پژوهش های شیمی
C
R

مروری بر شیمی و کاربرد نسل‌های سیمان‌های دندانی

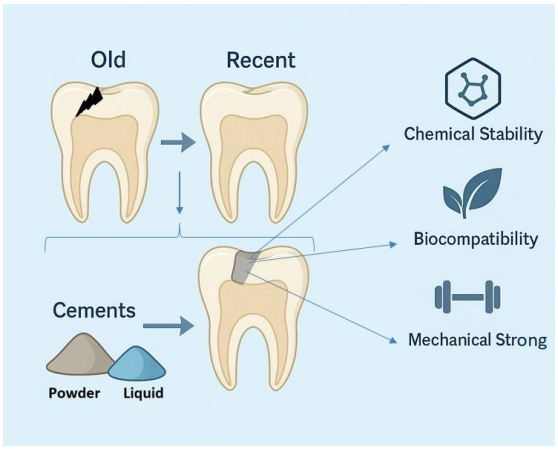
نیکا نیکرو شالدهی و علی اکبر طرلانی*

آزمایشگاه نانوساختارها و کاتالیزگرهای معدنی، پژوهشکده توسعه فرآیندهای شیمیایی، پژوهشگاه شیمی و مهندسی شیمی ایران، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۰ خرداد ۱۴۰۴ **تاریخ پذیرش: ۱۱ خرداد ۱۴۰۴**

چکیده: کاربرد عملی علم شیمی در زمینه‌های مختلف، از درمان تا تولید و صنعت، امکان‌پذیر است. مقاله‌ی مروری حاضر، نمونه‌ای از کاربردهای مهم شیمی را در حوزه درمان‌های دندانی مورد بررسی قرار می‌دهد و آن را به مخاطبان معرفی می‌کند. یکی از مواد پرکاربرد در دندان‌پزشکی، سیمان دندانی است؛ ماده‌ای که بر پایه واکنش سخت‌شدن بین یک پودر جامد و یک مایع چسبناک شکل می‌گیرد و در ترمیم‌های غیرمستقیم، به‌ویژه برای بازسازی دندان‌های آسیب‌دیده، مورد استفاده قرار می‌گیرد. انتخاب نوع مناسب سیمان، به عوامل مختلفی وابسته است و نقش مهمی در دوام و موفقیت درمان دارد. تا کنون انواع گوناگونی از مواد سیمانی در دندان‌پزشکی معرفی شده‌اند که از نظر ترکیب شیمیایی، خواص فیزیکی و روش‌های کاربرد، تفاوت‌های قابل توجهی با سیمان‌های معمولی دارند. در این مقاله، ضمن معرفی ویژگی‌ها، اجزا و نحوه تشکیل سیمان‌های دندانی، انواع آن‌ها از گذشته تا امروز بررسی می‌شود؛ در ادامه، گروهی از سیمان‌های دندانی هیدرولیک، شامل انبوه تري اکسید معدني (MTA)، پرتلند و کلسیم سیلیکات‌ها معرفی می‌شوند. این مواد دارای پایداری شیمیایی و مقاومت مکانیکی بالا هستند، قابلیت ترکیب با مایعات دندانی را دارند، و از نظر زیبایی‌شناختی نیز در بهبود ظاهر دندان مؤثرند. با توجه به زیست‌سازگاری بالای این ترکیب‌ها، کاربرد آن‌ها در درمان‌های ترمیمی ریشه و پالپ، تا مهروموم و پر کردن کانال ریشه گسترش یافته است.

کلید واژه: پرتلند، درمان، سیمان دندان، شیمی کاربردی، کلسیم سیلیکات، انبوه تري اکسید معدني (MTA)



۱- مقدمه

با توسعه تمدن‌ها و افزایش نگرانی جوامع انسانی در زمینه درمان و ترمیم عوارض ناشی از بیماری‌های دندانی، از گذشته تاکنون، انواع مختلفی از مواد دندانی تولید شده‌اند که بسته به نوع بیماری، کاربردهای متنوعی دارند [۱].

موادی که در شاخه دندان‌پزشکی استفاده می‌شوند باید دارای ویژگی‌های مناسب و متعددی باشند که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: کاربری آسان برای دندان‌پزشک هنگام جراحی، زمان استفاده مناسب، قابلیت شکل‌گیری و ایجاد پیوند مؤثر با بافت دندان، سخت‌شدن سریع در محل مورد نظر، چسبندگی بالا، سازگاری زیستی

با بافت‌های دهانی و مقاومت در برابر اثرهاي تهاجمی اسیدهای تولیدشده از قندها توسط ریزاندامگان. با توجه به محدودیت‌هایی که هر یک از مواد دندانی در عملکرد و کاربرد دارند، تاکنون هیچ ماده‌ای نتوانسته است به‌تنهایی همه این ویژگی‌ها را به‌طور کامل فراهم کند. از این‌رو، تاکنون طیف گسترده‌ای از مواد دندانی با ترکیب‌ها و ویژگي‌هاي مختلف طراحی و عرضه شده‌اند [۲].

۲- سیمان دندان و ویژگي‌هاي آن

سیمان‌های دندانی از مواد بنیادی و پرکاربرد در دندان‌پزشکی به شمار می‌روند و نقش مهمی در استواری ساختار دندان، نگه‌داشت تندرستی آن و بازسازی بافت‌های آسیب‌دیده دارند. این مواد بیشتر در ترمیم‌های غیرمستقیم، به‌ویژه برای بازسازی دندان‌های آسیب‌دیده به کار می‌روند [۳]. گزینش سیمان مناسب به ویژگی‌های گوناگونی وابسته است؛ از جمله نوع ماده جذب‌شونده، شکل دندان آماده‌شده، توانایی جداسازی ناحیه، جایگاه سیمان‌گذاری در دهان، و نیز نیازهای زیبایی‌شناختی بیمار [۴].

