

مقاله اصلی

عنوان: کاربرد نانوذرات ضد میکروب در زخم پوش‌ها: مطالعه مروری

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۲۹ - تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۲۶

خلاصه

مقدمه: در حال حاضر، انواع نانومواد، از جمله نقره، طلا، مس و اکسید روی، برای کاربردهای نوآورانه در پانسمان‌های زخم مورد بررسی قرار گرفته‌اند. این نانومواد در درجه اول به عنوان عوامل ضد باکتری برای مبارزه با عفونت‌ها عمل می‌کنند، در حالی که خواص ضد التهابی و درمانی نیز از خود نشان می‌دهند. علاوه بر این، این فناوری، دارورسانی کنترل‌شده را تسهیل کرده و رشد بافت جدید را تقویت می‌کند. به طور کلی، نانومواد پتانسیل افزایش قابل توجه کیفیت درمان و بهبود نتایج درمانی، به ویژه برای زخم‌های پیچیده را دارند.

روش کار: این بررسی، مطالعات اخیر در مورد نانومواد مختلف، از جمله نقره، طلا، مس و اکسید روی، که در کاربردهای پانسمان زخم استفاده می‌شوند را بررسی کرد. جستجوی متون در پایگاه‌های داده‌ای مانند PubMed، Scopus و Web of Science با استفاده از کلمات کلیدی مانند "نانومواد"، "درمان زخم"، "ضد باکتری" و "عفونت" انجام شد. معیارهای ورود بر مطالعات منتشر شده در دهه گذشته که خواص ضد باکتری، ضد التهابی و درمانی نانومواد را در پانسمان‌های زخم ارزیابی کرده‌اند، متمرکز بود. مطالعات مورد بررسی در این مرور، از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۵ انتخاب شده‌اند تا روند پیشرفت و نوآوری‌های اخیر در استفاده از نانومواد در پانسمان‌های زخم به خوبی پوشش داده شود. استخراج داده‌ها شامل ارزیابی انواع نانومواد مورد استفاده، روش‌های سنتز آن‌ها، تکنیک‌های عملکردی و فعالیت‌های بیولوژیکی گزارش شده آنها و نتایج درمانی بود. این بررسی همچنین اثربخشی این نانومواد را در دارورسانی کنترل‌شده و بازسازی بافت مورد تجزیه و تحلیل قرار داد.

نتایج: این تجزیه و تحلیل نشان داد که نانوذرات نقره، طلا، مس و اکسید روی فعالیت ضدباکتریایی قابل توجهی از خود نشان می‌دهند که در جلوگیری از عفونت در مدیریت زخم بسیار مهم است. نانوذرات نقره، در کنار خواص ضدالتهابی و ترمیم زخم، پایدارترین اثرات ضدباکتریایی را نشان دادند و اغلب هنگام ادغام در پانسمان‌ها، بازسازی بافت را افزایش دادند. نانومواد طلا و مس به ترتیب نتایج امیدوارکننده‌ای در تحریک تکثیر سلولی و ترویج رگ‌زایی نشان دادند. نانوساختارهای اکسید روی به بسته شدن سریع زخم و کاهش التهاب کمک کردند. به طور کلی، نانومواد آزادسازی کنترل‌شده دارو را تسهیل کردند، اثربخشی ضد میکروبی را بهبود بخشیدند و از رشد بافت پشتیبانی کردند که نشان‌دهنده پتانسیل آن‌ها برای بهبود نتایج درمان زخم‌های پیچیده است.

نتیجه‌گیری: هدف از این مقاله مروری، ارائه مروری بر پیشرفت‌ها در پانسمان‌های زخم ضد میکروبی با نانوذرات است.

کلمات کلیدی: نانوذرات، پانسمان زخم، درمان زخم، ضد میکروبی، مهندسی بافت، عفونت

طاهره سادات طباطبایی^۱

طیبه سادات طباطبایی^۱

وحید شیرشاهی^{۲*}

^۱ کمیته تحقیقات دانشجویی، دانشکده پزشکی، دانشگاه علوم

پزشکی شاهرود، شاهرود، ایران

^۲ گروه علوم پایه، دانشکده پزشکی، دانشگاه علوم پزشکی

شاهرود، شاهرود، ایران

Email: shirshahi@gmail.com

مقدمه

پوست بزرگترین عضو بدن است و حدود ۱۵٪ از کل وزن بدن را به خود اختصاص می‌دهد. این عضو که مسئول حفاظت از اندام‌های داخلی بدن می‌باشد، تحت تاثیر عوامل مختلفی قرار گرفته و آسیب می‌بیند که سبب شکل‌گیری زخم می‌شود (۱). در این شرایط ورود باکتری‌ها و عوامل بیگانه به داخل بدن تسهیل شده که در نهایت عفونت‌های باکتریایی شکل می‌گیرد. در ادامه، این عفونت‌ها می‌توانند باعث ایجاد مقاومت باکتری‌ها در برابر آنتی‌بیوتیک‌ها شوند (۱، ۲). استفاده از زخم‌پوش‌ها به‌عنوان بخشی از راهکارهای درمانی، از گذشته مورد توجه بوده، اما نسل اولیه زخم‌پوش‌ها بیشتر نقش حفاظتی داشتند و فاقد عملکردهای فعال در فرایند ترمیم زخم بودند.

ظهور فناوری نانو، تحولی عظیم در طراحی و ساخت زخم-پوش‌های هوشمند ایجاد کرده است. نانو ذرات به دلیل داشتن ویژگی‌های منحصر به فرد مانند ابعاد بسیار کوچک و نسبت سطح به حجم بالا و نیز تعامل با میکروارگانیسم‌ها به‌گزینه‌ای مطلوب برای درمان زخم‌های عفونی و نیز کاربرد در زخم-پوش‌ها تبدیل شده‌اند. همچنین افزودن نانوذرات با خواص ضدباکتری، ضدالتهاب، آنتی‌اکسیدانی و ترمیمی، می‌توانند روند ترمیم زخم را تسریع کرده و از بروز عفونت‌های ثانویه جلوگیری کنند (۳). نانوذرات متنوعی تاکنون در طراحی زخم-پوش‌ها استفاده شده‌اند که هر کدام ویژگی‌ها و معایب خاص خود را دارند. در این میان، نانوذرات فلزی مانند طلا، نقره و مس دارای اثرات ضد میکروبی بالایی هستند (۴، ۵). از سوی دیگر، نانوذرات پلیمری به‌عنوان حامل‌های دارویی در نظر گرفته شده که سبب رسانش هدفمند دارو به محل زخم می‌شوند. همچنین نانوذرات کربنی مانند نانولوله‌های کربنی، گرافن و مشتقات آن و فولرن‌ها به دلیل خواص منصر به فرد، جایگاه خاصی در این حوزه پیدا کرده‌اند (۶). علاوه بر این، نانوذرات نوظهوری مانند مکسین و ژانوس با ساختارهای خاص خود، امکان ایجاد اثرات ضد میکروبی بالایی را فراهم کرده‌اند اما با وجود پیشرفت‌های چشمگیر در این حوزه، چالش‌هایی همچون

سمیت نانوذرات، پایداری پایین و هزینه‌ی بالای تولید، ضرورت مطالعات بیشتر را برای توسعه کاربردهای زخم‌پوش‌ها در درمان زخم‌های عفونی و مهندسی بافت افزایش داده است. در این مقاله مروری، به بررسی مهم‌ترین نانوذرات ضد میکروب مورد استفاده در زخم‌پوش‌ها شامل نقره، طلا، مس، اکسید روی، لیپوزوم، نانولوله‌های کربنی، گرافن، فولرن، مکسین و ژانوس پرداخته می‌شود. هدف از این مطالعه، آشنایی با ویژگی‌ها، مکانیسم‌های عملکرد، مزایا، محدودیت‌ها، و چشم‌انداز آینده‌ی کاربرد این نانوذرات در درمان زخم‌های عفونی است و بهبود روند درمان زخم می‌باشد.

روش کار

این بررسی، مطالعات اخیر در مورد نانومواد مختلف، از جمله نقره، طلا، مس و اکسید روی، که در کاربردهای پانسمان زخم استفاده می‌شوند را بررسی کرد. جستجوی متون در پایگاه‌های داده‌ای مانند PubMed، Scopus و Web of Science با استفاده از کلمات کلیدی مانند "نانومواد"، "درمان زخم"، "ضد باکتری" و "عفونت" انجام شد. معیارهای ورود بر مطالعات منتشر شده در دهه گذشته که خواص ضد باکتری، ضد التهابی و درمانی نانومواد را در پانسمان‌های زخم ارزیابی کرده‌اند، متمرکز بود. استخراج داده‌ها شامل ارزیابی انواع نانومواد مورد استفاده، روش‌های سنتز آن‌ها، تکنیک‌های عملکردی و فعالیت‌های بیولوژیکی گزارش شده آنها و نتایج درمانی بود. این بررسی همچنین اثربخشی این نانومواد را در دارورسانی کنترل‌شده و بازسازی بافت مورد تجزیه و تحلیل قرار داد.

نتایج

با پیشرفت‌های گسترده در علم و فناوری نانو، توجه محققان به نانوذرات به یکی از ابزارهای کلیدی در طراحی و تولید زخم‌پوش‌های مدرن معطوف شده است. این نانوذرات به دلیل ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی منحصر به فرد خود، کاربردهای

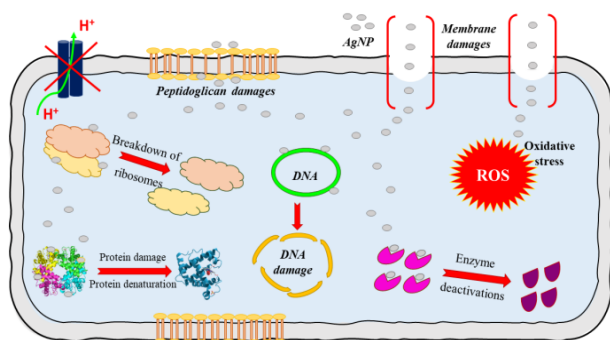
پرداخته و همچنین مروری بر مطالعات انجام شده در خصوص استفاده از این ذرات در زخم پوش ها صورت می گیرد. شکل ۱ نیز به طور خلاصه به معرفی انواع نانوذرات پرداخته است.

گسترده ای در بهبود زخم دارند و می توانند عملکرد زخم پوش ها را به طرز قابل توجهی بهبود بخشند (۷). در این بخش، به بررسی انواع مختلف نانوذرات مورد استفاده در زخم پوش ها



شکل ۱. انواع نانوذرات مورد استفاده در زخم پوش

که نقش قابل توجهی در آسیب به باکتری ها دارد (۹). علاوه بر این، Ag NPs با DNA سلولی تعامل داشته و بیشتر به بازهای گوانین و سیتوزین متصل می شوند، که می توانند تغییراتی در DNA ایجاد کنند. این تعامل موجب افزایش دیمریزاسیون بازهای تیمین در DNA می شود که می تواند آسیب بیولوژیکی بیشتری به سلول ها وارد کند (شکل ۲) (۱۰).



