیکی اثر می‌گذارد و از این رو گزارش استاندارد و دقیق ترکیب، سطح ویژه و شاخص‌های تخلخل برای امکان ارزیابی و مقایسه پذیری نتایج ضروری تلقی می‌شود (۷۲،۷۳). ریزنگاره‌های حاصل از میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی از دسته‌های مختلف بیوگلاس سل‌ژل، تفاوت‌های مورفولوژیک و الگوهای متنوع تجمع ذرات را در ترکیب‌های گوناگون نشان می‌دهند (شکل ۶).

افزون بر این، مسیرهای درجای سل‌ژل درون سامانه‌های رزینی که برای ماتریس‌های بیس‌جی‌ام‌ای و تکدما گزارش شده‌اند، به عنوان گزینه‌ای مکمل برای ادغام در مقیاس کارخانه مطرح هستند. هرچند این رویکرد، مسئولیت کنترل کیفیت را به فرایند نورپلیمریزه شدن و پایداری در دوره نگه داری منتقل می‌کند (۷۴).

در صورتی که فوتوکاتالیز به عنوان بخشی از طراحی در نظر گرفته شود، مشخصات تابش در سطح ترمیم باید به طور دقیق تعریف گردد. لایه‌های پاسخ گو به نور مرئی مبتنی بر تیتانیا مستلزم تعیین روشن بازه طول موج، شدت تابش و چرخه کاری در سطح ترمیم هستند، به ویژه با توجه به سایه اندازی ناشی از اکلوژن و هندسه ترمیم. شواهد ادبیات ایمپلنتی نشان داده‌اند که بدون تعریف دوز نوری دقیق، باز تولید پذیری



شکل ۶- ریزنگاره‌های نمایشی میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی از پودرهای بیوگلاس سل‌ژل (BAG) مورد استفاده در مطالعه باندینگ عاج؛ (الف و ب) BAG۴۵، نشان دهنده خوشه‌های بلوری درشت در بزرگنمایی کم ($\times 5,000$) و نمای با بزرگنمایی بالاتر؛ (ج - ی) بیوگلاس‌های سل‌ژل (BAG۷۹F، BAG۷۹، BAG۷، BAG۷۹) که تجمع‌هایی از دانه‌های بسیار ریز (حدود ۵۰ تا ۱۰۰ نانومتر) را نشان می‌دهند (۲۳)

۴- محدودیت‌های شواهد و ریسک سوگیری

بخش قابل توجهی از پژوهش‌های مربوط به چسبندگی همچنان در شرایط آزمایشگاهی، با تعداد نمونه‌های محدود، دوره‌های کوتاه پیر سازی و شیوه‌های ناهمسان در برخورد با شکست‌های پیش از آزمون انجام شده‌اند. عواملی که به افزایش پراکندگی نتایج و کاهش قابلیت تعمیم آن‌ها منجر شده‌اند. مرورهای منتشر شده نشان داده‌اند که برتری ظاهری یک پیش‌تیمار نسبت به پیش‌تیمار دیگر ممکن است در صورت تغییر رژیم‌های ترموسایکلینگ یا تفاوت در ترکیب سمان از میان برود. بر این اساس، تفسیر نتایج باید همواره وابسته به دقت در اجرای پروتکل‌ها و شرایط آزمون در نظر گرفته شود و از تعمیم شتاب‌زده یافته‌ها پرهیز گردد (۲۰،۲۶). در پژوهش‌های نوری، در بسیاری از موارد تنها تغییرات نسبی گزارش شده‌اند، بی‌آنکه هندسه تابش، ضخامت نمونه یا مقادیر پایه براقت به صورت کامل و شفاف مستند سازی شده باشند. کاستی‌ای که تعمیم و انتقال نتایج حاصل از کوپن‌های تخت به روکش‌های با سطوح منحنی را با دشواری مواجه می‌سازد (۱۰،۲۸). پژوهش‌های مرتبط با رفتار ضد بیوفیلیم، با وجود گزارش نتایج امیدوار کننده، از نظر انتخاب سویه‌های میکروبی، تراکم تلقیح و رژیم‌های نوری به کار رفته دامنه‌ای بسیار متنوع را پوشش می‌دهند. این ناهمگونی سبب می‌شود که در غیاب مدل‌های استاندارد و تنظیم یکسان دوز، مقایسه مستقیم اندازه اثرهای گزارش شده میان مطالعات مختلف امکان پذیر نباشد و تفسیر نتایج نیازمند احتیاط روشمند باقی بماند (۴۱،۴۵).

در حوزه شیشه‌های زیست فعال، بخش قابل توجهی از شواهد موجود بر شاخص‌های جانشین یا مدل‌های برون‌بدنی تکیه دارد و تحلیل‌های کتاب سنجی نشان می‌دهند که افزایش شتاب استنادی لزوماً معادل آمادگی ترجمانی نیست. این وضعیت بر ضرورت استاندارد سازی دقیق فرایندهای مشخصه یابی و انجام اعتبارسنجی‌های بلند مدت در شرایط درون جایگاهی تأکید می‌کند تا قابلیت انتقال نتایج به کاربردهای بالینی به صورت قابل اتکا ارزیابی شود (۷۶،۷۷). بررسی‌های گسترده‌تر پیرامون پوشش‌های ضد میکروبی مورد استفاده در تجهیزات پزشکی نیز به وجود سوگیری انتشار به نفع نتایج مثبت و کم گزارش شدن حدود زیست سازگاری اشاره کرده‌اند. این ملاحظات باید هنگام تعمیم نتایج به سطوح ترمیمی دندان‌ها با دقت و احتیاط مورد توجه قرار گیرند (۴۹،۵۰).

