



A Study of Smart Antibacterial Nanomaterials in Dentistry: Structure, Mechanism, and Antimicrobial Application

Moluk Aivazi *

Assistant Professor, Department of Biomedical
Engineering, Apadana Institute of Higher
Education, Shiraz, Iran.

Abstract

Oral bacterial infections, including secondary caries, periodontal diseases, and peri-implantitis, remain significant challenges in modern dentistry. These conditions often lead to treatment failure and contribute to the alarming rise of antibiotic resistance. In response to these persistent issues, the development of smart antibacterial nanomaterials in dentistry offers an innovative and highly promising approach. Structurally, they encompass a wide array of compounds, such as metallic nanoparticles (e.g., silver and metallic oxides) and polymeric nanocomposites incorporating antimicrobial agents. The primary antimicrobial mechanisms involve direct damage to bacterial cell membrane integrity, disruption of cellular genome synthesis and vital proteins, and the generation of reactive oxygen species (ROS), all effectively leading to bacterial cell death. The “smart” aspect of these nanomaterials stems from their ability to selectively respond to specific environmental stimuli. These stimuli include pH changes (commonly found in acidic, infected oral environments), the presence of bacterial enzymes, or temperature variations. This intelligent responsiveness enables the targeted release of antimicrobial agents, resulting in more precise treatments and a significant reduction in undesirable toxicity to host cells. The applications of these nanomaterials in dentistry are vast and diverse, holding substantial potential to revolutionize current therapeutic methods. Ultimately, recent advancements in this field clearly indicate that smart antibacterial nanomaterials will play a pivotal and undeniable role in the future of oral health. This article comprehensively reviews the structure, antimicrobial mechanisms, “smart” characteristics, and clinical applications of these nanomaterials.

Keywords: smart nanoparticles, antibiotic resistance, biofilm, dental implant, secondary caries

Received: 29/August/2025

Accepted: 09/September/2025

eISSN: 3115-7610

ISSN: 3115-7572

نانومواد هوشمند آنتی‌باکتریال در دندانپزشکی: بررسی ساختار، کاربرد و عملکرد ضد میکروبی

ملوک عیوضی* | استادیار گروه مهندسی پزشکی، موسسه آموزش عالی آپادانا، شیراز، ایران.

چکیده

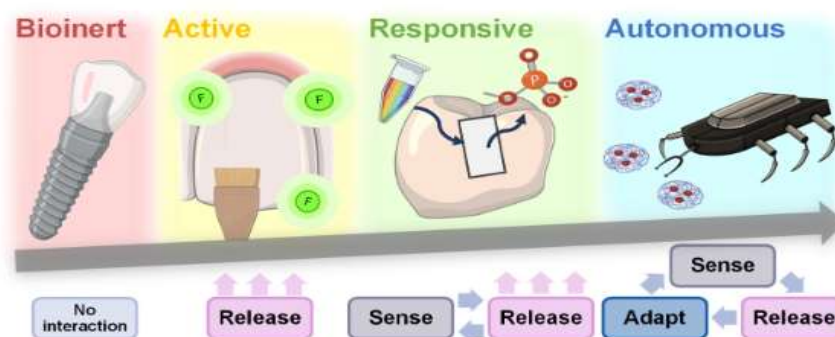
عفونت‌های باکتریایی دهانی، از جمله پوسیدگی ثانویه، بیماری‌های لثه و التهاب مجاور کاشت‌نی، از چالش‌های اصلی در دندانپزشکی مدرن محسوب می‌شوند که اغلب منجر به شکست درمان و افزایش مقاومت آنتی‌بیوتیکی می‌گردند. توسعه نانومواد دندانپزشکی هوشمند با خواص آنتی‌باکتریال، رویکردی نوین و امیدوارکننده را ارائه می‌دهد. ساختار این نانومواد شامل ترکیبات متنوعی نظیر نانوذرات فلزی و نانوکامپوزیت‌های پلیمری حاوی عوامل ضد میکروبی است. مکانیزم‌های ضد میکروبی شامل آسیب مستقیم به غشاء سلولی باکتری‌ها، اختلال در سنتز ژنوم سلولی و پروتئین‌ها، و تولید گونه‌های فعال اکسیژن است که به طور مؤثر منجر به مرگ سلولی باکتری می‌گردد. جنبه "هوشمندی" این نانومواد از توانایی آن‌ها در پاسخگویی به محرک‌های محیطی خاص (نظیر تغییرات pH در محیط‌های عفونی اسیدی، حضور آنزیم‌های باکتریایی یا دما) برای آزادسازی هدفمند عوامل ضد میکروبی ناشی می‌شود. این ویژگی امکان درمان‌های دقیق‌تر و کاهش سمیت بر روی سلول‌های میزبان را فراهم می‌آورد. کاربردهای این نانومواد در دندانپزشکی گسترده است. با این حال، پیشرفت‌های اخیر نشان می‌دهد که نانومواد دندانپزشکی هوشمند آنتی‌باکتریال نقش محوری در آینده سلامت دهان ایفا خواهند کرد. این مقاله به بررسی ساختار، مکانیزم‌های عملکرد ضد میکروبی، ویژگی‌های هوشمند و کاربردهای بالینی این نانومواد می‌پردازد.