شکل ۲. مکانیزم های ضد میکروبی نانوذرات نقره (۱۱)

نانوذرات نقره (Ag NPs)

فلز نقره، که عنصر چهل و هفتم جدول تناوبی است، از گذشته در ضد عفونی کردن آب و حتی درمان بیماری هایی مانند صرع و اختلالات عصبی کاربرد داشته است. این فلز گران بها در سایز نانومتری خواص و ویژگی های منحصر به فردی داشته که سبب تمایز ویژگی های آن نسبت به نقره حجیم شده است. از این رو Ag NPs به عنوان یکی از نانو مواد مهندسی شده در بسیاری از محصولات مورد استفاده قرار می گیرند (۸). پتانسیل بالای Ag NPs برای مقابله با باکتری ها سبب استفاده گسترده از این ذرات در تخریب سلول های باکتریایی شده است. شواهد حاکی از آن است که نقره با گروه های تیول و سولفیدریل در سلول های باکتری تعامل داشته و موجب تغییرات ساختاری در غشای سلولی می شود که در نهایت باعث دپولاریزه شدن دیواره سلولی، تغییر بار منفی غشا و افزایش نفوذ پذیری آن شده، که منجر به تخریب غشای سلولی و افزایش نفوذ این نانوذرات به داخل سلول می گردد. با ورود این نانو مواد به داخل سلول، تولید گونه های فعال اکسیژن (ROS) با سرعت بیشتری انجام می شود

افزایش غلظت نانوذرات در رده Vero نشان داد. همچنین در آزمون Ag NPs ، Wound Scratch پس از گذشت ۲۴ ساعت، سبب مهاجرت سلول‌ها شده و به ترمیم ۲۰ درصدی شیار ایجاد شده در این آزمون کمک کردند (۱۶).

نانوذرات طلا (AuNPs)

طلا به دلیل ویژگی‌های برجسته‌ای مانند درخشندگی، چکش‌خواری و پایداری، از دیرباز مورد توجه بشر بوده است (۱۷). این فلز نجیب از دوران روم باستان، برای ساخت شیشه‌های رنگی مورد استفاده بوده است (۱۸-۲۰). در قرن نوزدهم، مایکل فارادی با سنتز محلول‌های کلئیدی طلا به این نکته پی برد که این محلول‌ها می‌توانند نور را به شکلی خاص پراکنده کرده و رنگ‌های متنوعی از خود نشان دهند (معمولا قرمز یا بنفش بسته به اندازه ذرات). این ویژگی ناشی از پدیده‌ای است که امروزه به آن رزونانس پلاسمون سطحی (SPR^1) گفته می‌شود. در اثر این پدیده، الکترون‌های آزاد در سطح نانوذرات طلا، در اثر تحریک توسط نور، به ارتعاش درآمده و ویژگی‌های نوری خاصی از خود نشان می‌دهند. همچنین فارادی در تحقیقات خود، روش‌هایی برای تهیه و بررسی این نانوذرات ارائه داد و یکی از اولین افرادی بود که به بررسی اثر اندازه ذرات بر خواص نوری آن‌ها پرداخت (۲۱). این نانوذرات به عنوان یکی از پایدارترین نانومواد نجیب (۲۲) به دلیل ویژگی‌های نوری منحصر به فرد و پایداری شیمیایی بالا، به یک حوزه پژوهشی مهم در علم نانو تبدیل شده‌اند (۲۳). این ذرات به‌ویژه در تصویربرداری‌های مولکولی کاربرد فراوان دارند. هنگامی که این ذرات به‌عنوان نشانگر نوری به سلول‌ها و پروتئین‌های خاص متصل می‌شوند، قادر به پیگیری مسیرهای مولکولی در بدن هستند. این ویژگی به‌ویژه در درمان سرطان اهمیت دارد، زیرا نانوذرات طلا می‌توانند به‌عنوان ابزار دقیق برای تشخیص و نظارت بر رشد تومور استفاده شوند. همچنین، به دلیل ویژگی فوتوترمال (توانایی تبدیل انرژی نور به گرما)، نانوذرات طلا می‌توانند با دریافت انرژی از نور لیزر، حرارت

در مطالعه‌ای توسط Marek Konop و همکاران، زخم‌پوشی بر پایه پودر کراتین و Ag NPs طراحی شد که فعالیت ضدباکتریایی قابل توجهی علیه *Escherichia coli* (*E. coli*) و *Staphylococcus aureus* (*S. aureus*) از خود نشان داد (۱۲). مطالعه‌ای دیگر توسط Chuanliang Liu و همکاران، با ترکیب پلیمر کیتوزان، Ag NPs و کورکومین (ماده موثره زردچوبه)، نانوالیافی سنتز کردند که به دلیل حضور نقره و کورکومین، دارای اثر هم‌افزایی در مهار باکتری‌ها و تسریع ترمیم زخم بودند (۱۳). Alexandra Bîrcă و همکاران، با استفاده از پلتفرم میکروفلوئیدی موفق به سنتز Ag NPs شدند. آن‌ها زخم‌پوش‌هایی بر پایه سدیم آلزینات تهیه کردند که ترکیبات متنوعی از نقره و اسید هیالورونیک داشتند. تمامی ترکیبات تأثیر بازدارنده‌ای علیه *S. aureus* و *E. coli* داشتند و از تشکیل بیوفیلم جلوگیری کردند. همچنین، نتایج رنگ‌آمیزی فلوئورسانس در سلول‌های کراتینوسیتی HaCaT، نشان‌دهنده سازگاری زیستی مناسب زخم‌پوش‌ها بود (۱۴). در پژوهشی توسط Caidan Zhang و همکاران، زخم‌پوش‌های هیدروژلی با استفاده از پلیمر پلی‌سوکسینیمید و $AgNO_3$ سنتز شدند. پس از الکتروریسی و احیای درجا با هیدرازین، Ag NP ها با قطر ۱۰ تا ۷۰ نانومتر تولید شدند. این زخم‌پوش‌ها ضمن داشتن ظرفیت جذب آگزودای مناسب، بیش از ۹۹.۹۹٪ از باکتری‌های *E. coli* و *S. aureus* را مهار کردند. در مطالعات *in vivo* نیز، پس از ۱۴ روز، تشکیل کلاژن در بافت‌های درمان‌شده به‌وضوح مشاهده شد و بیانگر تسریع روند ترمیم زخم بود (۱۵). در مطالعه‌ای دیگر، Gayathri Vijayakumar و همکاران، Ag NPs را به روش سبز با استفاده از عصاره قارچ‌های مختلف سنتز کردند. در میان آن‌ها، عصاره قارچ *Phellinus adamantinus* بیشترین پایداری را نشان داد. نانوذرات تولیدشده با قطر حدود ۵۰ نانومتر، در برابر باکتری‌های *Bacillus subtilis* (*B. subtilis*)، *Pseudomonas aeruginosa* (*P. aeruginosa*)، *E. coli* و *S. aureus* فعالیت ضدباکتریایی نشان دادند. جالب توجه اینکه *S. aureus* بیشترین حساسیت را نسبت به این نانوذرات داشت. همچنین، آزمون MTT کاهش بقاء سلولی را با

¹ Surface Plasmon Resonance

تولید کرده و با آسیب رساندن به سلول‌های سرطانی، بدون آسیب به بافت‌های سالم اطراف، به درمان کمک کنند. این ویژگی‌ها باعث شده‌اند که نانوذرات طلا نه تنها در پزشکی، بلکه در فناوری‌های حسگری و ساخت دستگاه‌های پیشرفته نیز کاربرد داشته باشند (۱۸).

Lin Zhou و همکاران با استفاده از پارچه‌های ابریشمی بافته شده که حاوی نانوذرات طلا و داروی جنتامایسین بودند، موفق به مهار رشد باکتری‌های *E. coli* و *S. aureus* شدند. علاوه بر این آزمایشات انجام شده در مدل‌های حیوانی قابلیت بهبود زخم را داشتند و بعد از گذشت ۱۵ روز، زخم‌ها به طور کامل بهبود پیدا کردند (۲۴). در تحقیق دیگری که توسط Sharafaldin Al-Musawi و همکاران انجام شد، با استفاده از نانوالیاف تری‌پلی‌فسفات (TPP) و کیتوزان مملو از کپسایسین (یک ترکیب شیمیایی فعال در فلفل تند) که با نانوذرات طلا بارگیری شده بود، به طراحی زخم‌پوشی با خواص ضد میکروبی پرداختند. نتایج نشان داد که این زخم‌پوش‌ها به طور موثری نرخ بهبود زخم را در شرایط *in vivo* نسبت به گروه کنترل افزایش دادند (۲۵). با توجه به ساختار منحصر به فرد نانولوله‌های هالوئیت (HNTs) و قابلیت بارگذاری فلزات، Zhao و همکاران با هدف ساخت زخم‌پوشی با اثر فوتوترمال و کارایی ضدباکتریایی بالا، از این نانوذرات بهره گرفتند. HNTs نانوذرات لوله‌ای با طول ۲۰۰ نانومتر و قطر داخلی ۱۰ تا ۳۰ نانومتر هستند که می‌توانند فلزاتی مانند طلا را بارگذاری کرده و عملکردهای فوتوترمال داشته باشند. این نانوذرات با ترکیب با اسید اولئیک، اولیامین و اسید آسکوربیک برای سنتز نانوذرات طلا به کار رفتند. با بهره‌گیری از پلیمر کیتین، زخم‌پوش‌های هیدروژلی تولید شده که با استفاده از این نانوذرات (HNTs حاوی AuNPs)، کارایی بالایی در مهار باکتری‌های *E. coli* و *S. aureus* در آزمایش‌های *in vivo* داشتند، به‌طوری که بعد از ۷ روز بهبود ۸۰ درصدی زخم‌ها مشاهده شد. نتایج این مطالعه نشان داد که ترکیب HNTs و AuNPs نه تنها خواص فوتوترمال موثری ارائه می‌دهد، بلکه می‌تواند به عنوان یک زخم‌پوش هوشمند در درمان زخم‌های عفونی استفاده شود.

(۲۶). Chuan Liu و همکاران موفق شدند نانوذرات Fe_3O_4 را با استفاده از روش رسوب شیمیایی سنتز کرده و آن‌ها را با AuNPs و MOF ترکیب کنند تا نانوزیم‌های هیبریدی (FMA) ایجاد کنند. این نانوزیم‌ها با تولید رادیکال‌های آزاد و تولید ROS مکانیسم‌های ضد میکروبی قدرتمندی را به نمایش گذاشتند. نتایج آزمایش‌های *in vivo* نشان داد که درمان زخم‌ها با ترکیب نانوذرات FMA و H_2O_2 منجر به بهبود سریع و ۸۰ درصدی در روز سوم شد و زخم‌ها در روز نهم به‌طور کامل بهبود یافتند (۲۷).