۵- مسیرهای آینده

سه اولویت فوری می‌توانند مسیر توسعه این حوزه را تقویت کنند. نخست، استاندارد سازی گزارش‌دهی و آزمون‌های پیر سازی متناسب با میان‌فازهای سل‌ژل بر بسترهای دندان‌ها ضرورت دارد. این استاندارد سازی باید شامل ثبت دقیق هویت و نسبت پیش ماده‌ها، نوع کاتالیست و مقدار پی‌اچ، نسبت آب به آلکوکسید و ترکیب حلال، زمان پیری یا ویسکوزیته سل در هنگام پوشش دهی، پارامترهای رسوب دهی، برنامه‌های پخت، ضخامت و زبری فیلم، نوع و هندسه آزمون‌های چسبندگی و نحوه مدیریت شکست‌های پیش آزمون باشد. افزون بر این، در ادعاهای مرتبط با عملکرد نوری و رفتار ضد بیوفیلیم، لازم است جزئیات پروتکل‌های نوردهی، شرایط رنگ‌گذاری و آزمون‌های سایش به طور کامل و شفاف گزارش شوند تا امکان مقایسه پذیری و باز تولید پذیری نتایج فراهم گردد (۶،۲۶).

دومین اولویت، تمرکز هم زمان بر مهندسی پشته‌های گرادینای ضریب شکست همراه با کارکرد ضد بیوفیلیم است. دستیابی به این هدف از طریق ترکیب لایه‌های رویی سیلیکا با تخلخل کنترل شده و لایه‌های زیرین هیبریدی حاوی تیتانیا اصلاح شده یا مخازن یونی نقره و روی امکان پذیر گزارش شده است. در گام بعد، کمی سازی رابطه میان پارامترهای نوری، ویژگی‌های مکانیکی و رفتار ضد بیوفیلیم تحت شرایط شبیه سازی شده مانند مسواک زنی و ترموسایکلینگ ضرورت دارد، زیرا این ارزیابی‌ها حدود دوام و پایداری عملکردی چنین پوشش‌هایی را به صورت واقع گرایانه مشخص می‌سازند (۱۰،۳۰).

اولویت سوم به ارزیابی عملی بودن فوتو کاتالیز در محدوده نور مرئی اختصاص دارد. تحقق این هدف مستلزم ترسیم دقیق نقشه دوز نوری در سطح ترمیم، با در نظر گرفتن عواملی مانند سایه اندازی ناشی از اکلوژن و الگوهای واقعی نوردهی روزانه است. افزون بر این، بررسی نظام‌مند رابطه دوز و پاسخ در پیوند با پایداری رنگ و براقت ضرورت دارد. دستیابی به چنین داده‌هایی چارچوبی معتبر برای تعریف بازه‌های عملکرد ایمن در نواحی زیبایی فراهم می‌کند (۳۲،۳۵).

در افق بلند مدت، همگرایی شیشه‌های زیست فعال حاصل از فرایند سل‌ژل با اهداف چسبندگی و ویژگی‌های نوری، نیازمند کارآزمایی‌های کنترل شده‌ای است که در آن‌ها معدنی سازی مجدد، دوام باند و شفافیت به صورت هم زمان و در یک سامانه واحد ارزیابی شوند. چنین رویکردی امکان سنجش برهم‌کنش متقابل این کارکردها را در شرایط نزدیک به

هیبریدهای سیلیکا حاوی نقره یا روی استفاده کرد که در صورت به کارگیری بارگذاری محافظه کارانه، اثرات ضد باکتریایی مستقل از نور را بدون آسیب به ویژگی‌های زیبایی شناختی فراهم می‌کند (۷۰،۳۲). در طراحی‌های یون‌زا نیز لازم است میزان بارگذاری در بازه‌های سازگار با پایداری رنگ و زیست سازگاری کنترل شود و رهایش یون‌ها از طریق طراحی معماری حفرات یا تنظیم شیمی پیوند با ماتریس به صورت هدفمند تنظیم گردد (۷۰،۷۱).

از سوی دیگر، پوشش‌ها باید در پنجره‌های فرآیندی مطمئن پایدارسازی شوند. این الزام مستلزم تعریف دقیق نسبت پیش ماده‌ها، مقدار پی‌اچ، نسبت آب به آلکوکسید، زمان پیری سل، سرعت برداشت و برنامه‌های پخت است. در این مسیر، پایش درون خطی برای کنترل رطوبت و ویسکوزیته به منظور تضمین یکنواختی و باز تولید پذیری نتایج توصیه می‌شود (۶۰،۴۸). در ارائه نتایج، بیان دقیق هندسه آزمون‌های چسبندگی و روش برخورد با شکست‌های پیش از آزمون الزامی است. همچنین، هرگونه ادعای نوری باید با گزارش کامل شاخص‌ها شامل شفافیت، تغییرات رنگ، میزان کدورت یا عبور نور و براقت سطح، به همراه تشریح شرایط نوردی استاندارد، به صورت مستند ارائه شود (۲۶،۲۸). در نهایت، در زیرکونیای نواحی خلفی که تحت بارگذاری‌های بالا قرار دارند، تلفیق تیمارهای شیمیایی با پرداخت و پولیش دقیق اهمیت اساسی دارد، زیرا این رویکرد ضمن کاهش سایش دندان آنتاگونیست، مزایای ایجاد شده در میان فاز را نیز به طور پایدار حفظ می‌کند (۶۹).