سیمان‌های دندانی در زمان انجام کار، به‌طور مستقیم آماده می‌شوند و ترکیب‌های شیمیایی گوناگونی دارند. بسته به ساختار آن‌ها، این مواد می‌توانند در کارهایی مانند چسباندن روکش‌ها و پرکننده‌های پیش‌ساخته، پوشش‌دهی حفره‌ها برای محافظت از مغز دندان (شامل رگ‌ها و رشته‌های عصبی) در برابر آسیب‌های گرمایی و شیمیایی، و نیز در پرکردن مستقیم حفره‌ها به کار گرفته شوند [۵].

۳- نحوه تشکیل سیمان‌های دندانی

مایع‌هاي به‌کاررفته در ساخت سیمان دندانی که نقش اسید یا دهنده پروتون را ایفا می‌کنند، می‌توانند پایه آبی یا آلی داشته باشند. در مقابل، پودرهای سیمان که در فرایند تشکیل سیمان به‌عنوان گیرنده پروتون عمل می‌کنند، معمولاً مواد آمفوتری یا کمی بازی هستند [۶]. فرایند تشکیل سیمان بر پایه یک واکنش اسید-باز انجام می‌شود که در آن، فاز مایع به‌عنوان ماتریس پیونددهنده ایفای نقش می‌کند .معادله ۱، واکنش کلی تشکیل سیمان را نمایش می‌دهد.

$$MO + H_2A \rightarrow MA + H_2O \qquad (۱)$$

نماد M نشان‌دهنده کاتیون و A نماد نشان‌دهنده آنیون‌های تشکیل‌دهنده سیمان است. در فرآیند تشکیل سیمان، به‌ویژه در مرحله آب‌گیری، ترکیب‌هاي شیمیایی موجود در سیمان، مانند سیلیکات‌های کلسیم، با آب واکنش می‌دهند. این واکنش‌ها محصولاتی تولید می‌کنند که شامل ژل‌های سیلیکاتی و کلسیم هیدروکسید هستند. در ابتدا، هنگامی که سیمان با آب مخلوط می‌شود، مایعی اولیه شامل ذرات ریز سیمان و آب تشکیل می‌شود. در این مرحله، یون هیدروژن به‌عنوان بخشی از مولکول‌های آب در این مایع حضور دارد و نقش پل را ایفا می‌کند. با پیشرفت واکنش‌های شیمیایی، این مایع شروع به تشکیل پل‌های یونی می‌کند؛ پل‌های یونی به معنای اتصال‌هاي الکتریکی بین یون‌ها هستند که در نتیجه ترکیب‌هاي جدید به وجود می‌آیند. این پل‌های یونی به تدریج جایگزین مایع اولیه می‌شوند و ساختار سه‌بعدی شبکه‌مانندی به نام «ژل» را تشکیل می‌دهند. این ژل به‌عنوان شبکه‌ای متراکم عمل کرده و باعث افزایش گرانروی و سفت‌شدن مخلوط می‌شود. در نهایت، این فرآیند منجر به شکل‌گیری ساختاری جامد و مقاوم می‌گردد که به آن سیمان سخت‌شده گفته می‌شود. به طور کلی، این فرآیند شامل تغییر فاز از مایع به جامد است که با تشکیل پل‌های یونی و شبکه‌های سه‌بعدی همراه است و موجب افزایش استحکام و پایداری سیمان می‌شود. ماتریس همه سیمان‌های دندانی ساختاری بی‌شکل دارد؛ زیرا از انعطاف‌پذیری ساختاری برخوردار است [۷].

۴- اجزای تشکیل‌دهنده سیمان‌های دندانی

۴-۱- پودرهای سیمان‌های دندانی

در ادامه مقاله و بررسی انواع سیمان، پودرهای هر نوع به تفصیل توضیح داده شده‌اند؛ برای نمونه، جدول ۱، دو نوع از مهم‌ترین پودرهای سیمان دندانی را نشان می‌دهد.

جدول ۱. مقایسه کلسیم سیلیکات و کلسیم فسفات [۹]

نوع پودر	کاربرد	ویژگی شیمیایی
کلسیم سیلیکات	ترمیم‌های دندانی انجام روش‌های اندودانسی تعمیر پوسیدگی	پایداری شیمیایی بالا قابلیت مخلوط شدن با مایعات دندانی
کلسیم فسفات	دندان و ترمیم‌های دندانی تهیه سمیاده‌های دندانی	مقاومت مکانیکی بالا قابلیت زیبایی بخشی به دندان

۴-۲- مایع‌هاي سیمان‌های دندانی [۸]

الف) آب، به‌عنوان بخش مایع سیمان دندانی، که در ترکیب با پودرها برای تهیه خمیر استفاده می‌شود.

ب) مایع اسیدی مانند پلی‌اکریلیک اسید (PAA) که برای ایجاد واکنش شیمیایی با پودرهای سیمان دندانی به کار می‌رود.

۴-۳- افزودنی‌ها و تقویت‌کننده‌ها [۸]

- سیمان زیرکونیایی (زیروسمنت): به منظور افزایش مقاومت مکانیکی و پایداری سیمان‌های دندانی به آن‌ها افزوده می‌شود.
- رنگ‌دانه‌ها: جهت ایجاد رنگ‌های مختلف در سیمان‌های دندانی به کار می‌روند.

۵- انواع سیمان‌های دندانی و ویژگی‌های آن‌ها

سیمان‌ها به‌طور کلی به دو گروه موقت و دائمی تقسیم می‌شوند. مواد دائمی شامل سیمان روی فسفات، روی پلی‌کربوکسیلات، آینومر شیشه‌ای معمولی، شیشه‌ای اصلاح‌شده با رزین و همچنین سیمان رزینی هستند. با توجه به ویژگی‌های منحصربه‌فرد هر یک از این مواد، دندان‌پزشک باید بتواند نوع مناسب سیمان را متناسب با هدف درمانی انتخاب کند. پیش از استفاده از سیمان رزینی، بیشتر سیمان موقت بدون اوژنول ترجیح داده می‌شود [۱۰].