کلیدواژه‌ها: نانومواد هوشمند، بیوفیلم، ایمپلنت دندان، پوسیدگی ثانویه، مقاومت آنتی‌بیوتیکی

مقدمه

تاریخچه

استفاده از نانوذرات خاص^۱ به عنوان عوامل ضد باکتری در دندانپزشکی و پزشکی توجه زیادی را به خود جلب کرده است. ذرات نامحلول کوچکتر از ۱۰۰ نانومتر، نانوذرات نامیده می‌شوند. این ذرات نسبت سطح به حجم بالاتری نسبت به ذرات غیر نانومقیاس دارند. این امر به آنها اجازه می‌دهد تا با غشاهای میکروبی ارتباط نزدیک‌تری برقرار کنند و سطح بسیار بزرگتری را برای عملکرد ضد میکروبی ارائه دهند. مقاومت آنتی‌بیوتیکی در بین باکتری‌ها در حال گسترش است و میکروارگانیسم‌ها نسبت به آنتی‌بیوتیک‌های سنتی، مقاومت کمتری در برابر نانوذرات فلزی پیدا می‌کنند. نانوذرات فلزی در محدوده اندازه ۱۱۰ نانومتر، به طور خاص، بیشترین اثر زیست‌کشی را در برابر باکتری‌ها نشان داده‌اند و ویژگی‌های ضدباکتری نانوذرات در حفره دهان برای مهار چسبندگی میکروبی از طریق دو مکانیسم اصلی به کار گرفته شد: مخلوط کردن مواد دندانانی با نانوذرات و پوشاندن سطوح با نانوذرات، با هدف نهایی کاهش توسعه بیوفیلم. پیشرفت‌های اخیر در فناوری و ابزارهای تولید امکان توسعه مواد دندانانی "هوشمند" را فراهم کرده است بطوری که عملکردهای متعددی را برای درمان‌های مختلف ارائه می‌دهند. به طور کلی، مواد زیستی "هوشمند" یک یا چند ویژگی خود را در پاسخ به یک محرک تغییر می‌دهند. مونتویا و همکاران عمده مواد زیستی هوشمند را بر اساس سطح هوشمندی آنها، که با درجه تعامل بین ماده زیستی و محیط اطراف و دقت در ارائه درمان تعیین می‌شود، طبقه‌بندی کرده‌اند. چهار سطح (شکل ۱) از مواد زیستی هوشمند طبقه‌بندی شده شامل زیست‌خنثی، زیست‌فعال، زیست‌پاسخگو و خودمختار می‌باشند [۱].



شکل ۱. طبقه‌بندی سطوح مواد زیستی هوشمند که شامل: زیست‌خنثی، زیست‌فعال، زیست‌پاسخگو یا خودمختار می‌باشند [۱].

محیط دهان و نیاز به مواد دندانپزشکی ضد میکروبی

حفره دهان دومین محیط میکروبی پیچیده در بدن انسان است. این محیط از باکتری‌ها، ویروس‌ها، قارچ‌ها و تک‌یاخته‌ها تشکیل شده است. بیش از ۷۰۰ گونه میکروبی را در حفره دهان تشکیل می‌دهند در شرایط عادی، تکثیر میکروارگانیسم‌های بیماری‌زای دهان سرکوب می‌شود و از پیشرفت بیماری جلوگیری می‌شود. دیس‌بیوز زمانی رخ می‌دهد که تعادل درون میکروبیوم مختل شود. به طور کلی، در این حالت، تعداد پاتوژن‌های مرتبط با بیماری افزایش می‌یابد در حالی که همزیست‌ها کاهش می‌یابند. عواملی که باعث ایجاد دیس‌بیوز دهانی می‌شوند شامل تغییرات در بزاق (جریان/ترکیب)، بهداشت دهان و دندان ضعیف، درمان آنتی‌بیوتیکی و انتخاب‌های سبک زندگی (رژیم غذایی، سیگار کشیدن) هستند. تغییر مضر در تعادل طبیعی میکروبیوتا ممکن است منجر به بیماری‌های دهانی مانند پوسیدگی،

پریودنتیت، عفونت‌های کانال ریشه، پری ایمپلنتیت، پالپیت، کاندیدیازیس، استوماتیت دندان مصنوعی و عفونت‌های بافت نرم شود. اگر بیوفیلم‌های بیماری‌زا کنترل نشوند، عفونت‌های دهانی می‌توانند مزمن شوند و باعث از بین رفتن بافت‌های دندانی و حتی از دست دادن دندان شوند بنابراین، توسعه مواد دندانی که درمان‌های ضد میکروبی ارائه می‌دهند برای جلوگیری از عفونت‌های دندانی و شکست زودهنگام درمان‌ها ضروری است. اگرچه عفونت‌های دهانی عموماً ماهیت چند میکروبی دارند، پاتوژن‌های خاص با عفونت‌های خاص دندانی مرتبط بوده‌اند. استراتژی اصلی برای توسعه مواد زیستی ضد میکروبی، جلوگیری از رشد یا هدف قرار دادن این پاتوژن‌ها است. به عنوان مثال استرپتوکوک موتانز^۱ پاتوژن اصلی مرتبط با پوسیدگی دندان بوده است، در حالی که رشد بیش از حد کاندیدا آلیکنس با ایجاد استوماتیت دندان مصنوعی ناشی از کاندیدا مرتبط است. استراتژی‌های پیچیده‌تر برای توسعه مواد دندانی ضد میکروبی شامل هدف قرار دادن ژن‌های خاص بیماری‌زا مربوط به یک عفونت خاص یا قطع مکانیسم‌های ارتباطی باکتریایی از طریق تخریب آنزیمی مولکول‌های سیگنالی‌نگ، مسدود کردن تولید و دریافت سیگنال است [۲].