۳-۳- نانوذرات مس (Cu NPs)

مس به عنوان یک عنصر ضروری در بدن موجودات زنده شناخته شده و در بیش از ۳۰ نوع پروتئین، از جمله لیزیل اکسیداز و سوپر اکسید دیسموتاز، نقش مهمی ایفا می‌کند. از دیرباز مس به عنوان یک عامل استریل‌کننده و ضد عفونی‌کننده استفاده شده است. حتی امروزه نیز، به دلیل هزینه کمتر و خواص ضد میکروبی عالی، در مقایسه با طلا و نقره توجه زیادی به آن می‌شود (۲۸، ۲۹). Cu NPs به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد خود، به طور گسترده در زمینه‌های ضد میکروبی و کاربردهای صنعتی مورد استفاده قرار گرفته‌اند (۳۰). Cu NPs توانایی مهار رشد باکتری‌ها و میکروارگانیسم‌ها را دارند و باعث آسیب به غشا و پروتئین‌های حیاتی باکتری می‌شوند و در نهایت منجر به مرگ سلولی از طریق تولید بیش از حد ROS می‌گردند (۳۱-۳۳). این نانوذرات همچنین می‌توانند با دیگر یون‌های فلزی درون سلول رقابت کرده و غلظت نیتریک اکسید را افزایش دهند، که به مسمومیت سلولی کمک می‌کند (۳۱، ۳۴). علاوه بر این، استفاده از سطوح مسی در بیمارستان‌ها به عنوان یک سطح خود تمیزشونده، می‌تواند به کنترل انتقال عفونت‌ها کمک کند. مطالعات نشان داده‌اند که این سطوح در کاهش عفونت‌های ناشی از باکتری‌هایی مانند *S. aureus* مؤثر هستند و استفاده از آن‌ها می‌تواند به عنوان یک راهکار مؤثر در مقابله با عفونت‌های بیمارستانی در نظر گرفته شود (۳۱). مس و مشتقات آن همچنین نقش اساسی در بهبود زخم داشته و می‌توانند با تقویت بیان مولکول‌های ماتریکس خارج سلولی مانند

۳-۴- نانوذرات اکسید روی (ZnO)

روی (Zn) به عنوان یک عنصر حیاتی در بدن انسان به وفور در میوسیت‌ها یافت می‌شود و نقش کلیدی در عملکرد بسیاری از آنزیم‌ها و ماکرومولکول‌ها ایفا می‌کند. این عنصر در قالب کوآنزیم و در ساختارهای موسوم به زینک‌فینگر، که پروتئین‌ها را به DNA یا دیگر پروتئین‌ها متصل می‌کند، حضور فعالی دارد (۴۰). اکسید روی به عنوان یک نیمه رسانای گروه II-VI، در مقیاس نانومتری به دلیل خواص ضد میکروبی، زیست‌سازگاری، نیمه‌رسانایی و خواص پیزوالکتریک منحصر به فرد خود، علیه باکتری‌های گرم مثبت و گرم منفی مؤثر بوده و از اواسط قرن بیستم به عنوان یک عامل ضد میکروبی مورد توجه قرار گرفته است (۴۱).

این نانوذرات که با ساختارهای کریستالی ورتزیت، زینک بلند و راک‌سال مشاهده می‌شوند، قابلیت تولید گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) را دارند؛ عاملی که در مهار بیوفیلم و نابودی باکتری‌های مقاومی مانند *P. aeruginosa* و *S. aureus* مؤثر است (۴۲-۴۴). همچنین فعالیت ضد میکروبی ZnO تحت تأثیر نور UV و حتی در تاریکی افزایش می‌یابد. علاوه بر این شکل و مورفولوژی ZnO تأثیر مستقیمی بر عملکرد آن‌ها داشته به گونه‌ای که بر اساس مطالعات انجام شده، نانوذرات میله‌ای شکل اثر ضد میکروبی قوی‌تری دارند (۴۵، ۴۶).

Mohamed Hasanin و همکاران، زخم‌پوشی از لیاف پنبه‌ای طراحی کردند که با لیاف پلی‌استری تقویت شده بود. آن‌ها یک کامپوزیت متشکل از کیتوزان، گلیکوزن و ZnO با اندازه ۳۰ تا ۸۰ نانومتر تهیه کرده و زخم‌پوش را با این کامپوزیت آغشته کردند. نتایج نشان داد که رشد باکتری‌های *P. aeruginosa* و *S. aureus* به‌طور چشمگیری مهار شد. همچنین در مطالعات *in vivo*، موش‌های تحت درمان با زخم‌پوش سنتزی نسبت به گروه کنترل (درمان با گاز استریل)، روند بهبود سریع‌تری را تجربه کردند (۴۷).

Hussan Ibne Shoukani و همکاران با استفاده از عصاره ریشه گیاه *Moringa oleifera* و استات روی به‌عنوان پیش‌ماده، موفق به سنتز ZnO شدند. سپس با استفاده از پلیمر

فیبرینوژن، کلاژن و اینتگرین به بهبود زخم کمک کنند. امروزه استفاده از پانسمان‌ها و زخم‌پوش‌های مبتنی بر مس در حال افزایش است. در واقع، مس به دلیل سمیت سلولی نقره، به طور گسترده‌ای جایگزین پانسمان‌های حاوی نقره شده است (۳۵).

با هدف طراحی زخم‌پوش‌های دو لایه بر مبنای نانوذرات مس، Ensieh Ghasemian Lemraski و همکاران از پلیمرهای پلی-وینیل‌الکل (PVA) و کیتوزان استفاده کرده که سبب حساسیت بالاتر باکتری‌های *S. aureus* و *Bacillus cereus* (*B. cereus*) نسبت به باکتری‌های *P. aeruginosa* و *E. Coli* شدند. علاوه بر این نتایج آزمایش‌های *in vivo* نشان داد که درمان زخم‌ها با استفاده از زخم‌پوش طراحی شده سبب بهبود ۹۷ درصدی زخم بعد از گذشت ۱۶ روز شد (۳۶). Rabia Rafi و همکاران با بهره‌گیری از نانوالیاف پلی‌اورتان حاوی Cu NPs زخم‌پوش‌های زیست‌سازگار با عملکرد ضد میکروبی طراحی کردند که منجر به مهار رشد باکتری‌های *S. aureus* و *E. Coli* شدند. علاوه بر این، نتایج کشت سلولی در شرایط *in vitro* به وضوح نشان داد که این نانوذرات در تکثیر و مهاجرت سلول‌های فیروبلاست سهم داشته و در شرایط *in vivo* نیز به ترمیم زخم و نیز رگ-زایی در محل زخم کمک کردند (۳۳). همچنین Ajalli و همکاران نشان دادند که Cu NPs هیبرید شده با اکسید گرافن در ترکیب با نانوالیاف PVA، خواص ضد میکروبی و زیست‌سازگاری دارند و در شرایط *in vivo* بعد از ۱۴ روز منجر به بهبود ۹۲ درصدی زخم می‌شوند (۳۷). در بررسی‌های صورت گرفته توسط Narges Johari و همکاران، استفاده از Cu NPs در زخم‌پوش‌های هیدروژلی بر پایه کیتوزان و سدیم آلژینات، منجر به مهار رشد باکتری‌های *S. aureus* و *E. Coli* شد (۳۸). در مطالعه انجام شده توسط Jiahui Zhao و همکاران، با هدف درمان زخم‌های دیابتی، زخم‌پوش‌هایی بر پایه Cu NPs و پلی-الیزین (PEL) سنتز شد که فعالیت ضد میکروبی قابل توجهی داشته و در درمان زخم‌های آلوده به باکتری در مدل حیوانی مؤثر بوده به گونه‌ای که پس از گذشت ۱۲ روز، نرخ بهبود نزدیک به ۱۰۰ درصد گزارش شد (۳۹).

پلی اتیلن گلیکول (PEG)، نانوذرات پایدار شده و داروی سیروفلوکساسین درون آن‌ها بارگذاری شد. تصاویر SEM نشان دادند که نانوذرات استوانه‌ای شکل بوده و توده‌های کریستالی تشکیل داده‌اند. نتایج آزمون‌های ضدباکتریایی علیه گونه‌های *S. aureus*، *E. coli*، *P. aeruginosa*، *Enterococcus faecalis* (E و S) نشان داد که این نانوذرات توانایی مهار رشد باکتری‌ها را با نواحی مهاری به قطر ۱۱ تا ۱۴ میلی‌متر دارند و همچنین مانع تشکیل بیوفیلم می‌شوند. آزمون سمیت سلولی نشان داد که ZnO حاوی دارو سمیت کمتری نسبت به ZnO فاقد دارو دارند و درصد بقای سلول‌های BHK21 در حضور آن‌ها بالا گزارش شد. در آزمون همولیز نیز، در مقایسه با نانوذرات شیمیایی، نانوذرات زیستی سنتز شده با عصاره گیاه هیچ‌گونه همولیز قابل توجهی نشان ندادند. در بررسی‌های *in vivo*، دو گروه آزمایشی بررسی شدند. گروه اول با نانوذرات دارویی شیمیایی درمان شده و بهبودی زخم‌ها در آن‌ها ۲۰٪ سریع‌تر از گروه کنترل گزارش شد. گروه دوم که با نانوذرات سنتز شده به روش زیستی درمان شدند، به‌طور مؤثر عفونت ناشی از *S. aureus* را ظرف دو روز بهبود دادند؛ در حالی که در گروه کنترل منفی این مدت به ۶ روز رسید. همچنین در پایان درمان هیچ ناهنجاری فیزیکی مشاهده نشد و بافت زخم به‌صورت طبیعی بازسازی گردید (۴۸).

در مطالعه‌ای که توسط Shahin Homaeigohar و همکاران انجام شد، ابتدا با استفاده از فرآیند الکتروروسی و پلیمر پلی‌آکریلونیتریل (PAN)، نانوالیافی با قطر حدود ۵۰ نانومتر تولید شد. سپس با هیدرولیز نانوالیاف به کمک NaOH، گروه‌های عاملی هیدروکسیل و کربوکسیل روی سطح الیاف ایجاد گردید. در ادامه، نانوالیاف در محلول حاوی L-Carnosine غوطه‌ور شدند تا پیوندهای عرضی بین الیاف ایجاد شود. در مرحله نهایی، نانوالیاف زیست‌فعال‌شده در محلول آبی $ZnCl_2$ قرار گرفتند تا نانوذرات ZnO روی سطح الیاف بارگذاری شوند. با توجه به این که اندازه سلول‌های فیروبلست حدود ۱۰ تا ۱۵ میکرومتر و اندازه باکتری‌های رایج در زخم بین ۰.۵ تا ۳ میکرومتر است، زخم‌پوش‌های طراحی شده قادر به عمل

به‌عنوان مانع فیزیکی مؤثر در برابر نفوذ باکتری‌ها هستند. ترکیب *L-Carnosine* و نانوذرات ZnO، ویژگی‌های سطحی و زیست‌فعالی مطلوبی به نانوپوشش‌های PAN بخشید و موجب افزایش زنده‌مانی و رشد سلول‌های فیروبلست گردید. در مقایسه با زخم‌پوش‌های PAN خالص، زخم‌پوش‌های L-Carnosine/PAN حاوی ZnO به شکل معناداری زنده‌مانی فیروبلست‌ها را افزایش دادند. از طرف دیگر، L-Carnosine به‌طور مؤثر فنوتیپ سلول‌ها را از حالت پیری به حالت جوان تغییر داده و با کاهش نرخ کوتاه‌شدگی تلومر، عمر سلولی را افزایش می‌دهد. نانوپوشش‌های دارای بار مثبت L-Carnosine/PAN حاوی ZnO همچنین به‌دلیل جذب سلول‌های با بار منفی، چسبندگی بهتری از خود نشان دادند. تحلیل ساختار سیئواسکلترون نیز توزیع مناسب الیاف F-actin روی این پوشش‌ها را تأیید کرد که مؤید بهبود چسبندگی و رشد سلولی است. در شرایط *in vitro*، نانوالیاف L-Carnosine/PAN و ZnO/L-Carnosine/PAN عملکرد ضدباکتریایی بهتری نسبت به PAN خالص داشتند و قطر نواحی مهاری در آن‌ها به‌طور معناداری بیشتر گزارش شد (۴۹).