نانو لایه‌های سرامیکی سل‌ژل با فراهم سازی مسیرهای فرآیندی کنترل شده، دامنه عملکرد سامانه‌های ترمیمی را گسترش می‌دهند و امکان تنظیم دقیق شیمی میان فاز، پاسخ‌های نوری و رفتار بیوفیلم‌های اولیه را در ضخامت‌های زیرمیکرونی ایجاد می‌کنند. در چارچوب رابطه ساختار، فرآیند، خواص، عملکرد سه اهرم اصلی شامل انتخاب پیش ماده، پروتکل نشانند و برنامه تراکم دهی در دمای پایین، به طور مستقیم شبکه، تخلخل و کارکرد سطحی لایه را تعیین می‌کنند. این عوامل به نوبه خود بر دوام باند در سرامیک‌های فاقد فاز شیشه‌ای، هم خوانی ضریب شکست و پراکندگی نور در سطوح منحنی، و نیز رفتارهای ضد بیوفیلم مبتنی بر فوتوکاتالیز یا رهایش یونی اثر می‌گذارند. شواهد موجود نشان می‌دهند که هم ترازای این اهرم‌ها، بدون نیاز به تغییرات اساسی در فرمولاسیون توده‌ای مواد ترمیمی، به ایجاد میان فازهای دارای قابلیت کوپلینگ شیمیایی

کاربرد فراهم می‌کند و از تعمیم‌دادن نتایج تک محوره جلوگیری می‌نماید. مسیر طراحی و بهینه سازی این سامانه‌ها می‌تواند با تکیه بر دستورالعمل‌های تنظیم ترکیب و ریز ساختار که در ادبیات شیشه‌های زیست فعال ارائه شده‌اند هدایت شود تا تعادل میان رهایش یونی، پایداری نوری و یکپارچگی مکانیکی به طور نظام‌مند برقرار گردد (۲۳،۷۳). بهره گیری از ابزارهای مدل‌سازی در حوزه مکانیک سطح می‌تواند در پیش بینی نواحی آغاز ریز ترک‌ها تحت بارگذاری‌های چرخه‌ای نقش مؤثری ایفا کند و به طراحی فیلم‌هایی بینجامد که با انحراف مسیر نوارهای لغزش پایدار یا توزیع تنش در پشته‌های گرادانی، تمرکز تنش را کاهش دهند. چنین رویکردی امکان پالایش طرح‌های پوششی را پیش از ورود به مرحله ارزیابی‌های بالینی فراهم می‌سازد و ریسک شکست‌های زود هنگام را در شرایط عملکردی کاهش می‌دهد (۳۱،۷۸). نهایتاً، ارزیابی نظام‌مند مجموعه‌ای از فرمولاسیون‌ها از تیتانیاهای دوپ شده و هیبریدهای یون‌دار، با لحاظ کردن شاخص‌های زیست سازگاری و رنگ، می‌تواند فرایند شناسایی فرمولاسیون‌هایی را تسریع کند که قادرند میان مزایای ضد باکتریایی و پایداری زیبایی مکانیکی تعادل برقرار سازند (۵۶۸).

نکات کاربردی حاصل از مرور شواهد نشان می‌دهد که برای دستیابی به چسبندگی پایدار به زیرکونیا، به کارگیری یک میان فاز سیلیکا، چه به صورت نفوذی و چه در قالب یک فیلم نازک همپوش، همراه با سیلانیزاسیون، باید در اولویت قرار گیرد. در شرایطی که ترشوندگی ناکافی یا ناسازگاری سطحی مانع گسترش یکنواخت پرایمر می‌شود، استفاده از لایه‌های مخلوط زیرکونیا و سیلیکا به عنوان گزینه‌ای مناسب مطرح است و می‌تواند پخش پرایمر و در نتیجه کیفیت اتصال را بهبود بخشد (۱۹،۵۱). برای دستیابی به رفتار پایدار شده بدون افت در مقاومت سایشی، استفاده از هیبریدهای سیلیکون و زیرکونیا توصیه می‌شود. در صورت نیاز، افزودن یک لایه فوق نازک سیلیکا با تخلخل کنترل شده به عنوان پوشش نهایی می‌تواند اختلاف ضریب شکست را کاهش دهد. در این حالت، ارزیابی میزان کدورت و براقت پس از آزمون‌های شبیه سازی مسواک زنی ضروری است تا پایداری نوری سطح در شرایط کاربردی اطمینان بخش باقی بماند (۱۰،۳۰).

در سطوح مرئی که عملکرد ضد باکتریایی اهمیت دارد، لازم است دوز تیتانیای فعال شونده با نور مرئی به گونه‌ای کالیبره شود که پایداری رنگ و براقت سطحی حفظ شود. به عنوان مسیر جایگزین، می‌توان از

بر روی زیرکونیا، لایه‌های شفاف و مقاوم به سایش بر بسترهای پلیمری یا سرامیکی، و اثرات ضد باکتری سطح محور منجر می‌شود.

برای دستیابی به اهداف نوری، دو راهبرد مکمل قابل توصیه است. راهبرد نخست بر استفاده از سیلیکای با تخلخل تنظیم شده استوار است که با کاهش ضریب شکست مؤثر در فصل مشترک با هوا، گرادیان نوری را هموار کرده و بازتاب سطحی را محدود می‌سازد. راهبرد دوم بر بهره‌گیری از شبکه‌های هیبریدی، مانند سامانه‌های سیلیکونی حاوی نانو دامنه‌های با ضریب شکست بالا، تمرکز دارد که قادرند شفافیت زیاد را در کنار مقاومت در برابر خراش و حفظ براقت در برابر مسواک زنی فراهم کنند. تحمل تغییرات ضخامت زمانی بهبود می‌یابد که گرادیان ضریب شکست به صورت تدریجی شکل گیرد؛ از این رو تنظیم دقیق پارامترهای رسوب دهی برای ایجاد فیلم‌هایی با ضخامت متوسط، پیوسته و عاری از نقص ضروری است، زیرا لایه‌های بیش از حد نازک و شکننده معمولاً پایداری نوری و مکانیکی مطلوبی از خود نشان نمی‌دهند.