مواد هوشمند دندانپزشکی برای درمان‌های ضد میکروبی و ضد بیوفیلم

در حوزه دندانپزشکی از عوامل ضد میکروبی فراوانی برای درمان عفونت‌های مختلف استفاده شده است. خلاصه‌ای از رایج‌ترین عوامل و مکانیسم‌های آنها در جدول ۱ ارائه شده است [۳، ۴]. عوامل ضد میکروبی بر اساس سطح هوشمندی زیست‌ماده طبقه‌بندی می‌شوند. به عنوان مثال، نقره یک عامل ضد میکروبی سنتی است که برای درمان/پیشگیری از پوسیدگی دندان استفاده می‌شود. یک روش معمول برای رساندن این عامل، اعمال پوشش روی یک سطح است. می‌توان با ساخت نانو حامل‌های مختلف حاوی نقره برای رساندن هوشمند به صورت کپسوله استفاده کرد. از طرفی مواد دندانی حاوی عملکردهای ضد میکروبی متعددی (کشتن پاتوژن‌ها و از بین بردن ماتریکس بیوفیلم) با ترکیب عوامل مختلف در یک حامل توسعه یافته است. به عنوان مثال، یک سیستم ضد باکتری دوگانه متشکل از نانوذرات بارگذاری شده با میریستین و فانسول می‌تواند اسیدزایی بیوفیلم را کاهش دهد، زیرا فانسولات‌ها به عنوان یک عامل مختل کننده غشاء عمل می‌کنند و میریستین بیوفیلم‌های *S. mutans* را از بین می‌برد [۵].

جدول ۱. مواد/عوامل مرسوم مورد استفاده در پیشگیری و درمان بیماری‌های دهان همراه با مکانیسم‌های ضد میکروبی آنها [۳، ۴]

نوع ماده	عامل ضد باکتری	مکانیسم عمل
عامل شیمیایی	مترونیدازول	مهار سنتز پروتئین از طریق برهم کنش با DNA
	تتراسایکلین	اتصال به زیر واحد ریبوزومی 30s باکتری
	سدیم هیپو کلراید	اختلال در یکپارچگی غشای سیتوپلاسمی، مهار آنزیمی و تغییرات بیوستتزی در متابولیسم سلولی
عامل و عصاره طبیعی	ایزوتیوسیانات	واکنش با پروتئین‌های مختل کننده فرایندهای بیوشیمیایی باکتری‌ها
	ترکیبات بره موم (فارسنول) اوروشیول	تداخل در نفوذ پذیری غشا و اختلال در تولید پتانتیل غشا و تولید ATP تخریب مرفولوژی و ساختار باکتری
آنزیم	پراکسیدازهای بزاقی	مهار رشد باکتری/القای آسیب به DNA
	دکستراناز	تخریب بیوفیلم
	لیزوزیم	تجمع باکتری‌ها و تاثیر بر چسبندگی آنها

بررسی ساختار، کاربرد و عملکرد ضد میکروبی نانومواد دندانپزشکی هوشمند آنتی‌باکتریال و پیشینه تحقیق