۳-۵- لیپوزوم

لیپوزوم‌ها ذرات کروی کوچکی هستند که از یک یا چند لایه دو گانه لیپیدی تشکیل شده‌اند و یک هسته آبی را در مرکز خود محصور می‌کنند (۵۰-۵۲). این ذرات نخستین بار توسط Bangham، یک هماتولوژیست بریتانیایی در سال ۱۹۶۵ معرفی شدند (۵۳). برای سنتز لیپوزوم‌ها می‌توان از مواد طبیعی مانند فسفاتیدیل کولین، فسفاتیدیل گلیسرول، کلسترول و ... استفاده کرد بنابراین لیپوزوم‌ها به عنوان مواد غیر سمی، تجزیه پذیر و غیر ایمنی‌زا شناخته می‌شوند. لیپوزوم‌ها به دلیل ویژگی‌هایی مانند زیست‌تخریب‌پذیری، سهولت تولید، ظرفیت بالای بارگیری دارو، و توانایی رهایش کنترل‌شده، به‌عنوان حامل‌های مناسبی برای تحویل داروها به ویژه داروهای ضد میکروبی شناخته می‌شوند (۵۰، ۵۳). بر اساس مورفولوژی، لیپوزوم‌ها به چند دسته تقسیم می‌شوند:

تعبیه شده در زخم پوش، اثر ضد میکروبی قوی تری نسبت به لیپوزوم های خنثی و کاتیونی دارند (۵۵).

در مطالعه ای دیگر که توسط Supriya Pandey و همکاران انجام شد، هیدروژل های لیپوزومی حاوی رزوراترول با استفاده از Carbopol (یک پلیمر مصنوعی) برای درمان زخم پای دیابتی سنتز گردید. برای ارزیابی اثربخشی زخم پوش طراحی شده، از مدل حیوانی زخم پای دیابتی در شرایط *in vivo* استفاده شد. نتایج نشان داد که استفاده از این زخم پوش موجب کاهش قابل توجه گلوکز خون، افزایش میزان گلیکوز آمینو گلیکان ها و تسریع در بسته شدن زخم در روز نهم گردید. همچنین اپیتلیالیزه شدن سریع تر، تکثیر فیبروبلاست ها، تشکیل کلاژن و کاهش نفوذ سلول های التهابی در محل زخم نیز مشاهده شد (۵۶).

در مطالعه ای که توسط Govindaraj Poornima و همکاران انجام شد، از لیپوزوم های سنتز شده بر پایه کورکومین برای بررسی اثر آنتی باکتریایی این فرمولاسیون علیه *E. coli* و *S. aureus* استفاده گردید. نتایج نشان داد که لیپوزوم ها، منجر به افزایش حلالیت کورکومین شده و کپسوله سازی آن در لیپوزوم ها، رهایش طولانی مدت دارو و اثر ضد باکتریایی بهتری را در شرایط *in vitro* فراهم آورد (۵۷).

Laura Victoria Schulte-Werning و همکاران با هدف کاهش اثرات زیست محیطی، از روش الکتروریسی سبز برای تولید زخم پوش استفاده کردند. در این فرایند به جای استفاده از حلال های سمی، از آب به عنوان حلال بی خطر بهره گرفته شد. همچنین برای تولید نانوالیاف، از پلی اتیلن اکسید (PEO)، پکتین و لیپوزوم های حاوی داروی کلرامفنیکل (CAM) استفاده شد. تصویربرداری کانفوکال از نانوذرات لیپوزومی نشان داد شده با رودامین نشان داد که طی فرایند الکتروریسی، ساختار لیپوزوم ها حفظ شده است. نتایج حاصل از آزمایش رهایش دارو، تأیید کننده آزادسازی کنترل شده کلرامفنیکل از نانوالیاف بود. ارزیابی زیست سازگاری نیز با استفاده از فیبروبلاست های پوستی و ماکروفاژها انجام شد و نشان داد که نانوالیاف حاوی لیپوزوم، هیچ گونه سمیت سلولی نداشتند. همچنین بررسی های ضد

۱- لیپوزوم های تک لایه ای کوچک (SUL^1): دارای تنها یک لایه دو گانه و قطری بین ۲۰ تا ۱۰۰ نانومتر هستند. این ساختارهای کوچک به راحتی قابلیت نفوذ در سلول ها و بافت ها را دارند و می توانند اثر دارویی قوی تری نسبت به سایر گروه ها داشته باشند.

۲- لیپوزوم های تک لایه ای بزرگ (LUV^2): آن ها نیز تنها یک لایه دو گانه در ساختار خود دارند اما نسبت به SUL ابعاد بزرگتری داشته و معمولاً با قطر ۱۰۰ تا ۳۰۰ نانومتر دیده می شوند و می توانند داروی بیشتری را در خود ذخیره کنند.

۳- لیپوزوم های چند لایه (MLV^3): این ذرات دارای چندین لایه دو گانه لپیدی هستند که ممکن است این لایه ها به طور تصادفی به یکدیگر بچسبند. این ساختارها به دلیل داشتن تعداد لایه های بالاتر می توانند داروهای بیشتری را حمل کنند اما به دلیل ویژگی های ساختاری از نفوذ پذیری کمتری برخوردارند.

۴- لیپوزوم های چند وزیکولی (MV^4): این نوع از لیپوزوم ها به گونه ای طراحی شده اند که در آن ها چندین وزیکول کوچکتر در یک وزیکول بزرگ قرار گرفته اند و در مواردی که به کنترل دقیق تر آزادسازی دارو نیاز باشد، قابلیت استفاده دارند (۵۴).

در مطالعه ای که توسط Rai و همکارانش انجام شد، زخم پوشی به شکل هیدروژل با استفاده از سلولز باکتریایی سنتز گردید. این زخم پوش با نیترا ت نقره لیپوزومی بارگذاری شد و فعالیت آنتی باکتریایی آن در برابر باکتری های *P. aeruginosa* و *S. aureus* در بازه زمانی ۴۸ ساعته بررسی شد. رهایش آهسته نقره از فرمولاسیون لیپوزومی، علاوه بر کاهش سمیت نقره، منجر به افزایش قابل توجه فعالیت آنتی باکتریایی زخم پوش گردید. همچنین، تغییر بار سطحی لیپوزوم ها بر عملکرد ضد میکروبی آن ها تأثیر گذار بود؛ به طوری که لیپوزوم های آنیونی

¹ Small Uni lamellar vesicle

² Large Uni lamellar vesicle

³ Multi lamellar vesicle

⁴ Multi vesicular

میکروبی نشان داد نانوالیاف لیپوزومی رشد باکتری‌های *E. coli* و *S. aureus* را به‌طور قابل توجهی مهار کردند (۵۸). در مطالعه‌ای دیگر Sipan L و همکاران از هیدروژل‌های حساس به دما برای درمان زخم‌های آلوده به باکتری استفاده کردند. در این پژوهش، از کوپلیمرهای Poloxamer 407 و Poloxamer 188 جهت سنتز هیدروژل استفاده شد. همچنین بربرین هیدروکلراید (BH) با نانوذرات لیپوزومی ترکیب و سپس در پلیمر بارگذاری گردید. نتایج آزمایش‌های *in vitro* نشان داد که این هیدروژل‌های حساس به دما قادر به مهار مؤثر بیوفیلم‌های *S. aureus* هستند. در مطالعات *in vivo* نیز مشاهده شد که پس از ۱۴ روز، گروه درمان‌شده با هیدروژل التهاب کمتری در محل زخم نسبت به گروه‌های کنترل داشتند (۵۹).

۶-۳- نانولوله‌های کربنی، فولرن و گرافن

نانولوله‌های کربنی (CNT^۱) که اولین بار در سال ۱۹۹۱ توسط ایجیما کشف شدند، دارای شکل استوانه‌ای با قطر نانومتری و طول میکرومتری هستند. این نانولوله‌ها به دو گروه اصلی تک‌لایه (SWCNT^۲) و چندلایه (MWCNT^۳) تقسیم می‌شوند و دارای نقطه ذوب و مقاومت کششی بسیار بالا هستند. نانولوله‌های کربنی همچنین ویژگی‌های زیست‌سازگاری خوبی دارند و می‌توانند با اجزای زیستی مانند آنزیم‌ها و DNA ادغام شوند (۶۰، ۶۱).

فولرن که باکی‌بال نیز نامیده می‌شود، سومین آلوتروپ کربن که در سال ۱۹۸۵ توسط تیمی به سرپرستی اسمالی کشف شدند، مولکول‌های با ساختار قفس‌مانند هستند. فولرن‌ها که به عنوان ساختارهای صفر بعدی در حوزه نانو تکنولوژی شناخته می‌شوند، دارای ساختارهای شش ضلعی بوده و با هیبراسیدون SP^۲ شناخته می‌شوند. معروف‌ترین آن‌ها، فولرن C₆₀، با شکلی شبیه به توپ فوتبال و حاوی ۶۰ اتم کربن، قادر به محصور کردن مولکول‌ها و مواد مختلف است (۶۲-۶۴). یکی از ویژگی‌های این نانوذرات مقاومت فوق‌العاده آن‌ها در برابر فشار است به گونه‌ای

که بعد از تحمل فشاری حدود ۳۰۰۰ اتمسفر به حالت اولیه خود باز می‌گردند (۶۵).

اصطلاح گرافن که در سال ۱۹۸۶ توسط Boehm و همکاران پیشنهاد شد، از ترکیب دو واژه "گراف" و "ین" به وجود آمده است و به یک تک لایه کربنی منفرد از ساختار گرافیت اشاره دارد. گرافن به عنوان مادر تمامی آلوتروپ‌های کربن شناخته می‌شود زیرا با استفاده از گرفتن می‌توان نانولوله‌های یک بعدی و فولرن صفر بعدی را تولید کرد. در این ساختارهای کربنی، هر اتم کربن با سه اتم کربن دیگر پیوند کووالانسی برقرار می‌کند. این سه پیوند در یک صفحه قرار گرفته و زوایای آن‌ها مساوی و برابر ۱۲۰ درجه می‌باشد. به همین دلیل اتم‌های کربن در چنین وضعیتی شبکه‌ای از شش ضلعی‌های منتظم را تشکیل می‌دهند و ساختارهایی موسوم به ساختارهای لانه زنبوری ایجاد می‌کنند (۶۶).