۵-۱- سیمان روی فسفات

این سیمان از مایع فسفریک اسید، آب، بافر و پودری شامل اکسید روی و منیزیم تشکیل شده است. سیمان روی فسفات مقاومت بالایی در برابر فشار دارد و زمان کافی برای کار کردن با آن فراهم می‌کند؛ به این معنی که فرآیند سخت شدن آن سریع نیست. با این حال، این سیمان معایبی نیز دارد که از جمله آن‌ها می‌توان به حلالیت زیاد در مایع-هاي خوراکی، استحکام و مقاومت کم در برابر کشش، خطر بالای حساسیت به دلیل pH اولیه پایین و فقدان خاصیت ضدپوسیدگی اشاره کرد. همچنین، اثر تحریک‌کننده سیمان روی فسفات ممکن است ناشی از وجود باکتری در سطح دندان باشد [۴].

۵-۲- سیمان روی پلی‌کربوکسیلات

مایع سیمان روی پلی‌کربوکسیلات حاوی ۴۰ درصد پلی‌اکریلیک اسید است و پودر آن از اکسیدهای روی، منیزیم و قلع فلوئورید تشکیل شده است. این سیمان نسبت به سیمان روی فسفات انحلال‌پذیری بیشتری دارد و حذف اضافی آن به سختی انجام می‌شود [۹]. کاربرد اصلی این سیمان برای ترمیم تاج و پروتزهای جزئی ثابت کوچک است. یکی از مزایای مهم این سیمان، سازگاری زیستی بالای آن است که به دلیل اندازه بزرگ مولکول پلی‌اکریلیک اسید است؛ زیرا این ویژگی اجازه نفوذ به کانال‌های عاج را نمی‌دهد [۱۱]. شکل ۱، استفاده از سیمان روی پلی‌کربوکسیلات را برای چسباندن تاج دندان پیش‌آماده به ریشه دندان تراش‌خورده پیش‌ساز ایمپلنت نشان می‌دهد [۱۲].

شکل ۱. سیمان روی پلی کربوکسیلات در دندان [۱۲].

۵-۳- سیمان *آینومر* شیشه‌ای یا شیشه‌ای معمولی

آینومر در زبان فارسی به معنای «پلیمرهای یونی» است. پودر این سیمان حاوی آلومینوسیلیکات و مقدار قابل توجهی فلوئورید است که بیشتر به صورت سدیم و کلسیم فلوئورید به سیمان افزوده می‌شوند تا با آزادسازی فلوئورید، از پوسیدگی دندان جلوگیری کنند. مایع این سیمان شامل اسیدهای پلی‌اکریلیک و تارتاریک است. مقاومت فشاری این سیمان در حد متوسط و مقاومت کششی آن پایین است. ویژگي‌هاي فیزیکی سیمان *گلاس-آینومر* معمولی بسیار متغیر است [۱۳]. از مزایای این نوع سیمان می‌توان به آزادسازی طولانی‌مدت فلوئورید اشاره کرد که در پیشگیری از پوسیدگی دندان مؤثر است. حساسیت زیاد به رطوبت از معایب آن به شمار می‌رود؛ قرار گرفتن زودهنگام سیمان در معرض بزاق یا آب موجب افزایش قابل توجه انحلال‌پذیری و کاهش استحکام نهایی آن می‌شود [۱۴]. به طور کلی، این سیمان دارای خواص ضدباکتریایی و محافظتی برای بافت‌های دندانی است و از آنجا که در تهیه آن از محلول‌های آبی پلی‌آلکانوئیک اسیدها استفاده می‌شود، به نام سیمان *گلاس_آینومر* یا سیمان آلومینوسیلیکات پلی‌اکریلیک اسید (ASPA) شناخته می‌شود [۱۳]. شکل ۲ کاربرد سیمان شیشه‌ای، که از رایج‌ترین ترکیب‌هاي مورد استفاده در دندان‌پزشکی است و رنگی نزدیک به رنگ طبیعی دندان دارد، را نشان می‌دهد [۱۵].

شکل ۲. سیمان شیشه‌ای در دندان [۱۵]

۵-۴- سیمان شیشه‌ای اصلاح‌شده

این سیمان دارای چسبندگی بیشتر به بافت‌های سخت دندان، استحکام فشاری و کششی بالاتر و انحلال‌پذیری کمتری است. سیمان‌های *گلاس-آینومر* اصلاح‌شده با رزین برای کاربردهایی مانند تثبیت روکش‌ها و پروتزهای جزئی ثابت، روکش‌ها و پل‌های فلزی-سرامیکی، پرکننده‌های بین‌دندانی فلزی، و همچنین روکش‌ها و پل‌های تکیه‌گاه ایمپلنت به کار می‌روند [۱۶]. در پژوهش‌های متعددی، تأثیر افزودن موادی مانند تیتانیوم بر خواص ساختاری، مکانیکی و زیستی سیمان‌های شیشه-سرامیک مورد بررسی قرار گرفته است. به عنوان مثال، اثر افزودن تیتانیوم بر خواص مکانیکی با اندازه‌گیری مقاومت فشاری ارزیابی شده است. نتایج نشان داد که افزودن تیتانیوم به شیشه-سرامیک باعث کاهش انتشار یون‌های سیلیکون و سدیم

می‌شود که این امر به افزایش بقای سلول‌های بافتی کمک کرده و مقاومت فشاری شیشه-سرامیک را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهد [۱۷].