از دیدگاه رفتار ضد بیوفیلم، به کارگیری تیتانیا پاسخ گو به نور مرئی در نواحی دارای دسترسی نوری و پذیرش زیبایی شناختی، کارایی قابل قبولی ایجاد می‌کند. در مقابل، ماتریس‌های سیلیکا یا هیبریدهای یون‌دار حاوی نقره یا روی در شرایطی که پایداری رنگ اولویت بالاتری دارد، امکان کنترل ضد باکتری مستقل از نور را فراهم می‌سازند. در هر دو راهبرد، میزان بارگذاری و الگوی توزیع فضایی باید به گونه‌ای تنظیم شود که انسجام فیلم حفظ گردد و پیامدهای نامطلوب نوری به حداقل برسد. افزون بر این، عناصر ضد باکتری لازم است در یک ناحیه سطحی با ضخامت در مقیاس ده‌ها تا صدها نانومتر محصور شوند و در صورت نیاز، با یک لایه نازک سیلیکا با ضریب شکست پایین محافظت گردند تا هم دوام ساختاری و پایداری نوری تضمین شود. قابلیت باز تولید این سامانه‌ها به تعریف دقیق و پایداری سخت گیرانه به پنجره‌های فرآیندی مشخص وابسته است. دست کم لازم است هویت و نسبت پیش ماده‌ها، مقدار پی‌اچ و نسبت آب به آلوکسید، زمان پیری یا ویسکوزیته سل در لحظه نشانند، سرعت برداشت در نشانند غوطه وری یا پارامترهای نشانند پاششی، و همچنین برنامه‌های پخت به طور شفاف تعیین و به صورت مداوم پایش شوند. ضخامت و زبری لایه نیز باید به صورت روتین اندازه گیری شوند، زیرا این دو پارامتر نسبت به تغییرات نانومتری بسیار حساس بوده و به طور مستقیم بر دوام باند و عملکرد نوری

اثر می‌گذارند. تغییرپذیری میان دسته‌های مختلف را می‌توان با پایش درون خطی ویسکوزیته سل و رطوبت محیط و نیز با طراحی شبکه‌های هیبریدی دارای تحمل عیب، در محدوده قابل قبول نگه داشت.

در مورد زیرکونیا، پیش‌تیمارهای شیمیایی لازم است به گونه‌ای با فرآیندهای متداول سندبلاست یا پولیش ادغام شوند که نه سایش دندان مقابل تشدید گردد و نه زمان بالینی افزایش یابد. در شرایطی که فوتوکاتالیز به عنوان بخشی از طراحی مدنظر قرار می‌گیرد، تعیین دقیق دوز نور در سطح ترمیم شامل طول موج، شدت تابش، چرخه کاری و اثر سایه اندازی ناشی از اکلوزن اهمیت اساسی دارد و ادعاهای ضد باکتریایی باید مستقیماً به این بازه‌های تنظیم دوز ارجاع داده شوند. در نهایت، پذیرش آزمایشگاهی و عملی چنین سامانه‌هایی به سادگی و قابلیت اجرای پروتکل وابسته است، به گونه‌ای که روش‌هایی مانند نشانند غوطه وری یا نشانند پاششی تنها زمانی کاربردی باقی می‌مانند که چالش‌های مربوط به ماسک‌گذاری و کنترل افزایش ضخامت در لبه‌ها، به ویژه در هندسه‌های پیچیده، به درستی مدیریت شوند.

با وجود مزایای مطرح‌شده، این حوزه با محدودیت‌های معنی داری نیز رو به رو است. بخش قابل توجهی از شواهد موجود همچنان بر مطالعات آزمایشگاهی برون تنی استوار است که اغلب با تعداد نمونه محدود، برنامه‌های پیر سازی کوتاه‌مدت یا ساده‌سازی شده و شیوه‌های ناهمگون در برخورد با شکست‌های پیش آزمون همراه هستند. در حوزه ارزیابی‌های نوری نیز، استفاده هم زمان از شاخص‌ها و هندسه‌های متفاوت گزارش شده است که مقایسه مستقیم نتایج میان مطالعات مختلف را دشوار می‌سازد. افزون بر این، ارزیابی‌های ضد باکتریایی از نظر انتخاب سوبه‌های میکروبی، شرایط شبیه سازی بزاق و پارامترهای نوردهی یکنواخت نیستند و همین ناهمسانی، قابلیت تعمیم نتایج را محدود می‌کند. این ملاحظات منطق مهندسی نانو لایه‌های سل‌ژل را نقض نمی‌کنند، اما به روشنی نشان می‌دهند که هر ادعای عملکردی به پایداری دقیق به پروتکل وابسته است و اعتبار آن تنها در صورتی قابل اتکا خواهد بود که تحت شرایط کاربردی مشخص و به‌خوبی تعریف‌شده راستی‌آزمایی شود.