یکی از روش‌های ساده و ارزان قیمتی که برای سنتز این ورقه‌های دو بعدی وجود دارد، استفاده از نوار چسب بر روی گرافیت است. روشی که توسط Andre Geim و Konstantin Novoselov در دانشگاه منچستر بریتانیا کشف شد و سبب کسب جایزه نوبل توسط این دو دانشمند در سال ۲۰۱۰ شد (۶۷). از دیگر روش‌هایی که برای سنتز گرافن وجود دارد، می‌توان به روش لایه برداری مکانیکی، استفاده از امواج فراصوت و ... اشاره کرد (۶۸).

برای عملکرد ضد میکروبی نانوذرات گرافن دو حالت فیزیکی و شیمیایی در نظر گرفته شده است: آسیب‌های فیزیکی و شیمیایی. آسیب‌های فیزیکی که رایج‌ترین نوع آسیب‌ها هستند به وسیله تماس مستقیم نانوذرات با غشاهای باکتری ایجاد می‌شود. علاوه بر این ویژگی فوتوترمال این ذرات نیز در مکانیزم آسیب فیزیکی دخیل است. برای مکانیزم‌های شیمیایی نیز می‌توان به تولید ROS و القای استرس اکسیداتیو اشاره کرد که به دنبال آن آسیب به DNA اتفاق افتاده و در نهایت باکتری نابود می‌شود (۶۹، ۷۰).

۳-۷- مکسین (MXene)

مکسین‌ها که در سال ۲۰۱۱ توسط گوگوتسی و همکاران کشف شدند (۷۱) دسته بزرگی از نانو مواد ۲ بعدی هستند که از

^۱ Carbon Nano Tube

^۲ Single Wall Carbon Nano Tube

^۳ Multi Wall Carbon Nano Tube

مؤثری علیه باکتری گرم مثبت *S. aureus* دارند. سمیت سلولی نانوالیاف نیز سازگاری خوب آن‌ها را با سلول‌های میوبلاست تأیید کرد (۷۷). Diedkova. و همکارانشان پوشش‌های مکسین را روی نانوالیاف PCL رسوب دادند و مشاهده کردند که این پوشش‌ها چسبندگی باکتریایی را کاهش داده و تشکیل بیوفیلم را سرکوب می‌کنند. آزمایشات ضد میکروبی نشان داد که این زخم‌پوش‌ها به ترتیب ۹۸/۳٪ و ۹۵/۵٪ از باکتری‌های *E. Coli* و *S. aureus* را مهار می‌کنند. همچنین، رسانایی الکتریکی مکسین به بهبود زخم‌های عفونی با تقویت سیگنال‌های الکتریکی و تنظیم بیان ژن‌های مربوطه کمک می‌کند (۷۸). Lumin Li و همکاران نانو مجموعه‌های مکسین و نقره را با PVA ترکیب کردند تا هیدروژل‌های مرکب جدیدی بسازند. این هیدروژل‌ها فعالیت ضد باکتریایی بالایی داشته و قادر به مهار ۹۳٪ از *S. aureus* و ۹۵٪ از *E. coli* بودند (۷۹). در مطالعه‌ای که توسط Hyeongtaek Park و همکاران انجام شد، با افزودن نانوذرات مکسین به محلول سدیم آلژینات، زخم‌پوش‌های هیدروژلی سنتز شد. سپس با اضافه کردن محلول حاوی داروی سیپروفلوکساسین به صورت قطره‌ای به محلول فوق، سنتز هیدروژل کامل شد. این زخم‌پوش‌ها این قابلیت را داشتند که به صورت اسپری بر روی زخم قرار گرفته و می‌توانند برای درمان زخم‌های بزرگ مناسب باشند. بررسی‌ها نشان داد که با افزایش غلظت نانوذرات، میزان تورم هیدروژل‌ها کاهش می‌یابد. زیست‌سازگاری زخم‌پوش بر روی سلول‌های فیروبلات انسانی در طول دوره‌ی کشت ۱، ۴ و ۷ روزه، بقا سلولی را در تمامی گروه‌ها نشان داد. بررسی توانایی ضد میکروبی زخم‌پوش تحت تابش نور مادون قرمز (NIR) نشان داد که زخم‌پوش با بارگذاری داروی سیپروفلوکساسین به طور قابل توجهی منجر به مهار رشد باکتری‌های *E. coli* و *S. aureus* شد و تحت تابش نور این فعالیت افزایش یافت. در شرایط *in vivo* نتایج نشان داد که گروهی که زخم‌پوش هیدروژلی را به همراه تابش NIR دریافت کرد، سرعت بالاتری در بهبود زخم داشت. این گروه بهبود ۶۱/۰۳٪ در روز ۷ و ۹۰٪ را در روز ۱۴ تجربه کرد که به طور قابل توجهی سریع‌تر از سایر گروه‌ها بود.

کاربید یا نیتريد فلز واسطه تشکیل شده‌اند و با فرمول کلی $M_{n+1}X_nT_x$ توصیف می‌شوند. در این فرمول M نشان دهنده عناصر واسطه، X نشان دهنده حضور C یا N و T_x نیز نشان دهنده گروه‌های عاملی سطحی مانند F،OH و یا O است. n نیز می‌تواند عددی بین ۱ تا ۳ باشد. یکی از ویژگی‌های قابل توجه این نانوذرات هدایت الکتریکی آن‌ها می‌باشد. همچنین از آنجایی که این ذرات در سطح خود تعداد زیادی گروه عاملی آبدوست دارند، می‌توانند به راحتی با مولکول‌های آب برهمکنش‌های پایداری داشته باشند. از طرفی با توجه به اینکه این ذرات به عنوان نانومواد زیست سازگار شناخته شده‌اند می‌توانند برای ترمیم پوست و زخم نیز پتانسیل بالایی داشته باشند (۷۲-۷۴).

تحقیقات در زمینه کاربردهای ضد میکروبی مکسین‌ها به تازگی آغاز شده است و درک عمیقی از مکانیزم‌های ضد میکروبی این ذرات وجود ندارد اما مطالعات پیشگامانه‌ای در این زمینه انجام شده است که بر مبنای آن، این ذرات با ۳ مکانیزم می‌توانند اثر ضد باکتریایی داشته باشند. مکانیزم اول با توجه به شکل و مورفولوژی این ذرات توصیف شده است. از آنجایی که این نانوذرات ۲ بعدی می‌توانند اشکال صفحه‌ای در ابعاد نانو داشته باشند، دارای لبه‌های تیزی هستند که مانند نانو چاقو عمل می‌کنند و به لحاظ فیزیکی به غشای باکتری آسیب وارد می‌کنند. از طرفی این ذرات بعد از آسیب به غشا و ورود به درون سلول، می‌توانند سبب القای استرس اکسیدانتی شده که می‌تواند سبب تخریب گسترده DNA سلولی شود. مکانیزم سومی هم که برای این ساختارها در نظر گرفته شده است، به واسطه خاصیت فوتوترمال این ذرات است. به عبارت بهتر، با جذب نور و تولید گرمای اضافی، این ذرات می‌توانند خواص ضد میکروبی گسترده‌ای داشته باشند (۷۵، ۷۶).

Weiwei Zeng و همکارانش از baicalin (یک ترکیب ضدباکتریایی استخراج شده از گیاه *Scutellaria baicalensis*) در غشاهای نانوفیبری پلی‌کاپرولاکتون (PCL) و مکسین برای تولید زخم‌پوش استفاده کردند. نتایج نشان داد که نانوالیاف هیبریدی PCL با مکسین و baicalin فعالیت ضدباکتریایی

علاوه بر بهبود بالینی، تحلیل بافت‌شناسی و رنگ‌آمیزی‌های مختلف نشان داد که این گروه دارای بالاترین سطح بازسازی بافت و فیبرهای کلاژن در مقایسه با سایر گروه‌ها بود. همچنین، این گروه تعداد بیشتری عروق جدید را در زخم‌ها تولید کرد، که نشان‌دهنده بهبود قابل توجه در فرآیند ترمیم و بازسازی بافت است (۸۰). Hai Zhou و همکاران زخم‌پوش اسفنجی شکل شامل هیدروکسی‌پروپیل کیتوزان (HPCS) و ماتریس سلول‌زدایی شده پوست خوک (PADM) سنتز کردند. در مرحله اول محلولی حاوی هیدروکسی‌پروپیل کیتوزان سنتز شد. در مرحله دوم با تهیه محلولی از PADM و ترکیب با محلول حاوی HPCS و سپس فریز و خشک کردن، زخم‌پوش اسفنجی سنتز شد که دارای ساختار متخلخل بوده و به اسفنج اجازه داده تا پس از فشرده شدن به شکل اولیه خود باز گردد. سپس با استفاده از روش اسپینینگ نانوذرات مکسین از فاز اولیه مکس فاز سنتز شد و در ساختار زخم‌پوش پراکنده شد و منجر به تغییر رنگ زخم‌پوش از سفید به تیره شد. زیست‌سازگاری اسفنج‌ها با استفاده از آزمایش‌های مختلف ارزیابی شد. نتایج نشان داد که این اسفنج‌ها هیچ‌گونه سمیت سلولی ندارند و باعث افزایش رشد و تکثیر سلول‌ها می‌شوند. برای ارزیابی فعالیت ضد میکروبی زخم‌پوش از باکتری‌های *S. aureus* و *E. coli* استفاده شد. نتایج نشان داد که پس از ۳۶ ساعت کشت باکتری‌ها با زخم‌پوش، اسفنج قادر به کشتن ۹۸/۸۹٪ از *S. aureus* و ۹۷/۲۱٪ از *E. coli* بود. در شرایط *in vivo* نیز بر روی زخم‌های دیابتی نتایج حاکی از آن بود که تا ۱۴ روز، گروه درمان شده با زخم‌پوش‌ها ناحیه بهبود یافته وسیع‌تری را با نرخ درمان بهبودی ۸۷٪ نشان داد (۸۱).

۳-۸- نانوذرات ژانوس

نانوذرات ژانوس به نام "ژانوس" خدای دو چهره رومی (خدایی که قادر است به طور همزمان به دو جهت مختلف نگاه کند). نامگذاری شده‌اند. تحقیقات درباره نانوذرات ژانوس اولین بار توسط Pierre-Gilles de Gennes در سال ۱۹۹۱ صورت گرفت و توجه بسیاری از محققان را به خود جلب کرد (۸۲).