درمان‌های ضد میکروبی هوشمند زیست فعال

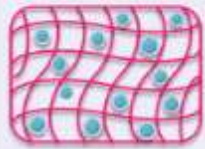
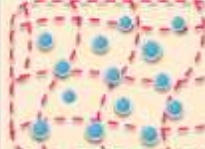
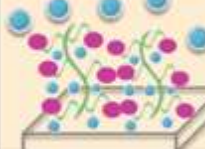
عوامل ضد میکروبی مختلفی از جمله ترکیبات شیمیایی (به عنوان مثال، آنتی‌بیوتیک‌هایی مانند کلرهگزیدین، مینوسیکلین)، مونومرهای کاتیونی (به عنوان مثال، متاکریلات آمونیوم چهارتایی)، پپتیدهای ضد میکروبی (AMPs) و پرکننده‌های فلزی و غیرفلزی (به عنوان مثال، اکسید روی) در درمان‌های زیست فعال به کار می‌روند، فناوری‌های زیست فعال معمولاً شامل ترکیب این عوامل ضد میکروبی در یک حامل (بیومتریال) برای ارائه درمان بلافاصله پس از کاشت هستند [۶، ۷]. مونومرهای زیست فعال معمولاً در رزین‌های دندان‌انی (کامپوزیت‌ها، پرایمرها و چسب‌ها) برای درمان‌های ضد میکروبی استفاده می‌شوند. آن‌ها اثرات ضدباکتریایی برتر را در حالت غیرپلیمریزه نشان داده‌اند، اما پس از پلیمریزاسیون نیز اثرات مهارتی تماسی ارائه می‌دهند. مونومرهای ضدباکتریایی همچنین می‌توانند در زنجیره پلیمری بی حرکت شوند، اما می‌توانند به عنوان یک ترکیب قابل شستشو نیز عمل کنند تلاش‌های اخیر بر افزایش غلظت مونومر (تا ۵٪) برای بهبود اثر ضد میکروبی بدون کاهش زیست سازگاری، جذب حلال، خواص مکانیکی و عملکرد پخت متمرکز شده است. این عوامل برای باکتری‌های گرم مثبت و گرم منفی مختلف، از جمله پاتوژن‌های مرتبط با پوسیدگی و اندو، آزمایش شده‌اند [۸، ۹]. از طرفی ترکیبات شیمیایی مانند آنتی‌بیوتیک‌های قابل شستشو (کلرهگزیدین، تتراسایکلین‌ها و مترونیدازول) در چسب‌ها [۱۰]، درزگیرها و دندان‌های مصنوعی [۱۱] گنجانده شده‌اند و از تشکیل بیوفیلم جلوگیری کرده و رشد میکروبی را سرکوب می‌کنند. پرکننده‌های زیست فعال به عنوان یک استراتژی امیدوارکننده برای غلبه بر نگرانی‌های مربوط به مقاومت میکروبی در برابر آنتی‌بیوتیک‌ها مورد توجه قرار گرفته‌اند. به طور کلی، این پرکننده‌ها معدنی (مانند فلزات) هستند و در اشکال مختلف با مقیاس نانو ساخته می‌شوند. رایج‌ترین پرکننده‌ها نانوساختارها (نقره، اکسید روی، ترکیبات تیتانیوم و مس، شیشه، نانوالماس‌ها)، پلیمری/آلی (پلی اتیلن ایمین آمونیوم چهارتایی، کیتوزان) هستند. برای فعال کردن درمان ضد میکروبی، پرکننده‌ها یا یون‌های آنها در ریزمحیط آزاد می‌شوند تا عوامل بیماری‌زا را از بین ببرند. به عنوان مثال، پاسخ ضدباکتریایی/ضدبیوفیلم نانوذرات را می‌توان با تغییر اندازه پرکننده، نسبت سطح به جرم، شکل ذرات، بار سطحی و پوشش‌های نانوذرات بهبود بخشید [۱۲].

درمان‌های ضد میکروبی هوشمند زیست پاسخگو

زیست‌موادهای پاسخگو به محرک، موادی هستند که قادر به حس کردن یک محرک و سپس پاسخ به آن با آزاد کردن عوامل درمانی هستند [۱۳]. به طور کلی، عامل ضد میکروبی در یک حامل (یک زیست ماده) گنجانده می‌شود که برای پاسخ به محرک خاص با تغییر خواص آن (به عنوان مثال، تخریب) طراحی شده است. برای آزاد کردن عامل ضد میکروبی، برخی از حامل‌ها ممکن است ساختار یا خواص خود را پس از پاسخ به محرک تغییر دهند [۱۴]. مواد زیستی ضد میکروبی پاسخگو به دلیل ظرفیت خود برای غلبه بر برخی از محدودیت‌های درمان‌های ضد میکروبی زیست فعال، از جمله هدف قرار دادن پاتوژن‌های منفرد و بهبود اثربخشی، محل و مدت زمان درمان، توجه قابل توجهی را به خود جلب کرده‌اند. این فناوری‌های ضد میکروبی پاسخگو توسط محرک‌های داخلی مختلف، از جمله سیگنال‌های ریزمحیطی (آنزیم‌های بزاقی و سطوح pH پایین تولید شده توسط پاتوژن‌ها)، متابولیت‌های میکروب‌ها (آنزیم‌های ترشح شده) یا با هدف قرار دادن پپتیدها/پروتئین‌ها/ژن‌های خاص روی سطح میکروب، فعال می‌شوند،