برای آینده، چند مسیر کلیدی می‌توانند ترجمان بالینی این رویکرد را تسریع کنند. نخست، تدوین یک فهرست کنترلی مشترک برای گزارش دهی و آزمون‌های پیر سازی میان فازهای سل‌ژل بر روی بسترهای دندان‌ی ضرورت دارد. فهرستی که شیمی پیش ماده‌ها، شرایط

مطالعات بلند مدت برای بررسی دوام رنگ و شفافیت تحت شرایط ترکیبی رنگ پذیری، ساییش و ترموسایکلینگ ضروری است. مطالعاتی که باید با استفاده از نمونه‌های یکسان، چسبندگی، ویژگی‌های نوری و عملکرد ضد بیوفیلم را به طور هم زمان ارزیابی کنند تا مصالحه‌های میان این عوامل به صورت مستقیم و قابل مقایسه روشن شوند.

در جمع بندی، نانو لایه‌های سرامیکی سل ژل را می‌توان به عنوان یک ابزار مهندسی چند منظوره تلقی کرد. مجموعه‌ای از شیمی‌های سازگار و اهرم‌های کنترل فرآیندی که امکان تقویت هدفمند میان فازهای ترمیمی، تنظیم ویژگی‌های نوری و تعدیل رفتار زیستی را فراهم می‌سازند. بیشترین قابلیت اتکا زمانی حاصل می‌شود که ساختار لایه به طور آگاهانه با نوع زیرلایه و قیود بالینی هم راستا انتخاب شود و کنترل کیفیت نه به عنوان یک ملاحظه ثانویه، بلکه به مثابه یک متغیر طراحی بنیادی در کل فرآیند لحاظ گردد.

References:

- 1- Song X, Segura-Egea JJ, Díaz-Cuenca A. Sol-Gel Technologies to Obtain Advanced Bioceramics for Dental Therapeutics. *Molecules*. 2023;28(19):6967.
- 2- Barrino F. Hybrid Organic-Inorganic Materials Prepared by Sol-Gel and Sol-Gel-Coating Method for Biomedical Use: Study and Synthetic Review of Synthesis and Properties. *Coatings*. 2024;14(4):425.
- 3- Shoushtari MS, Hoey D, Biak DRA, Abdullah N, Kamarudin S, Zainuddin HS. Sol-gel-templated bioactive glass scaffold: a review. *Research on Biomedical Engineering*. 2024;40(1):281-96.
- 4- Simila HO, Boccaccini AR. Sol-gel bioactive glass containing biomaterials for restorative dentistry: A review. *Dent Mater*. 2022;38(5):725-47.
- 5- Kim S-W, Hou Y-I, Madhan K, Senthilkumar K, Kim H-S, Kim W-J. Sol-Gel nano TiO₂ synthesis using TTIP: Latest trends, a comprehensive review of attribute optimization and various applications. *Materials Today*. 2025;88:457-78.
- 6- Kaliyannan GV, Velmurugan PS, Priyanka EB, Thangavel S, Sivaraj S, Rathanasamy R. Investigation on sol-gel based coatings application in energy sector – A review. *Materials Today: Proceedings*. 2020;45(11):1138-43.
- 7- Rivero PJ, Urrutia A, Goicoechea J, Zamarreño CR, Arregui FJ, Matías IR. An antibacterial coating based on a polymer/sol-gel hybrid matrix loaded with silver nanoparticles. *Nanoscale Res Lett*. 2011;6(1):305.
- 8- Ćurković L, Briševac D, Ljubas D, Mandić V, Gabelica I. Synthesis, Characterization, and Photocatalytic Properties of Sol-Gel Ce-TiO₂ Films. *Processes*. 2024;12(6):1144.
- 9- Zenji T, Obata A, Kasuga T. Calcium silicate sol-gel derived amorphous materials incorporating silver, zinc, or copper ions: Effects of ion type and sample amount on antibacterial properties and cell compatibility. *Dent Mat J*. 2026;45(1):29-37.

رسوب دهی، برنامه‌های پخت، شاخص‌های توصیف فیلم، هندسه آزمون، نحوه مدیریت شکست‌های پیش آزمون و مجموعه کامل سنج‌های نوری و ضد بیوفیلم را دربرگیرد. دوم، هم مهندسی پشته‌های گرادینانی ضریب شکست همراه با عملکرد ضد بیوفیلم یکپارچه اهمیت ویژه‌ای دارد. این هدف از طریق ترکیب لایه‌های نهایی سیلیکا با تخلخل تنظیم شده بر روی هیبریدهای مقاوم به ساییش حاوی تیتانیا اصلاح شده یا مخازن یونی قابل دستیابی است و لازم است با ارزیابی هم زمان رفتار نوری، مکانیکی و بیوفیلم تحت شرایط شبیه سازی شده‌ای مانند مسواک زنی و ترموسایکلینگ سنجش شود. سوم، تعیین عملی بودن فوتوکاتالیز در محدوده نور مرئی از طریق نقشه برداری دقیق دوز نوری در سطح ترمیم و ارتباط آن با پیامدهای ضد باکتری و پایداری رنگ و براقیت در طیف‌های رنگی و هندسه‌های متفاوت، از اولویت‌های اساسی محسوب می‌شود. چهارم، توسعه