۵-۵- سیمان اکسیدی

آ) سیمان اکسیدی رزینی: این سیمان‌ها از رزین اکسیدی و پرکننده‌های معدنی تشکیل شده‌اند و دارای چسبندگی بالا و مقاومت مکانیکی مناسبی هستند. از این نوع سیمان‌ها در ترمیم‌های کامپوزیتی استفاده می‌شوند [۱۸].

ب) سیمان اکسیدی غیر رزینی: این سیمان‌ها شامل اکسید فلزات مختلفی مانند روی و همچنین اکسیدهایی از جمله کلسیم اکسید (به‌عنوان یکی از اجزای اصلی)، سیلیسیم اکسید (برای افزایش استحکام)، آلومینیوم اکسید (برای کاهش زمان سخت‌شدن) و منیزیم اکسید (برای بهبود خواص فیزیکی و شیمیایی) هستند. از این سیمان‌ها در ترمیم‌های موقتی و معمولی استفاده می‌شود [۱۸].

در روش‌های متنوع و مؤثر، می‌توان از تعامل اکسیدهای فلزی بهره برد. به‌عنوان نمونه، تولید جایگاه‌های پایه قوی و پایدار بر روی آلومینا توسط کلسیم اکسید بررسی شده است که این جایگاه‌ها در برابر آب مقاوم بوده و پس از شستشو با آب نیز پایداری خود را حفظ می‌کنند [۱۹].

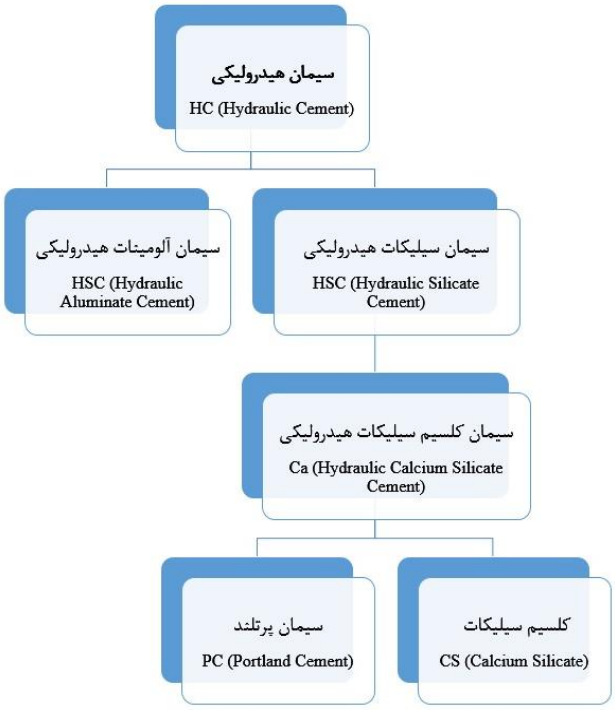
۶-۵- سیمان رزینی

این سیمان‌ها شفافیت بیشتری شبیه به دندان دارند و برای تثبیت ترمیم‌های تمام فلز، ترمیم‌های تمام سرامیک (مانند پوشش، پرکننده، روکش و پل)، ترمیم‌های زیرکونیایی (دسته‌ای جدید از سیمان‌های کامپوزیتی)، ترمیم‌های کامپوزیت غیرمستقیم، ترمیم‌های فلز-سرامیک معمولی، فلز و الیاف استفاده می‌شود [۴]. شکل ۳، نمونه‌ای از کاربرد سیمان رزینی در دندان‌پزشکی را نشان می‌دهد [۲۰].

۷-۵- سیمان‌های هیدرولیک

اصطلاح «هیدرولیک» به توانایی ترکیب شدن (برای مثال با آب)، تنظیم و پایداری در محیط‌های مرطوب اشاره دارد [۲۱]. شکل ۴، نمودار درختی تقسیم‌بندی سیمان‌های هیدرولیک را نشان می‌دهد.

شکل ۳. سیمان رزینی در دندان [۲۰].



شکل ٤. دسته‌بندی سیمان هیدرولیک [۲۱].

اصطلاح «سیمان سیلیکات هیدرولیکی» توسط دارول و وو برای توصیف گروهی از مواد دندانی به‌کار رفت که شامل انبوه تری‌اکسید معدنی می‌شود [۲۲]. سیمان‌های کلسیم سیلیکات هیدرولیک (HCSCs) که به MTA معروف‌اند، بیش از ۲۰ سال پیش ساخته شده‌اند و ترکیب آن‌ها بیشتر بر اساس اجزای سیمان پرتلند شامل دی‌کلسیم سیلیکات، تری‌کلسیم سیلیکات، آلومینیوم و آهن سیلیکات است [۲۳]. سیمان‌های هیدرولیک هنگام واکنش با آب، دچار آب‌پوشی شده و می‌توان از آن‌ها در محیط‌های مرطوب استفاده کرد، اما خشک کردن آن‌ها قبل از پایان واکنش کامل خطرناک است، زیرا باعث کاهش استحکام، ایجاد ترک‌های میکروسکوپی، تغییر در ساختار بلوری و توقف واکنش آب‌پوشی می‌شود. تغییرات شیمیایی اجزای محیط مانند خون، مایع بافت، عاج، استخوان، محلول‌های آبی و مواد ترمیم‌کننده، که بیشتر در سطح و به نحوی است که تعامل سیمان با محیط تغییر می‌کند، ممکن است موجب واکنش‌های جانبی شود و منجر به گیرش ناقص سیمان شود؛ این امر می‌تواند اثرات مخربی بر خواص ماده داشته باشد [۴].