نانوذرات ژانوس که متعلق به دسته ذرات آنیزوتروپیک بوده، ساختارهایی با عدم تقارن مرکزی هستند. این دسته از نانوذرات می‌توانند دارای طبیعت آمفی‌فیلیک باشند یعنی دارای بخش-های آبگریز و آبدوست باشند و یا به عبارت بهتر می‌توان این ذرات را به صورت دو ناحیه با قطبیت متفاوت در نظر گرفت. به عنوان مثال می‌توان نانوذرات ژانوسی با ترکیب Fe_3O_4 و NPs Au را سنتز کرد. در این حالت یک ذره با دو خاصیت سنتز می‌شود. زیرا نانوذرات Fe_3O_4 دارای خواص مغناطیسی بوده در حالیکه Au NPs دارای رزونانس پلاسمون سطحی هستند. به طور کلی، این نانوذرات می‌توانند دو ویژگی را بدون اینکه بر روی هم تأثیری بگذارند، به طور همزمان داشته باشند (۸۳).

از رایج‌ترین روش‌های استفاده شده برای سنتز این دسته از ذرات می‌توان به روش‌های Self-assembly، masking و Phase separation اشاره کرد. علاوه بر این، روش‌های دیگری مانند لیتوگرافی، میکروفلوئیدیک و کنترل هسته زایی نیز برای سنتز نانوذرات ژانوس به کار گرفته می‌شود. با استفاده از این روش‌ها می‌توان نانوذراتی با اشکال مختلف کروی، دیسکی، استوانه‌ای، تمشکی، همبرگری، آدم برفی، اختاپوسی و ... تولید کرد (۸۲).

یکی از چالش‌های اصلی در انتقال دارو، ترکیب داروها و عوامل تشخیصی با خواص فیزیکوشیمیایی متفاوت در یک نانوحامل است، چرا که این ترکیب ممکن است به اختلال در آزادسازی دارو منجر شود. نانوذرات ژانوس با ارائه نواحی جداگانه و مستقل، می‌توانند این مشکل را برطرف کنند. از دیگر کاربردهای این ذرات می‌توان به نقش موثر آن‌ها در تصویربرداری مولکولی اشاره کرد. از آنجایی که تکنیک‌های تصویربرداری مانند تصویربرداری با رزونانس مغناطیسی (MRI)، توموگرافی کامپیوتری با اشعه ایکس (CT)، تصویربرداری نوری با مادون قرمز نزدیک (NIR) و تصویربرداری فوتوآکوستیک (PA) دارای محدودیت‌هایی از قبیل وضوح پایین، زمان تصویربرداری طولانی، سهولت استفاده و هزینه بالا دارند، استفاده از این نانوذرات می‌تواند به غلبه بر این محدودیت‌ها کمک کند. در زمینه توسعه زخم‌پوش‌ها نیز،

استفاده از این ذرات شرایطی را فراهم می‌کند که علاوه بر انتقال داروها و عوامل ضد میکروبی، می‌توان زخم‌پوش‌های چند منظوره‌ای ایجاد کرده که با کاهش نیاز به تعویض مکرر زخم-پوش، به طور همزمان مدیریت مناسبی بر روی حذف ترشحات زخم و کنترل عفونت زخم داشته باشند (۸۴).

Jinke Yang و همکاران برای بررسی اثر ضد میکروبی نانو الیاف ژانوس از پلیمرهای پلی‌وینیل‌پیرولیدون (PVP) و اتیل سلولز (EC) استفاده کردند. ابتدا محلولی با استفاده از پلیمر PVP تهیه شده و داروی سیپروفلوکساسین در آن توزیع شد. سپس محلولی از اتیل سلولز تهیه گردید که Ag NPs در آن توزیع شدند. برای سنتز نانوالیاف غیرمتقارن ژانوس، از دو سرنگ و یک اسپینر استفاده شد. پس از سنتز نانوالیاف، با استفاده از طلا، پوششی بر روی نانوالیاف ایجاد گردید. نتایج آزمون‌های ضد میکروبی نشان داد که نانوالیاف ژانوس ساخته شده اثر مهار بالایی در برابر باکتری‌های *S. aureus* و *E. coli* دارند (۸۵).

نانوذرات ژانوس همچنین می‌توانند در هموستاز و کنترل خونریزی نقش بالقوه‌ای ایفا کنند. به عنوان مثال، Jiawen Chen و همکاران از این ذرات برای هموستاز و کنترل خونریزی استفاده کردند. در این مطالعه، نانوذرات سیلیکای مزوپور (MSN) به روش سل-ژل تهیه شدند. سپس با تهیه محلولی حاوی MSN و AgNO_3 ، نانوذرات نقره بر روی سطح MSN کاهش یافته و سنتز شدند. برای کنترل بهتر هموستاز و خونریزی، از اسید تانیک (TA) استفاده شد؛ به گونه‌ای که با غوطه‌ور کردن MSN-Ag در محلول TA، نانوذرات TA-MSN-Ag سنتز شد. در نهایت با غوطه‌وری TA-MSN-Ag در محلول CaCl_2 ، یون کلسیم در ساختار نانوذرات قرار گرفت تا به عنوان فاکتور شماره IV به فرایند لخته شدن خون کمک کند. آزمایش همولیز نشان داد که نانوذرات ژانوس سنتز شده نرخ همولیز پایینی دارند و می‌توانند سازگاری خوبی با خون داشته باشند. آزمایش‌های هموستاتیک بر روی مدل آسیب کبدی در موش‌ها نشان داد که Ca-TA-MSN@Ag به طور قابل توجهی سریع‌تر از TA-MSN@Ag و MSN عمل کرده و خونریزی را

سریع‌تر متوقف می‌کند. در مدل آسیب شریانی ران موش، زمان هموستاز برای Ca-TA-MSN@Ag به طور قابل توجهی کوتاه‌تر از TA-MSN@Ag و MSN بود. زمان هموستاز کامل در گروه کنترل حدود ۱۴۹ ثانیه بود که با استفاده از MSN به ۸۴ ثانیه کاهش یافت، در حالی که TA-MSN@Ag و Ca-TA-MSN@Ag زمان هموستاز را به ترتیب به ۷۵ و ۴۵ ثانیه کاهش دادند. این نشان‌دهنده عملکرد برتر Ca-TA-MSN@Ag است. کنترل مؤثر عفونت زخم پس از ایست قلبی برای بهبود زخم بسیار ضروری است. بنابراین، فعالیت ضدباکتریایی Ca-TA-MSN@Ag در برابر *E. coli* و *S. aureus* بررسی شد. نتایج نشان داد که TA-MSN@Ag و Ca-TA-MSN@Ag قادر به مهار رشد *E. coli* و *S. aureus* به طور قابل توجهی بودند، در حالی که MSN هیچ تأثیری بر آن‌ها نداشت. همچنین، این نتایج مشابه در آزمایش‌های دیگر تأیید شد و مشخص گردید که فعالیت ضدباکتریایی TA-MSN@Ag و Ca-TA-MSN@Ag به بیش از ۹۹٪ رسید، که به طور قابل توجهی بالاتر از MSN بود. این نشان می‌دهد که ترکیب‌های TA و Ag NPs به طور چشمگیری فعالیت ضدباکتریایی MSN را بهبود می‌بخشند و افزودن یون‌های کلسیم به TA-MSN@Ag خواص ضدباکتریایی آن را کاهش نمی‌دهد (۸۶).

Yupeng Shi و همکاران زخم‌پوش‌های دولایه حاوی دارو طراحی کردند. لایه اول این زخم‌پوش با استفاده از پلی‌لاکتیک گلیکولیک اسید (PLGA)، نانوذرات سولفید مس (CuS) و داروی ضد میکروبی Valsartan, V سنتز شد که لایه هیدروفوب زخم‌پوش را تشکیل می‌دهد. در لایه دوم از PVA و داروی Mupirocin, M استفاده شد. نتایج آزمایش‌های *in vitro* نشان داد که این زخم‌پوش به آرامی و به طور پیوسته داروی Mupirocin, M را در محیط‌های هیدروفیلک آزاد می‌کند. همچنین، اثر فتوترمال عالی این زخم‌پوش می‌تواند نرخ رهایش داروی ضدالتهابی Valsartan, V را تنظیم کرده و واکنش التهابی را به طور مؤثری کاهش دهد و کارایی باکتریواستاتیک بهبودیافته‌ای (۳/۹۶٪ برای *E. coli* و ۸/۹۷٪ برای *S. aureus*) نشان دهد. در شرایط *in vivo* بعد از آلوده شدن زخم‌ها به

کامپوزیتی شکل گرفت. نتایج آزمایشات *in vivo* نشان داد که گروه درمان شده با زخم پوش در مقایسه با گروه کنترل پس از ۱۲ روز سریع تر بهبود یافتند (۸۹).

مطالعات بالینی

مطابق با جستجوهای ما، عمده نانوذراتی که در بالین برای ترمیم زخم در پانسمان های نوین مورد مطالعه قرار گرفته اند، نانو ذرات نقره می باشند. در حال حاضر این نانوذرات به طور گسترده به عنوان یک عامل ضد باکتری در پانسمان های نوین موجود در بازار به کار می روند. بر این اساس مطالعاتی که در آن ها از نقره و نانوذرات نقره در ترمیم زخم و درمان عفونت های باکتریایی استفاده شده است، در ادامه آورده شده اند.

Matilda Karlsson و همکاران ۵۸ کودک با سوختگی های جزئی را به دو گروه تقسیم کردند. گروه اول پیوند با پوست خوک و گروه دوم با زخم پوش های فومی حاوی نقره درمان شدند. نتایج نشان داد که عفونت زخم در گروه دوم کمتر بوده و نیز گروه دوم سریع تر در مقایسه با گروه اول بهبود پیدا کردند (۱۵ روز در مقابل ۲۰ روز) (۹۰).

JiHui Chen و همکاران ۵۸ بیمار مبتلا به پمفیگوس ولگاریس را به دو گروه تقسیم کردند. گروه اول شامل ۲۸ نفر زخم پوش - های حاوی نقره و گروه دوم شامل ۳۰ نفر زخم پوش های مرطوب پوئیدین-یدین را دریافت کردند. بیماران درمان شده با زخم پوش های حاوی نقره، رضایت بالاتری داشته و مدت زمان بستری شدن آن ها نیز نسبت به گروه دوم کمتر بود (۹۱).

Parvaneh Asgari و همکاران با هدف درمان زخم های بستر ایجاد شده در بیماران قطع نخاع شده، ۷۰ بیمار را به دو گروه ۳۵ نفره تقسیم کردند. بعد از درمان بیماران با زخم پوش های حاوی Ag NPs و زخم پوش های هیدروکلوئیدی، نتایج نشان داد که بیماران درمان شده با زخم پوش های حاوی Ag NPs وضعیت بهتری نسبت به گروه دوم داشتند (۹۲).