- 10- Lu M, Liu Q, Wang Z, Zhang X, Luo G, Lu J, et al. Facile preparation of porous SiO₂ antireflection film with high transmittance and hardness via self-templating method for perovskite solar cells. *Materials Today Chemistry*. 2023;29:101473.
- 11- Zhang B, Xia R, Yan Y, Liu J, Guan Z. Highly Transparent and Zirconia-Enhanced Sol-Gel Hybrid Coating on Polycarbonate Substrates for Self-Cleaning Applications. *Materials (Basel)*. 2023;16(8):3138.
- 12- Malucelli G. Hybrid Organic/Inorganic Coatings Through Dual-Cure Processes: State of the Art and Perspectives. *Coatings*. 2016; 6(1):10.
- 13- El Feghaly A, Nasr E, Lukomska-Szymanska M, Zmysłowska-Polakowska E, Najjar G, Harouni R, et al. Effect of different surface treatments on the bond strength of zirconia to resin cement. An in vitro study. *Front Dent Med*. 2026;7:1778379.
- 14- Kobayashi K, Shimabukuro M, Ikeda M, Ushijima K, Hiraishi N, Kawashita M, et al. Enhancement of zirconia-resin bonding by water glass surface treatment. *Clin Oral Investig*. 2026;30(2):78.
- 15- Lung CYK, Kuk E, Matinlinna JP. The effect of silica-coating by sol-gel process on resin-zirconia bonding. *Dent Mater J*. 2013;32(1):165-72.
- 16- Campos TM, Ramos NC, Machado JP, Bottino MA, Souza ROA, Melo RM. A new silica-infiltrated Y-TZP obtained by the sol-gel method. *J Dent*. 2016;48:55-61.
- 17- Ramos NC, Kaizer MR, Campos TMB, Kim J, Zhang Y, Melo RM. Silica-Based Infiltrations for Enhanced Zirconia-Resin Interface Toughness. *J Dent Res*. 2019;98(4):423-9.
- 18- Shakir Z, Rashid M, Saeed MA. The effect of zirconia dipping time frequencies with different nanoparticles suspension

- on the micro-shear bond strength of zirconia to resin cement. *J Baghdad College Dent.* 2025;37:10-20.
- 19- He W, Ding N, Hou B, Zhang Z. Bonding effect of a Zr/Si coating prepared on zirconia using a sol-gel method. *J Prosthet Dent.* 2023;129(5):787.e1-787-e9.
- 20- Li X, Liang S, Inokoshi M, Zhao S, Hong G, Yao C, et al. Different surface treatments and adhesive monomers for zirconia-resin bonds: A systematic review and network meta-analysis. *Jap Dent Sci Rev.* 2024;60:175-89.
- 21- Lara-Hernández LC, Jiménez-Borrego LC, Roa NS. Effectiveness of Silica Coatings in Enhancing Resin Cement Adhesion to Zirconia: A Systematic Review. *Dent J (Basel).* 2025; 13(9):426.
- 22- Ruud CJ, Cleri A, Maria J-P, Giebink NC. Ultralow Index SiO₂ Antireflection Coatings Produced via Magnetron Sputtering. *Nano Lett.* 2022;22(18):7358-62.
- 23- Park IS, Kim HJ, Kwon J, Kim DS. Comparative In Vitro Study of Sol-Gel-Derived Bioactive Glasses Incorporated into Dentin Adhesives: Effects on Remineralization and Mechanical Properties of Dentin. *J Funct Biomater.* 2025;16(1):29.
- 24- Tassery H, Sauro S, Slimani A. Bioactive and Ion-releasing materials in minimum intervention dentistry: a clinical pathway from prevention to restorative treatment. *Front Dent Med.* 2026;7:1739208.
- 25- Yun J, Burrow MF, Matinlinna JP, Wang Y, Tsoi JKH. A Narrative Review of Bioactive Glass-Loaded Dental Resin Composites. *J Funct Biomater.* 2022;13(4):208.
- 26- Rigos AE, Sarafidou K, Kontonasaki E. Zirconia bond strength durability following artificial aging: A systematic review and meta-analysis of in vitro studies. *Jap Dent Sci Rev.* 2023;59:138-59.
- 27- Lima RBW, Leite JVC, Santos JVdN, Barbosa LMM, Neto HNM, da Silva JGR, et al. Tribochemical silica-coating or alumina blasting for zirconia bonding? A systematic review of in vitro studies. *Int J Adhesion Adhesives.* 2024;129:103554.
- 28- Oivanen M, Keulemans F, Garoushi S, Vallittu PK, Lassila L. The effect of refractive index of fillers and polymer matrix on translucency and color matching of dental resin composite. *Biomater Investig Dent.* 2021;8(1):48-53.