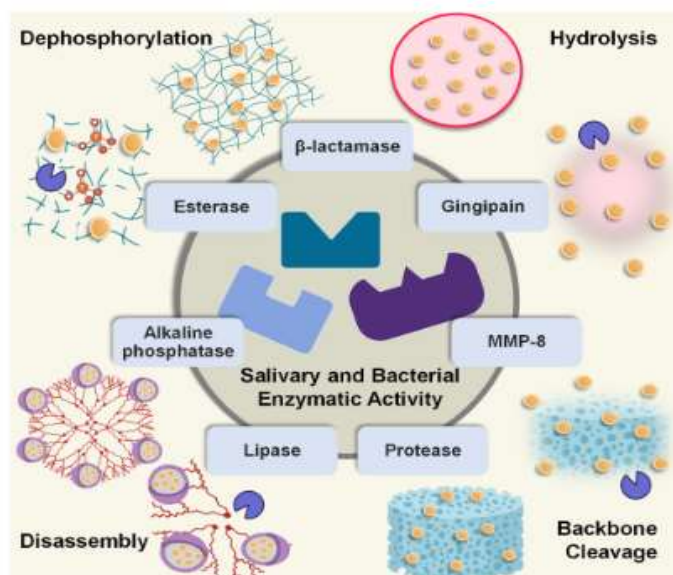
همچنین توسط محرک‌های خارجی (خارج از بدن) از جمله نور، مغناطیس، میدان‌های الکتریکی و بارگذاری ناشی از جویدن، فعال می‌شوند. مواد زیستی حساس به pH به تغییرات سطح pH محیط اطراف یا ریزمحیط واکنش نشان می‌دهند. بسته به طراحی آنها، مواد زیستی ممکن است منبسط شوند، فرو بریزند یا یک ویژگی خاص را تغییر دهند. به عنوان مثال، در یک محیط اسیدی، برخی از هیدروژل‌ها ممکن است منبسط شوند (تغییر ساختاری) تا داروها را آزاد کنند، (شکل ۲) [۱۵]. بطور مثال، رزین‌ها (چسب‌ها/سیلانت‌ها)، هیدروژل‌ها و نانوحامل‌ها (میسل‌ها) به عنوان حامل/وسیله نقلیه «هوشمند» برای فناوری‌های ضد میکروبی پاسخگو به pH برای درمان عفونت‌ها استفاده شده‌اند. به طور کلی، پلیمرهایی با گروه‌های اسید ضعیف (به عنوان مثال، اسید کربوکسیلیک) یا باز (به عنوان مثال، آمین‌های نوع اول و سوم) می‌توانند باعث ایجاد تغییراتی در یونیزاسیون، فعالیت سطحی، ترکیب زنجیره، حلالیت و پیکربندی در سطح pH مورد نظر شوند. نانوحامل‌های حساس به pH مانند نانوذله‌ها، میسل‌ها، ترکیبات پلیمری-دارویی، نانوذرات هسته-پوسته و نانوکره‌ها به عنوان حامل‌هایی برای این نوع مواد زیستی استفاده شده‌اند. عموماً، این ترکیبات با پیوندهای قابل تجزیه در pH، پیوندهای عرضی قابل تجزیه در pH یا شامل پلیمرهای تغییر بار ساخته می‌شوند که هنگام فعال شدن با محرک‌ها، بار مفید خود را به محیط آزاد می‌کنند [۱۶]. در واکنش‌پذیری آنزیمی، آنزیم‌ها به عنوان کاتالیزور واکنش‌های بیوشیمیایی را تسریع می‌کنند. آنزیم‌های بزاقی و باکتریایی به عنوان محرک برای آزادسازی عوامل ضد میکروبی (آنتی‌بیوتیک‌ها، پپتید ضد میکروبی^۱، نانوذرات) در درمان استفاده شده‌اند. باکتری‌ها و قارچ‌ها آنزیم‌های مختلفی از جمله لیپاز، استراز، فسفاتاز، اوره‌آز، ژلاتیناز و بسیاری دیگر را ترشح می‌کنند [۱۷] و به عنوان نشانگری برای نشان دادن مرحله فعال بیماری به هنگام درمان، شناخته شده‌اند. به عنوان مثال، یک محصول جانبی باکتریایی در پرودنتیت مزمن، آنزیم ماتریکس متالوپروتئیناز-۸ است که پاسخ ایمنی میزبان را تحریک می‌کند. این آنزیم به عنوان محرک در سیستم‌های دارورسانی و واکنش‌پذیر زیستی برای مدیریت پرودنتیت استفاده شده است. مطالعه توسط گو و همکاران هیدروکلراید مینوسیکلین و پپتید ضد میکروبی را در یک هیدروژل پلی (اتیلن گلیکول) که در پاسخ به آنزیم ماتریکس متالوپروتئیناز-۸ برای درمان بیماری پرودنتال زیست تخریب پذیر بود، کپسوله کردند [۱۸]. مواد زیستی پاسخگو به آنزیم می‌توانند طوری برنامه‌ریزی شوند که به آنزیم‌های مختلف، از جمله آنزیم‌های باکتریایی (مانند استراز، فسفاتاز، فسفولیپاز، بتالاکتاماز و ژلاتیناز)، آنزیم‌های سطح سلول و بزاق (مانند لیپاز، پروتئاز، استراز، آلفا آمیلاز، انیدراز، لیزوزیم و لاکتوپراکسیداز) پاسخ دهند (شکل ۳) [۱۹]. مواد زیستی ضد میکروبی حساس به نور پس از تحریک با نور، با عوامل بیماری‌زا مبارزه می‌کنند [۲۰]. بسیاری از مواد زیستی ضد میکروبی برجسته حساس به نور، از جمله فوتوکاتالیست‌ها، حساس‌کننده‌های نوری و فوتوترمال، توسعه یافته‌اند. به طور خاص، درمان فتودینامیک ضد میکروبی از نور بی‌ضرر برای فعال کردن عامل حساس به نور غیرسمی یا با حداقل سمیت جهت تولید گونه‌های سیتوتوکسیک برای ریشه‌کشی پاتوژن استفاده می‌کنند، که باعث آسیب به غشاهای دیواره‌های سلولی باکتری، تخریب لیپیدها، پروتئین‌ها و کانال‌های یونی، حذف آنزیم‌های متابولیک حیاتی، آگلوتیناسیون سلولی و مهار مستقیم فاکتورهای بیماری‌زایی برون‌زا مانند لیپوپلی ساکارید، کلاژناز و پروتئاز می‌شود [۲۱]. تأثیر بارهای الکتریکی (یعنی جریان‌ها) بر بیوفیلم‌های میکروبی طی تحریک الکتریکی سال‌هاست که به عنوان جایگزینی برای درمان شیمیایی بدون ایجاد مقاومت آنتی‌بیوتیکی یا به عنوان یک درمان کمکی برای افزایش اثربخشی درمان‌های مرسوم مورد مطالعه قرار گرفته است. مزایای این رویکرد، پوشش مکانی بالا و قابلیت کنترل زمانی، عملکرد سریع و حداقل تهاجم است. ظرفیت بارهای الکتریکی برای از بین بردن عوامل بیماری‌زا نه تنها به گونه باکتریایی، بلکه به بزرگی، چگالی و قطبیت بار الکتریکی نیز بستگی دارد [۲۲]. در برابر عوامل بیماری‌زای دهان، بارهای الکتریکی پاسخ ضد میکروبی در برابر