۱-۵-۷- انبوه تری‌اکسید معدنی

این ماده دندانی پرکاربرد شامل ترکیب‌های سرامیکی است که بیشتر، دی‌کلسیم سیلیکات و تری‌کلسیم سیلیکات را در بر می‌گیرد و به طور معمول مقدارهای کمتری از

تری‌کلسیم آلومینات، تتراکلسیم آلومینوفریت و کلسیم سولفات نیز در آن وجود دارد. این ماده بیشتر در درمان ریشه دندان و به‌عنوان پرکننده انتهای ریشه مورد استفاده قرار می‌گیرد و برخی پژوهش‌ها نشان داده‌اند که این ماده با روش‌های مختلف از جمله کشت سلولی با سلول‌های انسانی تثبیت‌شده اُستئوسارکوم، زیست‌سازگار است. گزارش‌ها حاکی از آن است که پالپ‌های پوشیده شده با انبوه تری‌اکسید معدنی منجر به تشکیل پل عاج کاملی می‌شوند که هیچ نشانه‌ای از التهاب در آن دیده نمی‌شود [۲۴]. اشکال انبوه تری‌اکسید معدنی تجاری، زمان گیرش طولانی‌تر آن است که استفاده از آن را در حفره دهان محدود می‌کند. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که مقاومت فشاری انبوه تری‌اکسید معدنی با سایر مواد پرکننده انتهای ریشه قابل مقایسه است؛ با این حال، بهبود زمان گیرش و مقاومت فشاری برای ارتقاء ماده و تسهیل کاربرد آن در شرایط مختلف ضروری است [۲۵]. شکل ۵، کاربرد انبوه تری‌اکسید معدنی را در پرکردن کانال دندانی و ترمیم آسیب‌های وارد شده نشان می‌دهد [۲۶].

شکل ۵. کاربرد انبوه تری‌اکسید معدنی در دندان [۲۶].

۲-۷-۵- بیودنتاین

بیودنتاین و انبوه تری‌اکسید معدنی هر دو از ترکیب‌هاي کلسیم سیلیکات استفاده کرده اما دارای افزودنی و روش تهیه متفاوت می‌باشند. بیودنتاین، از کلسیم سیلیکات، سیمان زیرکونیایی، پودر سلولز و آب تشکیل شده و بیشتر برای ترمیم‌های دندانی و پوسیدگی استفاده می‌شود [۲۷].

۳-۷-۵- سیمان پرتلند

نوعی سیمان هیدرولیک است که در دندان‌پزشکی، به‌ویژه در موارد دائمی و به دلیل پایداری طولانی‌مدت در محیط‌های مرطوب، به‌عنوان ماده‌ای بالینی برای پر کردن دندان کاربرد دارد [۲۸]. سازوکار آبپوشی انبوه تری‌اکسید معدنی مشابه سیمان پرتلند است؛ در این فرایند، ژل کلسیم سیلیکات آبدار و کلسیم هیدروکسید تولید می‌شود. کلسیم هیدروکسید حاصل از آبپوشی، نقش مهمی در زیست‌سازگاری سیمان ایفا می‌کند. همچنین سیمان پرتلند با توجه به وجود یون سولفات که از کلسیم سولفات (افزوده‌شده به محصول تجاری برای به تأخیر انداختن زمان گیرش) تأمین می‌شود، دارای فاز آلومینات است که در فرایند آبپوشی شرکت دارد [۲۹]. در واکنش با آب، کلسیم سیلیکات‌های هیدرولیک، کلسیم هیدروکسید تولید می‌کنند (معادله‌های ۲ و ۳) که این واکنش‌ها منجر به ایجاد کاربردهای بالینی متعددی می‌شود. واکنش‌های دی‌کلسیم سیلیکات و تری‌کلسیم سیلیکات به طور گسترده‌ای در مطالعه‌هاي سیمان پرتلند بررسی شده‌اند [۳۰].

$$2(2CaO.SiO_2) + 4H_2O \rightarrow 3CaO.2SiO_2.3H_2O + Ca(OH)_2 \quad (۲)$$

$$2(3CaO.SiO_2) + 6H_2O \rightarrow 3CaO.2SiO_2.3H_2O + 3Ca(OH)_2 \quad (۳)$$

۴-۷-۵- سیمان کلسیم سیلیکات

این سیمان، قوی‌ترین سیمان معدنی شناخته‌شده است که قدرت آن از سیمان پرتلند نیز بیشتر است. به طور کلی، سه عامل اصلی در این نوع سیمان‌ها نقش مهمی ایفا می‌کنند: الف) اجزای اصلی تشکیل‌دهنده سیمان، ب) وجود یا عدم وجود مواد افزودنی و ج) عرضه سیمان به صورت پودر برای مخلوط‌شدن با آب یا به صورت سوسپانسیون در حامل غیرآبی هر سه عامل می‌توانند باعث تغییرات شیمیایی در مواد شده و فرایند آبپوشی سیمان را تحت تأثیر قرار دهند. مقدارهاي مختلفی از کلسیم سولفات برای کاربرد دندان‌پزشکی پیشنهاد شده است. افزودن کلسیم سولفات به این مخلوط‌ها ممکن است موجب انبساط سیمان شود که زیست‌سازگاری ضعیف‌تری دارد. از نظر بالینی، تغییر سیمان پرتلند صنعتی به مخلوط‌های کلسیم سیلیکات مصنوعی، ناشی از نگرانی‌هایی درباره شستشوی یون‌های آلومینیوم است که در اندام‌های مختلف بدن یافت شده و با تنش اکسایشي (افزایش رادیکال‌های آزاد نسبت به آنتی‌اکسیدان‌ها) در مغز مرتبط است. همچنین، استفاده از مواد خام طبیعی و ناخالصی‌ها باعث حضور فلزات سنگین سمی مانند کروم، آرسنیک و سرب در سیمان‌های پرتلند تجاری شده است [۳۱]. کلسیم سیلیکات‌های مصنوعی، که از مواد اولیه خالص‌تر آزمایشگاهی و با فرآیندهای تولید پاکیزه‌تر ساخته می‌شوند، دسته‌ای مجزا و مناسب محسوب می‌شوند. جدول ۲، تقسیم‌بندی موادی را نشان می‌دهد که یا به صورت پودر برای مخلوط شدن با آب عرضه می‌شوند یا به صورت معلق در حامل غیرآبی ارائه می‌گردند (که این مواد نیز برای ادامه فرایند آبپوشی به انتشار آب از محیط اطراف وابسته هستند) [۳۲].