- 29- Li C, Yang J, He J. Mechanically robust, high-transmittance bilayer sol-gel anti-reflective coating with down-shifting function. *Applied Surface Sci.* 2026;724:165716.
- 30- Sun J, Duan J, Liu C, Liu X, Zhu Y, Zhai X, et al. Transparent and mechanically durable silicone/ZrO₂ sol hybrid coating with enhanced antifouling properties. *Chemical Engin J.* 2024;490:151567.
- 31- Gali S, Gururaja S, Patel Z. Methodological approaches in graded dental ceramics. *Dent Mater.* 2024;40(5):e1-e13.
- 32- Zhou M, Zhang X, Quan Y, Tian Y, Chen J, Li L. Visible light-induced photocatalytic and antibacterial adhesion properties of superhydrophilic TiO₂ nanoparticles. *Sci Rep.* 2024;14(1):7940.
- 33- Guo Z, Liu H, Wang W, Hu Z, Li X, Chen H, et al. Recent Advances in Antibacterial Strategies Based on TiO₂(2) Biomimetic Micro/Nano-Structured Surfaces Fabricated Using the Hydrothermal Method. *Biomimetics (Basel).* 2024;9(11):656.
- 34- Wang W, Liu H, Guo Z, Hu Z, Wang K, Leng Y, et al. Various Antibacterial Strategies Utilizing Titanium Dioxide Nanotubes Prepared via Electrochemical Anodization Biofabrication Method. *Biomimetics (Basel).* 2024;9(7):408.
- 35- Areid N, Abushahba F, Riivari S, Närhi T. Effect of TiO₂(2) Abutment Coatings on Peri-Implant Soft Tissue Behavior: A Systematic Review of In Vivo Studies. *Int J Dent.* 2024;2024:9079673.
- 36- Kawashita M, Tsuneyama S, Miyaji F, Kokubo T, Kozuka H, Yamamoto K. Antibacterial silver-containing silica glass prepared by sol-gel method. *Biomaterials.* 2000;21(4):393-8.
- 37- Motelica L, Vasile BS, Ficai A, Surdu AV, Ficai D, Oprea OC, et al. Antibacterial Activity of Zinc Oxide Nanoparticles Loaded with Essential Oils. *Pharmaceutics.* 2023;15(10):2470.
- 38- Pushpalatha C, Suresh J, Gayathri VS, Sowmya SV, Augustine D, Alamoudi A, et al. Zinc Oxide Nanoparticles: A Review on Its Applications in Dentistry. *Front Bioeng Biotechnol.* 2022;10:917990.
- 39- Huynh Luu N-D, Nguyen T-P, Dang T-L-H. Sol-gel derived silica-based 58S bioactive glass as a carrier for *Andrographis paniculata* extract in antibacterial dental applications. *RSC Adv.* 2026;16(8):7163-77.
- 40- Mansoor A, Mehmood M, Ishtiaq M, Jamal A. Synthesis of TiO₂(2) nanoparticles and demonstration of their antagonistic properties against selected dental caries promoting bacteria. *Pak J Med Sci.* 2023;39(5):1249-54.
- 41- Aziz S, Javed R, Nowak A, Liaqat S, Khan ZUH, Ahmad N, et al. Effects of TiO₂, Ag-TiO₂, and Cu-TiO₂ nanoparticles on mechanical and anticariogenic properties of conventional pit and fissure sealants. *OpenNano.* 2023;14:100185.
- 42- Tang W, Fischer NG, Kong X, Sang T, Ye Z. Hybrid coatings on dental and orthopedic titanium implants: Current advances and challenges. *BMEMat.* 2024;2(4):e12105.
- 43- Knaisslová A, Horkavcová D, Jablonská E, Vojtěch D. Sol-gel TiO₂-based coatings in 3D printed porous Ti-6Al-4V alloy structures as efficient antibacterial drug delivery systems: Thorough structural and biological characterization. *Applied Surface Sci Adv.* 2025;29:100816.
- 44- Gatou M-A, Syrrakou A, Lagopati N, Pavlatou EA. Photocatalytic TiO₂-Based Nanostructures as a Promising Material for Diverse Environmental Applications: A Review. *Reactions.* 2024;5(1):135-94.
- 45- Mohammadi H, Moradpoor H, Beddu S, Mozaffari HR, Sharifi R, Rezaei R, et al. Current trends and research advances on the application of TiO₂(2) nanoparticles in dentistry: How far are we from clinical translation? *Heliyon.* 2025;11(3):e42169.
- 46- Skienhe H, Abdou A, Matinlinna JP, Ferrari M, Salameh Z. Effect of low-fusing porcelain glaze as zirconia surface treatment on the adhesion of resin cement. *J Clin Exp Dent.* 2025;17(4):e407-e15.
- 47- da Cruz BS, Alfonso-Leon GS, de Carvalho AS, Rodrigues CdS, Pucci CR, de Melo RM. Bond strength of a multilayer graded zirconia to a self-adhesive resin cement. *Int J Adhesion Adhesives.* 2026;148:104282.