ژینژیوالیس^۱، موتانز^۲، فیکالیس^۳، آلبیکنز^۴ نشان داده‌اند. به طور معمول، سطوح جریان پایین کمتر از ۳۰ میلی‌آمپر برای کمتر از ۳۰ دقیقه ارزیابی شده است. مکانیسم‌های متعددی برای توضیح توانایی کشتن بارهای الکتریکی پیشنهاد شده است. این مکانیسم‌ها شامل نظریه تماس مستقیم است که در آن جریان الکتریکی مستقیماً با مختل کردن یکپارچگی غشای سلولی منجر به مرگ باکتری می‌شود. نظریه‌های کشتن غیرمستقیم با تولید مواد سمی واکنش‌پذیر، تغییرات pH، دما و گالوانتاکسی^۵ توضیح داده می‌شوند [۲۳].

 Antimicrobial agents  pH-sensitive polymer or moieties  Polymer  Antibacterial peptide (AMP)			
Carrier	Basic (pH>5.5)	Acid (pH<5.5)	Mechanism
Hydrogels/nanogels			Oscillatory swelling/contraction response due to the presence of charge-carrying functional groups.
Composites/coatings			Addition of pH-sensitive bonds attached within the drug carriers.
Micelles			Addition of pH-sensitive functional groups that control micelle formation/dissociation.
Dendrimers			Degradation of pH-cleavable linkers
Liposomes			pH variations induce changes in the permeability of the liposome membrane by protonation/deprotonation of functional groups

شکل ۲. حامل‌های حساس به pH برای انتقال درمان‌های ضد میکروبی خوراکی پس از تخریب/شکستن پیوندها/ترکیبات حساس به pH، محموله‌های خود را آزاد می‌کنند و می‌توانند به شکل ترکیبات ضد میکروبی، نانوپرکننده‌ها یا پپتیدهای ضد میکروبی باشند [۱۵].

1. Gingivalis
2. Mutans
3. Faecalis
4. Albicans
5. Galvanotaxis



شکل ۳. نمایش شماتیک مکانیسم‌های معمول دارورسانی مورد استفاده توسط مواد دندانپزشکی ضد میکروبی پاسخگو به آنزیم [۱۹].

درمان‌های ضد میکروبی هوشمند خودکار

مواد زیستی خودمختار می‌توانند حس کنند، به درمان‌های مختلف پاسخ دهند و با اشکال مختلف محرک سازگار شوند. بازخورد طبیعی آنها امکان ادغام کامل مواد زیستی با سیستم بیولوژیکی را فراهم می‌کند. به عنوان مثال، هیدروژل‌ها را می‌توان طوری برنامه‌ریزی کرد که محاسبات پیچیده را بر اساس ورودی‌هایی که منحصراً توسط محیط عملکرد آنها می‌شود، انجام دهند. با توسعه نسل جدیدی از مواد خودمختار تحت عنوان میکرو/نانوبوت‌ها به عنوان وسیله‌ای برای درمان عفونت‌ها به کار گرفته شده است. استفاده از میکرو/نانوبوت‌ها در پزشکی و دندانپزشکی، جایگزین آینده‌نگرانه جدیدی برای درمان بیماری‌ها ارائه می‌دهد. میکرو/نانوبوت‌ها ماشین‌هایی در مقیاس میکرو و نانو هستند که می‌توانند وظایف خاص متعددی مانند حسگری، تشخیص، تحویل و سم‌زدایی را از طریق نیروی محرکه خودمختار یا خارجی انجام دهند [۲۴]. میکرو/نانوبوت‌ها با موفقیت برای دارورسانی هدفمند، تشخیص، تصویربرداری و تشخیص سرطان ارزیابی شده‌اند [۲۵]. طراحی میکرو/نانوبوت‌ها بر تقلید از رفتار ارگانیسم‌های بیولوژیکی مانند باکتری‌ها یا سلول‌ها تمرکز دارد.

بحث و نتیجه گیری

با توجه به ماهیت پیچیده و دینامیک محیط دهان، که دائماً در معرض تغییرات فیزیولوژیکی و بیولوژیکی قرار دارد، مواد دندانی سنتی اغلب با چالش‌هایی مانند تخریب، سایش، شکستگی، و عدم توانایی در تحریک فرآیندهای ترمیمی مواجه بوده‌اند. مواد هوشمند با ارائه قابلیت‌های نوین، پتانسیل حل این مشکلات و ارتقاء چشمگیر کیفیت درمان‌های دندانی را دارند. این مواد می‌توانند به طور فعال در فرآیندهای ترمیم و بازسازی بافت‌های آسیب‌دیده دهان، امکان آزادسازی کنترل‌شده داروها را فراهم آورند، تشخیص زودهنگام بیماری‌ها را تسهیل کنند، و طول عمر ترمیم‌های دندانی را به طور قابل توجهی افزایش دهند. مواد زیست‌فعال که نه تنها با بافت‌های زنده سازگاری دارند، بلکه قادر به برقراری تعامل شیمیایی با بافت‌های اطراف خود و تحریک پاسخ‌های بیولوژیکی مفید، به ویژه در فرآیندهای ترمیم