جدول ۲. تمایز کلسیم سیلیکات‌ها [۳۲]

سیمان	افزودنی‌ها	آب	نمونه تجاری
تری/دی کلسیم سیلیکات	√	√	کاربرد بالینی در عاج و ریشه
تری/دی کلسیم سیلیکات	√	×	پر کردن کلی

همچنین شکل ۶، نمونه‌ای از پودر کلسیم سیلیکات سنتزشده برای کاربرد درمانی را نشان می‌دهد.

۶- سیمان رایج کنونی در دندانپزشکی

تا کنون سیمان‌های متعددی برای کاربردهای دندانپزشکی سنتز و آزمایش شده‌اند که بسیاری از آن‌ها قابل استفاده هستند. با این حال، سیمان‌هایی که در این بخش بررسی شده‌اند، به‌دلیل ویژگی‌های خاص خود، کاربرد و محبوبیت بیشتری یافته‌اند (نسبت به سیمان‌هایی که پیش‌تر بررسی شد)؛ به‌عنوان نمونه، در روش‌های درمانی که با پالپ یا سامانه ریشه دندان در تماس هستند، سیمان‌های کلسیم سیلیکات عملکرد بسیار مناسبی دارند. این نوع سیمان‌ها با ایجاد رسوب و تشکیل هیدروکسی آپاتیت، از بافت‌های دندانی در برابر تأثیرهاي سیمان‌های زیرین محافظت می‌کنند. همچنین، در بافت اطراف ریشه دندان، سیمان‌ها به‌عنوان پایه‌ای برای مواد ترمیمی دیگر عمل می‌کنند.

شکل ۶. کلسیم سیلیکات سنتزی.

کلسیم سیلیکات، یکی از اجزای اصلی سیمان‌های دندانی مانند انبوه تری‌اکسید معدنی و بیودنتاین است که نقش مهمی در بهبود خواص فیزیکی، شیمیایی و زیستي این مواد ایفا می‌کند و از مزایایی مانند خواص ضدباکتریایی، زیست‌سازگاری و مقاومت مکانیکی بالا برخوردار است [۳۳]. گفتني که خود کلسیم سیلیکات به تنهایی یک سیمان هیدرولیک محسوب نمی‌شود و در صورت افزودن آب، قابلیت تنظیم و سخت‌شدن ندارد؛ بلکه فازهای مختلف آن مورد مطالعه و استفاده قرار می‌گیرند. بنابراین، اصطلاح علمی و دقیق‌تر برای این دسته از سیمان‌ها، «سیمان‌های بر پایه کلسیم سیلیکات» است [۳۲ و ۳۴]. سیمان پرتلند دارای چهار فاز معدنی معروف به نام‌های بِلیت یا دی‌کلسیم سیلیکات، آلیت یا تری‌کلسیم سیلیکات، سِلیت یا تری‌کلسیم آلومینات و میلریت قهوه‌ای یا دی‌کلسیم آلومینوفریت است. دی‌کلسیم سیلیکات یکی از اجزای اصلی سیمان است و پنج شکل بلوری مختلف برای آن شناخته شده است که عبارت‌اند از:

α: شش گوشه‌ای

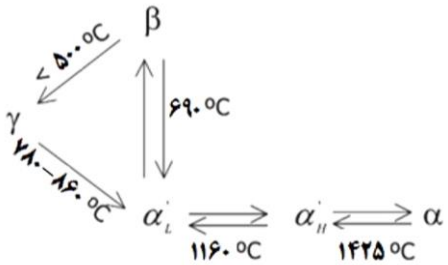
α_H: راست لوزی

α_L: راست لوزی

β: تک شیب

γ: راست لوزی

شکل ۷، نمودار تبدیل چندشکلی‌های دی‌کلسیم سیلیکات را نشان می‌دهد که هنگام خنک شدن از دمای بالاتر از ۱۴۰۰ درجه سانتی‌گراد رخ می‌دهد. نوع و میزان محصولات جانبی، دمای پخت و سرعت خنک‌سازی بر نوع محصول نهایی تأثیرگذار است و همه این تغییرها در فرآیند تولید سیمان‌های صنعتی قابل کنترل است [۳۵].



شکل ۷. تبدیل چندشکلی‌های دی‌کلسیم سیلیکات [۳۵].

سیمان‌های مبتنی بر کلسیم سیلیکات، از جمله انبوه تری‌اکسید معدنی، سیمان‌های هیدرولیکی خودتنظیم هستند. در حال حاضر، سرامیک‌های زیست‌فعال مبتنی بر سیمان‌های تری‌کلسیم و دی‌کلسیم سیلیکات بخش مهمی از تجهیزات دندانپزشکی جدید محسوب می‌شوند و توسط متخصصان مختلفی مانند متخصصان درمان ریشه، دندانپزشکان اطفال، جراحان دهان و دندانپزشکان عمومی مورد استفاده قرار می‌گیرند. پژوهش‌ها همخواني این مواد را با استانداردهای بین‌المللی سازگاری زیستی (ISO 7405)و همچنین استانداردهای مرتبط با پرکننده‌های ریشه دندان یا سیلر کانال ریشه (ISO 6876) تأیید کرده‌اند [۳۶].