- 48- Marrocchi A, Santarelli ML. Active Organic and Organic-Inorganic Hybrid Coatings and Thin Films : Challenges, Developments, Perspectives. Basel, Switzerland: MDPI - Multidisciplinary Digital Publishing Institute; 2020.
- 49- Rehner MG, Moldoveanu E-T, Niculescu A-G, Biclesanu FC, Pangică AM, Grumezescu AM, et al. Advances in Dental Implants: A Review of In Vitro and In Vivo Testing with Nanoparticle Coatings. *J Compos Sci*. 2025; 9(3):140.
- 50- Negut I, Albu C, Bită B. Advances in Antimicrobial Coatings for Preventing Infections of Head-Related Implantable Medical Devices. *Coatings*. 2024;14(3):256.
- 51- Ramos NC, Alves LMM, Ricco P, Santos GMAS, Bottino MA, Campos TMB, et al. Strength and bondability of a dental Y-TZP after silica sol-gel infiltrations. *Ceramics Int*. 2020;46(10, Part B):17018-24.
- 52- Xie H, Wang X, Wang Y, Zhang F, Chen C, Xia Y. Effects of sol-gel processed silica coating on bond strength of resin cements to glass-infiltrated alumina ceramic. *J Adhes Dent*. 2009;11(1):49-55.
- 53- Gökşen ET, Meşe A, Akan T. Influence of Surface Treatments and Thermal Aging Duration on the Shear Bond Strength of Resin Cement to CAD/CAM Monolithic Zirconia. *Polymers (Basel)*. 2026;18(5):592.
- 54- Barandica N, Vicente GS, Torres I, Ristić A, Fernández-García A. Tailored highly transparent porous silica coatings for enhanced optical and mechanical performance of solar covers. *Mat Design*. 2026;265:115952.
- 55- Korcharoenrat B, Sriamporn T, Thamrongananskul N, Krajangta N, Klaisiri A. Assessment of Adhesive Protocols on the Repair Bond Strength of Vita Enamic Polymer-Infiltrated Ceramic Network Using Functional Monomer-Containing Universal Adhesives. *Ceramics*. 2026;9(3):32.
- 56- Fathi A, Hashemi S, Tabatabaei S, Mosharraf R, Atash R. Adhesion to Zirconia: An umbrella review. *Int J Adhesion Adhesives*. 2023;122:103322.
- 57- Chatterjee N, Ghosh A. Current scenario on adhesion to zirconia; surface pretreatments and resin cements: A systematic review. *J Indian Prosthodont Soc*. 2022;22(1):13-20.
- 58- Liang S, Zhang Q, Li D, Ye H, Wu M, Jia L, et al. Biomimetic nanosilica-lithium infiltration enhances the bonding durability of high translucent zirconia to resin. *Materialstoday Communications*. 2026;53:115274.
- 59- Sismanoglu S. Color and surface properties of conventional, injectable, and 3D-printed resin composites for anterior restorations: influence of a surface sealant. *Odontology*. 2026.
- 60- Le Bail N, Benayoun S, Toury B. Mechanical properties of sol-gel coatings on polycarbonate: a review. *J Sol-Gel Sci Tech*. 2015;75(3):710-9.
- 61- Wu LYL, Boon L, Chen Z, Zeng XT. Adhesion enhancement of sol-gel coating on polycarbonate by heated impregnation treatment. *Thin Solid Films*. 2009;517(17):4850-6.
- 62- Gale MS, Darvell BW. Thermal cycling procedures for laboratory testing of dental restorations. *J Dent*. 1999;27(2):89-99.
- 63- Dağdeviren U, Üçtaşlı MB, Köklü Dağdeviren İ. Influence of Beverage Immersion and Repolishing on the Color Stability of CAD/CAM Restorative Materials: An In Vitro Study. *Materials (Basel)*. 2026;19(8):1519.
- 64- Meng C, Li Y, He Q, Hao Y, Yin W, Zhou H, et al. Preparation of C and Co co-doped TiO₂ Nanomaterials for Visible-Light Photocatalytic Antibacterial Activity. *Water, Air, Soil Pollution*. 2026;237(13):750.
- 65- Byun S-Y, Han AR, Kim K-M, Kwon J-S. Antibacterial properties of mesoporous silica coated with cerium oxide nanoparticles in dental resin composite. *Sci Rep*. 2024;14(1):18014.
- 66- Pitic Cot DE, Nodiți-Cuc A-R, Talpos-Niculescu CI, Marian D, Popovici RA, Kis AM, et al. Antibacterial and Bioregenerative Nanomaterials in Oral Health: From Material Design to Clinical Translation and Technological Trends. *J Func Biomater*. 2026;17(2):87.
- 67- Yuming L, Zhenkun X, Yixin S, Xi C, Jingzhe D, Yan P, et al. Nanomaterial-based strategies for oral biofilm management: functionalized implants and targeted delivery systems. *Front Oral Health*. 2026;7:1789632.
- 68- Rehner Costache AMG, Tudorache DI, Bîrcă AC, Nicoară AI, Niculescu AG, Holban AM, et al. Antibacterial Properties of PMMA/ZnO(NanoAg) Coatings for Dental Implant Abutments. *Materials (Basel)*. 2025;18(2):352.
- 69- Alves LMM, Rodrigues CdS, Ramos NdC, Buizastrow J, Campos TMB, Bottino MA, et al. Silica infiltration on translucent zirconia restorations: Effects on the antagonist wear and survivability. *Dent Mater*. 2022;38(12):2084-95.
- 70- Massa MA, Covarrubias C, Bittner M, Fuentevilla IA, Capetillo P, Von Martens A, et al. Synthesis of new antibacterial composite coating for titanium based on highly ordered nanoporous silica and silver nanoparticles. *Mater Sci Eng C Mater Biol Appl*. 2014;45:146-53.
- 71- Wang Y, Fang L, Wang P, Qin L, Jia Y, Cai Y, et al. Antibacterial Effects of Silica Nanoparticles Loading Nano-silver and Chlorhexidine in Root Canals Infected by *Enterococcus faecalis*. *J Endod*. 2025;51(1):54-63.
- 72- Thomas NG, Junior FGdS, Ninan N, Anil S, Raju RS, Varghese N, et al. Bioglass in dentistry: A comprehensive review of current applications and innovative frontiers. *J Dent*. 2025;162:106017.
- 73- Piatti E, Miola M, Vernè E. Tailoring of bioactive glass and glass-ceramics properties for in vitro and in vivo response optimization: a review. *Biomater Sci*. 2024;12:4546-86.
- 74- Latoui R, Bouzid D, Dugas P-Y, Espinosa E, Boyron O. In-situ sol-gel process for the formulation of Bis-GMA/TEGDMA/silica dental nanocomposite. *Polymer*. 2024;313:127731.
- 75- Kim J, Kang I-G, Cheon K-H, Lee S, Park S, Kim H-E, et al. Stable sol-gel hydroxyapatite coating on zirconia dental implant for improved osseointegration. *J Mater Sci: Mater Med*. 2021;32(7):81.
- 76- do Nascimento Santos JV, de Moraes PWS, Pereira MN, Costa Leite JV, Magalhães GdAP, Capehart K, et al. Bioactive glass products for the treatment of dentin hypersensitivity: a scoping review. *Clin Oral Invest*. 2025;29(10):464.

77- Takeshova T, Kurmanalina M, Aitmukhanbetova A, Mussin NM, Tanideh N, Tamadon A. Bioactive Glass in Dentistry: A Bibliometric Analysis of Trends, Impact, and Future Directions. *Tissue Eng Part B Rev.* 2025. tenteb20250016.

78- Dodaran MS, Wang J, Shamsaei N, Shao S. Investigating the Interaction between Persistent Slip Bands and Surface Hard Coatings via Crystal Plasticity Simulations. *Crystals.* 2020;10(11):1012.