و بازسازی، می‌باشند. مکانیزم عمل این مواد معمولاً بر اساس آزادسازی یون‌ها یا مولکول‌هایی است که به طور طبیعی در فرآیندهای بیولوژیکی بدن نقش دارند. این یون‌ها یا مولکول‌ها می‌توانند باعث القای تشکیل ماتریکس خارج سلولی، تسهیل معدنی‌زایی^۱ و یا تحریک سلول‌های بنیادی و عوامل رشد شوند. به طور خاص، بسیاری از مواد زیست‌فعال با بزاق دهان یا مایعات بافتی واکنش داده و لایه‌ای از مواد معدنی شبیه به مینای دندان (مانند هیدروکسی‌آپاتیت) در سطح خود تشکیل می‌دهند. این لایه معدنی به ایجاد اتصال قوی بین ماده و بافت دندانی یا استخوانی کمک کرده و همچنین می‌تواند به عنوان سدی در برابر نفوذ باکتری‌ها عمل کند. مواد زیست‌پاسخگو که توانایی تغییر خواص خود را در پاسخ به تغییرات مشخص در محیط بیولوژیکی اطرافشان نشان می‌دهند. این تغییرات می‌تواند شامل تغییر در pH، دما، غلظت آنزیم‌ها، کشش مکانیکی، یا حضور مولکول‌های خاص (مانند گلوکز یا پروتئین‌های التهابی) باشد. مکانیزم این پاسخگویی معمولاً مبتنی بر اصول شیمی فیزیکی و بیوشیمیایی است که در ساختار پلیمری یا نانو ساختاری ماده گنجانده شده است. هدف اصلی از طراحی مواد زیست‌پاسخگو، ایجاد سیستم‌های درمانی "هوشمند" است که بتوانند به صورت اختصاصی و در زمان و مکان مناسب، فعالیت درمانی خود را آغاز کنند. مواد هوشمند خودمختار، توانایی تشخیص و ترمیم آسیب‌های وارده به خود را به صورت خودکار و بدون دخالت خارجی دارند. این خودترمیمی می‌تواند از طریق مکانیزم‌های شیمیایی، فیزیکی، یا ترکیبی از هر دو صورت گیرد. هدف اصلی از توسعه این مواد، افزایش طول عمر و دوام مواد و سازه‌ها در مواجهه با تنش‌های محیطی و ساییدگی است. مکانیزم‌های خودترمیمی در مواد هوشمند خودمختار می‌تواند به حالت میکروکپسول‌های حاوی عامل ترمیم‌کننده، کانال‌های ریز حاوی عوامل ترمیم‌کننده، پلیمرهای با قابلیت پیوند معکوس و پلیمرهای حاوی میکروکپسول‌های باز یافتی باشد، در حالت میکروکپسول‌های حاوی عوامل ترمیم‌کننده، میکروکپسول با یک عامل ترمیم‌کننده (مانند یک مونومر یا رزین) و گاهی اوقات یک کاتالیزور پر شده است. هنگامی که ترکی در ماده ایجاد می‌شود، میکروکپسول‌ها شکسته شده و عامل ترمیم‌کننده آزاد می‌شود. این عامل با کاتالیزور واکنش داده و ترک را پر و ترمیم می‌کند در حالی که در حالت کانال‌های ریز حاوی عامل ترمیم‌کننده، به جای کپسول‌ها، شبکه‌ای از کانال‌های ریز در ماتریس ماده تعبیه شده که عامل ترمیم‌کننده را حمل می‌کنند، در حالت پلیمرهای با قابلیت پیوند معکوس، دارای پیوندهایی هستند که می‌توانند در دما یا شرایط خاص شکسته شده و دوباره تشکیل شوند. در صورت ایجاد ترک، اعمال حرارت یا انرژی می‌تواند باعث بسته شدن ترک و تشکیل مجدد پیوندها شود. در نهایت پلیمرهای حاوی میکروکپسول‌های باز یافتی از ساختارهایی استفاده می‌کنند که در صورت ایجاد ترک، مواد لازم برای بازسازی ساختار را فراهم می‌کنند. مواد هوشمند پتانسیل انتقالی در دندانپزشکی ایجاد کرده و مسیر را برای درمان‌های دقیق‌تر، پایدارتر و با حداقل تهاجم هموار می‌کنند. این مواد نه تنها خواص مکانیکی و فیزیکی بهبود یافته‌ای ارائه می‌دهند، بلکه به طور فعال در فرآیندهای بیولوژیکی دخیل شده و به دستیابی به نتایج درمانی مطلوب‌تر کمک می‌کنند. با غلبه بر چالش‌های موجود، مواد هوشمند در آینده می‌توانند به جزء مهم هر کلینیک دندانپزشکی تبدیل شوند تا لبخندهایی سالم‌تر و زیباتر را برای همه به ارمغان بیاورند.

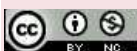
منابع

1. Budia HS, Jameel FM, Widjaja G, Alasady MS, Trias M, Mustafa YF, Fardeeva I, Kuznetsova M. Study on the role of nano antibacterial materials in orthodontics (a review). *Braz J Biol*. 2024;84:e257070.
2. Montoya C, Roldan L, Yu M, Valliani S, Ta C, Yang M, Orrego S. Smart dental materials for antimicrobial applications. *Bioact Mater*. 2023;24:1–19.