۷- سیمان‌های دندانی خودترمیم شونده

امروزه با پیشرفت دانش شیمی، سیمان‌های خودترمیم‌شونده در حال توسعه و بهبود هستند. این مواد، گروهی از سیمان‌ها محسوب می‌شوند که قابلیت ترمیم خودکار آسیب‌های جزئی را دارا می‌باشند. این نوع سیمان‌ها به طور فزاینده‌ای در دندانپزشکی کاربرد یافته‌اند، زیرا می‌توانند طول عمر ترمیم‌ها را افزایش داده و نیاز به مداخلات درمانی دوباره را کاهش دهند. سیمان‌های دندانی

خودترمیم‌شونده از ترکیب‌هاي متعددی تشکیل شده‌اند که هر یک نقش مشخصی در فرآیند ترمیم ایفا می‌کنند. به طور کلی، این سیمان‌ها شامل ماتریس، پرکننده‌ها و عوامل خودترمیم هستند. ماتریس، جزء اصلی سیمان بوده و بیشتر از پلیمرهایی نظیر رزین‌های متاکریلات یا *گلاس-آینومر* تشکیل می‌شود. پرکننده‌ها موادی هستند که به ماتریس افزوده شده و ویژگي‌هاي مکانیکی و فیزیکی آن را بهبود می‌بخشند؛ این مواد می‌توانند شامل ذرات شیشه، سرامیک یا پلیمر باشند. مواد خودترمیم‌کننده نیز به سیمان اضافه می‌شوند تا امکان ترمیم خودکار ترک‌ها و آسیب‌های جزئی فراهم شود. انواع مختلفی از این عوامل خودترمیم‌کننده شامل نانوذرات، پلیمرهای هوشمند و سامانه‌های کپسولی می‌باشند [۳۷]. سازوکارهاي خودترمیمی در سیمان‌های دندانی ممکن است متفاوت باشد، اما به طور کلی زمانی که ترک یا آسیب جزئی در سیمان ایجاد می‌شود، عوامل خودترمیم‌کننده فعال شده، به محل آسیب منتقل شده و با ماتریس واکنش می‌دهند تا ترک یا آسیب را ترمیم کنند [۳۸]. سیمان‌های دندانی خودترمیم‌شونده در انواع مختلفی موجودند که هر کدام کاربردهای خاصی دارند. برای نمونه، سیمان‌های رزینی خودترمیم‌شونده که بر پایه رزین‌های متاکریلات هستند، بیشتر برای ترمیم پوسیدگی‌های کوچک و ترمیم‌های کامپوزیتی استفاده می‌شوند؛ در حالی که سیمان‌های *گلاس-آینومر* خودترمیم‌شونده، بیشتر در ترمیم پوسیدگی‌های سطح ریشه و ترمیم‌های موقت کاربرد دارند. از مزایای مهم این سیمان‌ها می‌توان به افزایش طول عمر ترمیم‌ها، کاهش نیاز به مداخلات درمانی دوباره، بهبود زیبایی و عملکرد ترمیم‌ها و جلوگیری از پیشرفت پوسیدگی اشاره کرد. با این حال، محدودیت‌هایی مانند هزینه بالاتر نسبت به سیمان‌های معمولی، نیاز به فناوری‌های خاص برای استفاده، و محدودیت در اندازه و نوع آسیب نیز وجود دارد [۳۷]. همچنین، در سال‌های اخیر استفاده از اکسیدهای فلزی و غیرفلزی در سامانه‌های درمانی نوین توجه پژوهشگران را جلب کرده است. این ترکیبات معدنی متخلخل نسبت به سایر مواد متداول، مزایایی همچون بهبود پایداری، امکان کنترل سینتیک واکنش‌های احتمالی، کاهش عوارض جانبی و افزایش زیست‌سازگاری دارند [۳۹]. بنابراین، طراحی اکسیدهای فلزی، نافلزی و اکسیدهای ترکیبی جدید در انواع سامانه‌های درمانی نوین روزبه‌روز رواج بیشتری یافته است.

۸- بحث و نتیجه‌گیری

شیمی، علم زندگی است و تصور زندگی بدون آن غیرممکن به نظر می‌رسد. یکی از مهم‌ترین مواد مورد استفاده در دندان‌پزشکی، سیمان‌های دندانی هستند که هنگام جراحی آماده و مورد استفاده قرار می‌گیرند. این مواد با توجه به فرمول‌های شیمیایی متفاوت، کاربردهای متنوعی دارند. انتخاب نوع سیمان به عوامل متعددی نظیر نوع ماده جذب‌شونده، شکل دندان، موقعیت سیمان‌کاری، نیازهای زیبایی‌شناختی بیمار و سایر سنجه‌ها وابسته است. انواع مختلفی از سیمان‌های دندانی وجود دارند که از جمله پرکاربردترین آن‌ها، سیمان‌های هیدرولیکی هستند که در واکنش با آب، فرآیند آبپوشی را طی کرده و قابل استفاده در محیط‌های مرطوب از جمله داخل دهان می‌باشند [۲۱].

سیمان انبوه تری‌اکسید معدنی نمونه‌ای برجسته از سیمان‌های دندانی هیدرولیکی است که دارای خواص فیزیکی، شیمیایی و ریستي قابل توجهی است و از مزایایی مانند خاصیت ضدباکتری، زیست‌سازگاری بالا و مقاومت مکانیکی مطلوب برخوردار است. سیمان‌های کلسیم سیلیکات به‌عنوان یکی از اجزای اصلی سیمان‌های انبوه تری‌اکسید معدنی شناخته شده و به‌خصوص در روش‌های دندانی که با پالپ یا سیستم ریشه دندان در تماس هستند، کاربرد وسیعی دارند [۳۳]. دی‌کلسیم سیلیکات و تری‌کلسیم سیلیکات از مهم‌ترین فازهای کلسیم سیلیکات بوده و مطابق استانداردهای بین‌المللی سازگاری زیستی هستند [۳۶]. از سوی دیگر، سیمان‌های دندانی خودترمیم‌شونده به‌عنوان نسل جدیدی از مواد دندانی مطرح بوده که پتانسیل قابل توجهی در بهبود کیفیت ترمیم‌ها و افزایش طول عمر آن‌ها دارند. با این حال، برای استفاده بهینه از این مواد، ضروری است که دندان‌پزشکان با خواص، کاربردها و روش‌های صحیح استفاده از آن‌ها به‌خوبی آشنا باشند [۳۷].