Samantha A Miner و همکاران برای بررسی بهبود بافت اسکار بعد از عمل جراحی، ۴۰ بیمار با آسیب دیدگی پا و مچ پا را به دو گروه ۲۰ نفره تقسیم کردند. گروه اول زخم پوش های

باکتری *S. aureus*، نتایج نشان داد که این غشاهای، به ویژه در گروهی که از زخم پوش و نور لیزر استفاده شده بود، به طور قابل توجهی سرعت بهبود زخم را افزایش داده و عفونت باکتریایی به طور مؤثری کاهش یافت. در روز دوازدهم، این گروه کمترین عرض زخم و بهترین بهبود را نشان دادند بدون اینکه التهابی مشاهده شود (۸۷). در مطالعه انجام شده توسط Tao Zhou و همکاران، زخم پوش های نانوفیبری ژانوسی دو لایه با استفاده از PCL، پلی لاکتیک اسید (PLLA)، ژلاتین و نانوذرات اکسید منیزیم (MgO) سنتز شدند. در این تحقیق، ابتدا محلول حاوی PLLA، ژلاتین و MgO سنتز شد و الکتروریسی به صورت دستی انجام شد. لایه آبدوست زخم پوش به صورت مستقیم بر روی زخم های حیوانی اسپری شد و لایه دوم با خواص آبرگریزی با استفاده از محلول حاوی PCL بر روی لایه اول اسپری گردید. آزمایش بر روی چهار گروه از نانوالیاف انجام شد که شامل گروه های مختلف با غلظت های مختلف نانوذرات MgO بود. نتایج نشان داد که گروه PPGM-M (دارای غلظت متوسطی از MgO) به طور قابل توجهی نسبت به گروه های دیگر و گروه کنترل، نرخ بهبود بالاتری داشت و در روز ۱۴ زخم به طور کامل بهبود یافت. در مقابل، گروه PPGM-H (دارای غلظت بالایی از MgO) به دلیل غلظت بالای یون های منیزیم بهبودی کمتری نشان داد و حتی اثرات سمی آن مشاهده شد. این گروه ها همچنین در مهار رشد باکتری های *E. coli* و *S. aureus* مؤثر بودند (۸۸). Zi-Rui Z و همکاران با بهره گیری از نانوفیبر و هیدروژل، زخم پوش های نامتقارن ژانوسی سنتز کردند. در این تحقیق ابتدا محلولی از PCL تهیه شده و با استفاده از آن نانو الیاف سنتز گردید. آلژینات، پلی ایزوپوپیل آکریل آمید (PNLPAM)، Deferoxamine به عنوان داروی آنتی بیوتیک و CaCO_3 برای تهیه هیدروژل استفاده شدند. در مرحله بعد، نانوالیاف بر روی قالبی از جنس پلی دی متیل سیلوکسان (PDMS) قرار داده شد و سپس پیش محلول هیدروژل به طور یکنواخت بر روی نانو الیاف اعمال گردید. پس از تشکیل هیدروژل، با دمای ۳۷ درجه سانتی گراد و حذف قالب و رطوبت اضافی، ساختار نهایی زخم پوش

هیدروژلی حاوی نقره و گروه دوم زخم پوش های مبتنی بر نفت را دریافت کردند. بعد از ۱۲ هفته نتایج نشان داد که بافت اسکار در گروهی که زخم پوش های هیدروژلی حاوی نقره دریافت کرده بودند به میزان قابل توجهی کمتر بود (۹۳).

Ze-Yao Shi و همکاران از ترکیبی از آنتی بیوتیک ها و پانسمان های حاوی نقره استفاده کردند و موفق به درمان ناهنجاری اوراکال شدند. در این وضعیت، نوزاد دختری با وزن ۲.۸۸ کیلوگرم که با قرمزی و تورم در ناحیه ناف و اندازه تقریبی ۲*۲ سانتی متر و وجود ترشحات چرکی زرد رنگ همراه بود به بیمارستان مراجعه کرده و به مدت سه روز با آنتی بیوتیک اگراسیلین درمان شد. در روز چهارم با کمک آزمایشات حضور *S. aureus* در ناحیه ناف اثبات شد. سپس ادامه درمان با استفاده از وانکومايسين و زخم پوش های حاوی نقره ادامه پیدا کرد. در نهایت در روز چهاردهم نتایج نشان داد که عفونت کاملاً کنترل شده و نوزاد بدون هیچ عوارضی از بیمارستان مرخص شد (۹۴). Rui Wang و همکاران در بررسی های انجام داده روی ۴۰ بیمار مبتلا به زخم مزمن، به این نتیجه رسیدند که پانسمان های حاوی نقره علاوه بر کاهش زمان تعویض پانسمان می توانند یک محیط مرطوب بر روی سطح زخم ایجاد کنند و به طور موثری منجر به بهبود زخم ها شوند (۹۵).

Dong Zhang و همکاران با هدف بررسی اثر زخم پوش های حاوی Ag NPs و پلی اورتان روی ۹۸ بیمار دیابتی با شکستگی های باز اندام های تحتانی، بعد از انجام آزمایشات ضد میکروبی و مهار باکتری های *S. aureus* و *E. coli* در شرایط *in vitro*، به این نتیجه رسیدند که بعد از استفاده از این زخم پوش ها در شرایط *in vivo*، علاوه بر مهار رشد باکتری ها در ناحیه زخم، روند درمان بهبود یافته و مدت زمان بستری شدن بیماران نیز کاهش پیدا کرد (۹۶).

بحث و نتیجه گیری

نانوتکنولوژی به ویژه در حوزه مراقبت از زخم ها تحولی شگرف ایجاد کرده است و راه حل های نوآورانه ای برای چالش های بهداشتی و درمانی در زمینه عفونت های باکتریایی ارائه می دهد.

استفاده از نانومواد ضد میکروبی در پانسمان های زخم، به ویژه در مقابله با باکتری های مقاوم به آنتی بیوتیک، نویدبخش است. نانوذرات فلزی مانند نقره، طلا و مس به دلیل توانایی شان در تخریب غشای سلولی باکتری ها، تولید ROS و انتشار یون های فلزی سمی بسیار مؤثر هستند. نانوذرات مبتنی بر لیپید، شامل لیپوزوم ها، این امکان را فراهم می کنند که عوامل ضد میکروبی را به طور هدفمند و کنترل شده کپسوله کنند، که این امر عوارض جانبی را به حداقل می رساند. نانوذرات مبتنی بر کربن مانند گرافن، با ایجاد مکانیزم منحصربه فرد تخریب فیزیکی دیواره سلولی باکتری ها، همراه با تولید ROS به کنترل هرچه بیشتر عفونت ها کمک می کنند.

در مطالعات متعدد، سه باکتری *S. aureus*، *E. coli* و *P. aeruginosa* توجه را به خود جلب کرده اند. این باکتری ها به دلیل نقش مهمشان در عفونت های زخم و مقاومت بالایشان در برابر درمان های متداول، هدف اصلی تحقیقات و توسعه نانوذرات ضد میکروبی هستند. *S. aureus* معمولاً مسئول عفونت های پوست و زخم های حاد است، *E. coli* در عفونت های مختلف نقش دارد و *P. aeruginosa* به عنوان یک باکتری فرصت طلب مقاوم به آنتی بیوتیک، یکی از عوامل مهم در عفونت های زخم های مزمن و سوختگی ها شناخته می شود.

با این حال، استفاده از نانومواد بدون چالش نیست. پیشرفت های سریع در حوزه نانوتکنولوژی سبب استفاده گسترده از نانوذرات در زمینه های مختلف شده است، اما اطلاعات محدودی درباره تاثیر این ذرات بر روی بدن انسان و محیط زیست وجود دارد. اندازه بسیار کوچک نانوذرات باعث ورود آسان آنها از مسیرهای مختلف مانند پوست، چشم و بینی به بدن شده و توزیع گسترده آنها در بافت هایی نظیر خون، مغز، کلیه، کبد و ریه ممکن است پیامدهای زیستی نامطلوبی داشته باشد. به عنوان مثال، مواجهه طولانی مدت با Ag NPs می تواند بیماری آرتریا ایجاد کند که تغییر رنگ پوست و چشم ها به دلیل رسوب این ذرات از ویژگی های آن است. همچنین، نانوذرات اکسید روی می توانند اثرات زیانباری بر سیستم تنفسی انسان داشته باشند و

پاسخ‌های التهابی شدیدی در ریه‌ها ایجاد کنند. نانوذرات طلا نیز با تجمع در کبد و طحال ممکن است به این اعضای حیاتی آسیب برسانند. در مورد نانوذرات دوبعدی مانند MXene نیز، گروه‌های عاملی نظیر فلوراید و کلر که طی فرآیند سنتز ظاهر می‌شوند، سمیت بالقوه‌ای برای انسان و محیط زیست ایجاد می‌کنند. علاوه بر این، مسائل دیگری مانند پایداری شیمیایی و حرارتی ضعیف، فراهمی زیستی، زیست‌تخریب‌پذیری و حلالیت کم در آب باید مورد توجه قرار گیرند.

علیرغم این چالش‌ها، آینده نانومواد ضد میکروبی در مراقبت از زخم امیدبخش است. تحقیقات جاری بر بهینه‌سازی این مواد برای افزایش اثربخشی و ایمنی متمرکز است. ترکیب فناوری‌های هوشمند، مانند نانوذرات پاسخ‌دهنده به محرک‌ها و رویکردهای پزشکی شخصی، می‌تواند مراقبت از زخم را متحول کرده و درمان‌هایی متناسب با نیازهای خاص هر بیمار را فراهم کند. از جمله این فناوری‌ها می‌توان به نانوذراتی اشاره

کرد که بر اساس تغییرات محیطی بدن مانند pH یا دما فعال شده و رهایش مواد درمانی را کنترل می‌کنند. همچنین، فناوری‌های نوینی نظیر نانودرمانگری‌های ترکیبی که نانوذرات را با داروها یا عوامل دیگر ترکیب می‌کنند، می‌توانند اثربخشی درمان‌ها را افزایش دهند.

با پیشرفت این حوزه، پانسمان‌های زخم مبتنی بر نانومواد به احتمال زیاد نقش مهمی در بهبود بیماران و کاهش بار جهانی عفونت‌های زخم ایفا خواهند کرد. علاوه بر این، توسعه این نانومواد با رعایت اصول ایمنی و زیست‌سازگاری می‌تواند راهگشای استفاده گسترده‌تر از آن‌ها در پزشکی باشد. به طور کلی، تحقیقات در این زمینه نیازمند توجه بیشتر به ایمنی و کارایی بلندمدت نانوذرات است تا از عوارض ناخواسته جلوگیری شود و در عین حال اثربخشی آن‌ها در درمان زخم‌ها به حداکثر برسد.