3. Ntow-Boahene W, Cook D, Good L. Antifungal polymeric materials and nanocomposites. *Front Bioeng Biotechnol*. 2021;9.
4. Makvandi P, Gu GT, Zare EN, Ashtari B, Moeini A, Tay FR, Niu LN. Polymeric and inorganic nanoscopic antimicrobial fillers in dentistry. *Acta Biomater*. 2020;101:69–101.
5. Song W, Ge S. Application of antimicrobial nanoparticles in dentistry. *Molecules*. 2019;24:1033.
6. Wang Y, Zhu M, Zhu XX. Functional fillers for dental resin composites. *Acta Biomater*. 2021;122:50–65.
7. Boutsiouki C, Frankenberger R, Lückner S, Krämer N. Inhibition of secondary caries in vitro by addition of chlorhexidine to adhesive components. *Dent Mater*. 2018;35:422–33.
8. Ahmed T, Abhilash A, Pramod RC, Pullishery F, Gufaran AS, Jaffar M. Comparison of Candidal growth and chlorhexidine efficacy on complete denture biofilms of patients with and without denture stomatitis—an in vivo study. *Ann Med Health Sci Res*. 2019.
9. Ramburrun P, et al. Recent advances in the development of antimicrobial and antifouling biocompatible materials for dental applications. *Materials*. 2021;14.
10. Wang X, Shan M, Zhang S, Chen X, Liu W, Chen G, Liu X. Stimuli-responsive antibacterial materials: molecular structures, design principles, and biomedical applications. *Adv Sci*. 2019;9.
11. Zhang Y, Jiang R, Lei L. Drug delivery systems for oral disease applications. *J Appl Oral Sci*. 2022;30.
12. Bayat MR, Baghani M. A review on swelling theories of pH-sensitive hydrogels. *J Intell Mater Syst Struct*. 2021;32:2349–65.
13. Zhu H, Huang Z, Shu X, Zhang C, Dong Z, Peng Q. Functional nanomaterials and their potentials in antibacterial treatment of dental caries. *Colloids Surf B Biointerfaces*. 2022;218:112761.
14. Vachher M, Sen A, Kapila R, Nigam A. Microbial therapeutic enzymes: a promising area of biopharmaceuticals. *Curr Res Biotechnol*. 2021;3:195–208.
15. Guo J, Sun H, Lei W, Tang Y, Hong S, Yang H, Tay FR, Huang C. MMP-8-responsive polyethylene glycol hydrogel for intraoral drug delivery. *J Dent Res*. 2019;98:564–71.
16. Gulfam M, Sahle FF, Lowe TL. Design strategies for chemical-stimuli-responsive programmable nanotherapeutics. *Drug Discov*. 2019;24:129–47.
17. Ren Y, Liu H, Liu X, Zheng Y. Photoresponsive materials for antibacterial applications. *Cell Rep Phys Sci*. 2020;1:100245.
18. Hu X, Huang YY, Wang Y, Wang X, Hamblin MR. Antimicrobial photodynamic therapy to control clinically relevant biofilm infections. *Front Microbiol*. 2018;9.
19. Zou P, Li P, Liu J, Cao P, Luan Q. Direct current exerts electricidal and bioelectric effects on *Porphyromonas gingivalis* biofilms partially via promoting oxidative stress and antibiotic transport. *J Microbiol*. 2022;60:70–8.
20. Zou P, Cao P, Liu J, Li P, Luan Q. Comparisons of the killing effect of direct current partially mediated by reactive oxygen species on *Porphyromonas gingivalis* and *Prevotella intermedia* in planktonic state and biofilm state—an in vitro study. *J Dent Sci*. 2022;17:459–67.
21. Montoya C, Jain A, Londoño AJ, Correa S, Lelkes P, Melo MA, Orrego S. Multifunctional dental composite with piezoelectric nanofillers for combined antibacterial and mineralization effects. *ACS Appl Mater Interfaces*. 2021;13:43868–79.
22. Montoya C, Kurylec G, Baraniya D, Tripathi A, Puri S, Orrego S. Antifungal effect of piezoelectric charges on PMMA dentures. *ACS Biomater Sci Eng*. 2021;7:4838–46.
23. Zhang Z, Wang L, Chan T, Chen Z, Ip M, Chan P, Sung J, Zhang L. Micro-/nanorobots in antimicrobial applications: recent progress, challenges, and opportunities. *Adv Healthc Mater*. 2022;11(6):2101991.
24. Shetty NJ. Nanorobots: future in dentistry. *Saudi Dent J*. 2013;25:49–52.
25. Hu M, Ge X, Chen X, Mao W, Qian X, Yuan WE. Micro/nanorobot: a promising targeted drug delivery system. *Pharmaceutics*. 2020;12:665.

استناد به این مقاله: عیوضی، ملوک. (۱۴۰۴). نانومواد هوشمند آنتی‌باکتریال در دندانپزشکی: بررسی ساختار، کاربرد و عملکرد ضد میکروبی. فصلنامه

پیشرفت‌های مهندسی در حوزه‌ی پزشکی و مواد، ۱(۲)، ۶–۱۵.



Journal of Recent Advancements in Material Science and Biomedical Engineering is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.