***عهده‌دار مکاتبات:**

آزمایشگاه نانو ساختارها و کاتالیزگرهای معدنی، پژوهشکده توسعه فرآیندهای شیمیایی، پژوهشگاه شیمی و مهندسی شیمی ایران، تهران، ایران. تلفن: ۰۲۱۴۴۷۸۷۷۲۰

پیام‌نگار: Tarlani@ccerci.ac.ir

مراجع

[1] A.D. Wilson, Chem. Soc. Rev. **7**, 265-296 (**1978**).
[2] L.I. Grossman, J. Endod. **13**, 409-415 (**1987**).
[3] E.E. Hill, J. Lott, Aust. Dent. J. **56**, 67-76 (**2011**).
[4] A.G. Heboyan, A.R. Vardanyan, A.A. Avetisyan, World Sci. 2(3(43)), 4-9 (**2019**).
[5] J.A. Von Fraunhofer, Int. Endod. J. **9**, 30-31 (**1976**).
[6] E.S. Newman, J. Res. Natl. Bur. Stand. (**1934**) 54(6), 347-355 (**1955**).
[7] K.J. Anusavice, C. Shen, H.R. Rawls, Phillips' Science of Dental Materials, Elsevier Health Sciences, (**2012**).
[8] W.S. Eakle, K.G. Bastin, Dental Materials: Clinical Applications for Dental Assistants and Dental Hygienists, Elsevier Health Sciences, (**2019**).
[9] J.S. Sivakumar, V. Sudhakar, C. Ravivarman, S. Vignesh, S. Ahamed, J. Contemp. Dent. Pract. **22**(6), 630-636 (**2021**).
[10] C.H. Pameijer, Int. J. Dent. **2012**(1), 752861 (**2012**).
[11] P. Mojon, R. Kaltio, D. Feduik, E.B. Hawbolt, M.I. MacEntee, Dent. Mater. **12**(2), 83-87 (**1996**).
[12] https://dentatropat.com/product

[13] G.H. Johnson, L.R. Hazelton, D.J. Bales, X. Lepe, J. Prosthet. Dent. **91**(5), 428-435 (**2004**).
[14] P.P. Lad, M. Kamath, K. Tarale, P.B. Kusugal, J. Int. Oral Health **6**(1), 116 (**2014**).
[15] https://dandanet.com
[16] D.V. Sita Ramaraju, R.K. Alla, V.R. Alluri, M. Raju, Am. J. Mater. Sci. Eng. **2**(3), 28-35 (**2014**).
[17] S. Heidari, T. Hooshmand, B.E. Yekta, A. Tarlani, N. Noshiri, M. Tahriri, Ceram. Int. **44**(10), 11682-11692 (**2018**).
[18] K.H.S. Chan, Y. Mai, H. Kim, K.C.T. Tong, D. Ng, J.C. M. Hsiao, Materials (Basel) **3**(2), 1228-1243 (**2010**).
[19] A. Tarlani, M.P. Zarabadi, Solid State Sci. **16**, 76-80 (**2013**).
[20] https://dandal.ir/fa/
[21] J. Camilleri, Front. Dent. Med. **1**, 9 (**2020**).
[22] H. Toraya, S. Yamazaki, Acta Crystallogr. Sect. B Struct. Sci. **58**(4), 613-621 (**2002**).
[23] A. Heboyan, A. Vardanyan, M.I. Karobari, A. Marya, T. Avagyan, H. Tebyaniyan, *et al.*, Molecules **28**(4), 1619 (**2023**).
[24] J. Camilleri, Int. Endod. J. **41**(12), 1107-1114 (**2008**).
[25] M. Torabinejad, T.F. Watson, T.R.P. Ford, J. Endod. **19**(12), 591-595 (**1993**).
[26] https://manadent.com/blog/160-what-is-dental-sealer
[27] M. Ceci, R. Beltrami, M. Chiesa, M. Colombo, C. Poggio, J. Conserv. Dent. Endod. **18**(2), 94-99 (**2015**).
[28] C. Primus, in Contemporary Endodontics for Children and Adolescents, Springer, (**2023**).
[29] J. Camilleri, Int. Endod. J. **41**(9), 791-799 (**2008**).
[30] J. Camilleri, Endod. Adv. Evidence-Based Clin. Guidel. 311-346 (**2022**).
[31] K. Demirkaya, B.C. Demirdöğen, Z.Ö. Torun, O. Erdem, E. Çırak, Y.M. Tunca, Hum. Exp. Toxicol. **36**(10), 1071-1080 (**2017**).
[32] B.W. Darvell, Endod. Mater. Clin. Pract. 1-13 (**2021**).
[33] C. Primus, J.L. Gutmann, F.R. Tay, A.B. Fuks, J. Am. Ceram. Soc. **105**(3), 1841-1863 (**2022**).
[34] C.M. Primus, F.R. Tay, L. Niu, Acta Biomater. **96**, 35-54 (**2019**).
[35] S. Ravaszová, K. Dvořák, Solid State Phenom. **296**, 41-46 (**2019**).
[36] K.E. Blankart, F.R. Lichtenberg, National Bureau of Economic Research, (**2022**).
[37] R. Dallaev, Materials **17**(10), 2464 (**2024**).
[38] X. Wang, T. Ding, J. Funct. Biomater. **15**(6), 165 (**2024**).
[39] S. Golsanamlou, A. Tarlani, Journal: Journal of Applied Research in Chemistry, (**2023**).