Reference

1. Xu C, Akakuru OU, Ma X, Zheng J, Zheng J, Wu A. Nanoparticle-based wound dressing: recent progress in the detection and therapy of bacterial infections. *Bioconjugate Chemistry*. 2020;31(7):1708-23.
2. Buda De Cesare G, Cristy SA, Garsin DA, Lorenz MC. Antimicrobial peptides: a new frontier in antifungal therapy. *MBio*. 2020;11(6):10.1128/mbio. 02123-20.
3. Silva GA. Introduction to nanotechnology and its applications to medicine. *Surgical neurology*. 2004;61(3):216-20.
4. Xu Y, Shi Z, Shi X, Zhang K, Zhang H. Recent progress in black phosphorus and black-phosphorus-analogue materials: properties, synthesis and applications. *Nanoscale*. 2019;11(31):14491-527.
5. Gaharwar AK, Peppas NA, Khademhosseini A. Nanocomposite hydrogels for biomedical applications. *Biotechnology and bioengineering*. 2014;111(3):441-53.
6. Nethi SK, Das S, Patra CR, Mukherjee S. Recent advances in inorganic nanomaterials for wound-healing applications. *Biomaterials science*. 2019;7(7):2652-74.
7. Kumar SSD, Rajendran NK, Houreld NN, Abrahamse H. Recent advances on silver nanoparticle and biopolymer-based biomaterials for wound healing applications. *International journal of biological macromolecules*. 2018;115:165-75.
8. Kumari S, Mahanta B, Borah A, Dutta P. In vivo Evaluation of Silver Nanoparticles on the Management of *Meloidogyne incognita* in Green Gram. *Journal of Scientific Research and Reports*. 2024;30(4):115-21.
9. Levard C, Hotze EM, Lowry GV, Brown Jr GE. Environmental transformations of silver nanoparticles: impact on stability and toxicity. *Environmental science & technology*. 2012;46(13):6900-14.
10. Sanpui P, Murugadoss A, Prasad PD, Ghosh SS, Chattopadhyay A. The antibacterial properties of a novel chitosan-Ag-nanoparticle composite. *International journal of food microbiology*. 2008;124(2):142-6.

11. Rybka M, Mazurek Ł, Konop M. Beneficial effect of wound dressings containing silver and silver nanoparticles in wound healing—from experimental studies to clinical practice. *Life*. 2022;13(1):69.
12. Konop M, Czuwara J, Kłodzińska E, Laskowska AK, Sulejczak D, Damps T, et al. Evaluation of keratin biomaterial containing silver nanoparticles as a potential wound dressing in full-thickness skin wound model in diabetic mice. *Journal of tissue engineering and regenerative medicine*. 20.۳۳۴-۴۶:(۲)۱۴;۲۰.
13. Liu C, Zhu Y, Lun X, Sheng H, Yan A. Effects of wound dressing based on the combination of silver@curcumin nanoparticles and electrospun chitosan nanofibers on wound healing. *Bioengineered*. 2022;13(2):4328-39.
14. Bircă AC, Gherasim O, Niculescu A-G, Grumezescu AM, Neacșu IA, Chircov C, et al. A Microfluidic Approach for Synthesis of Silver Nanoparticles as a Potential Antimicrobial Agent in Alginate–Hyaluronic Acid-Based Wound Dressings. *International Journal of Molecular Sciences*. ۱۱۴۶۶:(۱۴)۲۴;۲۰۲۳.
15. Zhang C, Yang X, Yu L, Chen X, Zhang J, Zhang S, et al. Electrospun polyasparthydrazide nanofibrous hydrogel loading with in-situ synthesized silver nanoparticles for full-thickness skin wound healing application. *Materials & Design*. ۲۳۹:۱۱۲۸۱۸;۲۰۲۴.
16. Vijayakumar G, Kim HJ, Jo JW, Rangarajulu SK. Macrofungal mediated biosynthesis of silver nanoparticles and evaluation of its antibacterial and wound-healing efficacy. *International Journal of Molecular Sciences*. 2024;25(2):861.
17. Louis C, Pluchery O. Gold nanoparticles for physics, chemistry and biology: World Scientific; 2017.
18. Hammami I, Alabdallah NM. Gold nanoparticles: Synthesis properties and applications. *Journal of king Saud university-science*. 2021;33(7):101560.
19. Zheng K, Setyawati MI, Leong DT, Xie J. Antimicrobial gold nanoclusters. *ACS nano*. 2017;11(7):6904-10.
20. Zhang Y, Shareena Dasari TP, Deng H, Yu H. Antimicrobial activity of gold nanoparticles and ionic gold. *Journal of Environmental Science and Health ,Part C*. 2015;33(3):286-327.
21. Giljohann DA, Seferos DS, Daniel WL, Massich MD, Patel PC, Mirkin CA. Gold nanoparticles for biology and medicine. *Spherical Nucleic Acids*. 2020:55-90.
22. Zhang M, Shao S, Yue H, Wang X, Zhang W, Chen F, et al. High stability au nps: From design to application in nanomedicine. *International Journal of Nanomedicine*. 2021:6067-94.
23. Bilankohi SM, Ebrahimzadeh M, Ghaffary T. Study of the properties of Au/Ag core/shell nanoparticles and its application. *Indian Journal of Science and Technology*. 2015;8:31.
24. Zhou L, Yu K, Lu F, Lan G, Dai F, Shang S, et al. Minimizing antibiotic dosage through in situ formation of gold nanoparticles across antibacterial wound dressings: a facile approach using silk fabric as the base substrate. *Journal of Cleaner Production*. 2020;243:118604.
25. Al-Musawi S, Albukhaty S, Al-Karagoly H, Sulaiman GM, Alwahibi MS, Dewir YH, et al. Antibacterial activity of honey/chitosan nanofibers loaded with capsaicin and gold nanoparticles for wound dressing. *Molecules*. 2020;25(20):4770.
26. Zhao P, Feng Y, Zhou Y, Tan C, Liu M. Gold@ Halloysite nanotubes-chitin composite hydrogel with antibacterial and hemostatic activity for wound healing. *Bioactive materials*. 2023;20:355-67.
27. Liu C, Zhao X, Wang Z, Zhao Y, Li R, Chen X, et al. Metal-organic framework-modulated Fe₃O₄ composite au nanoparticles for antibacterial wound healing via synergistic peroxidase-like nanozymatic catalysis. *Journal of Nanobiotechnology*. 2023;21(1):427.
28. Akhavan O, Ghaderi E. Cu and CuO nanoparticles immobilized by silica thin films as antibacterial materials and photocatalysts. *Surface and Coatings Technology*. 2010;205(1):219-23.
29. Lv P, Zhu L, Yu Y, Wang W, Liu G, Lu H. Effect of NaOH concentration on antibacterial activities of Cu nanoparticles and the antibacterial mechanism. *Materials Science and Engineering: C*. 2020;110:110669.

30. Kart HH, Yildirim H, Kart SO, Çağın T. Physical properties of Cu nanoparticles: A molecular dynamics study. *Materials Chemistry and Physics*. ۲۰۴-۱۲:(۱-۲)۱۴۷;۲۰۱۴ .
31. Grass G, Rensing C, Solioz M. Metallic copper as an antimicrobial surface. *Applied and environmental microbiology*. 2011;77(5):1541-7.
32. Dizaj SM, Lotfipour F, Barzegar-Jalali M, Zarrintan MH, Adibkia K. Antimicrobial activity of the metals and metal oxide nanoparticles. *Materials Science and Engineering: C*. 2014;44:278-84.
33. Rafi R, Zulfiqar S, Asad M, Zeeshan R, Zehra M, Khalid H, et al. Smart wound dressings based on carbon doped copper nanoparticles for selective bacterial detection and eradication for efficient wound healing application. *Materials Today Communications*. 2023;35:105914.
34. Tao C. Antimicrobial activity and toxicity of gold nanoparticles: research progress, challenges and prospects. *Letters in applied microbiology*. 2018;67(6):537-43.
35. Salvo J, Sandoval C. Role of copper nanoparticles in wound healing for chronic wounds: literature review. *Burns & trauma*. 2022;10:tkab047.
36. Ghasemian Lemraski E, Jahangirian H, Dashti M, Khajehali E, Sharafinia S, Rafiee-Moghaddam R, et al. Antimicrobial double-layer wound dressing based on chitosan/polyvinyl alcohol/copper: in vitro and in vivo assessment. *International journal of nanomedicine*. 2021:223-35.
37. Ajalli N, Pourmadadi M, Yazdian F, Abdouss M, Rashedi H, Rahdar A. PVA based nanofiber containing GO modified with Cu nanoparticles and loaded curcumin; high antibacterial activity with acceleration wound healing. *Current Drug Delivery*. 2023;20(10):1569-83.
38. Johari N, Rahimi F, Azami H, Rafati F, Nokhbedehghan Z, Samadikuchaksaraei A, et al. The impact of copper nanoparticles surfactant on the structural and biological properties of chitosan/sodium alginate wound dressings. *Biomaterials Advances*. 2024:213918.
39. Zhao J, Xu T, Sun J, Yuan H, Hou M, Li Z, et al. Multifunctional nanozyme-reinforced copper-coordination polymer nanoparticles for drug-resistance bacteria extinction and diabetic wound healing. *Biomaterials Research*. 2023;27(1):88.
40. Gudkov SV, Burmistrov DE, Serov DA, Rebezov MB, Semenova AA, Lisitsyn AB. A mini review of antibacterial properties of ZnO nanoparticles. *Frontiers in Physics*. 2021;9:641481.
41. Shi L-E, Li Z-H, Zheng W, Zhao Y-F, Jin Y-F, Tang Z-X. Synthesis, antibacterial activity, antibacterial mechanism and food applications of ZnO nanoparticles: a review. *Food Additives & Contaminants: Part A*. 2014;31(2):173-86.
42. Sirelkhatim A, Mahmud S, Seeni A, Kaus NHM, Ann LC, Bakhori SKM, et al. Review on zinc oxide nanoparticles: antibacterial activity and toxicity mechanism. *Nano-micro letters*. 2015;7:219-42.
43. Pati R, Mehta RK, Mohanty S, Padhi A, Sengupta M, Vaseeharan B, et al. Topical application of zinc oxide nanoparticles reduces bacterial skin infection in mice and exhibits antibacterial activity by inducing oxidative stress response and cell membrane disintegration in macrophages. *Nanomedicine: Nanotechnology, Biology and Medicine*. 2014;10(6):1195-208.
44. Abebe B, Zereffa EA, Tadesse A, Murthy HA. A review on enhancing the antibacterial activity of ZnO: Mechanisms and microscopic investigation. *Nanoscale research letters*. 2020;15:1-19.
45. da Silva BL, Caetano BL, Chiari-Andréo BG, Pietro RCLR, Chiavacci LA. Increased antibacterial activity of ZnO nanoparticles: Influence of size and surface modification. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*. 2019;177:440-7.
46. Danial EN, Hjiri M, Abdel-Wahab MS, Alonizan NH, El Mir L, Aida M. Antibacterial activity of In-doped ZnO nanoparticles. *Inorganic Chemistry Communications*. 2020;122:108281.

47. Hasanin M, Swielam EM, Atwa NA, Agwa MM. Novel design of bandages using cotton pads, doped with chitosan, glycogen and ZnO nanoparticles, having enhanced antimicrobial and wounds healing effects. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2022;197:121-30.
48. Ibne Shoukani H, Nisa S, Bibi Y, Zia M, Sajjad A, Ishfaq A, et al. Ciprofloxacin loaded PEG coated ZnO nanoparticles with enhanced antibacterial and wound healing effects. *Scientific Reports*. 2024;14(1):4689.
49. Homaeigohar S, Assad MA, Azari AH, Ghorbani F, Rodgers C, Dalby MJ, et al. Biosynthesis of zinc oxide nanoparticles on l-carnosine biofunctionalized polyacrylonitrile nanofibers; a biomimetic wound healing material. *ACS Applied Bio Materials*. 2023;6(10):4290-303.
50. Gonzalez Gomez A, Hosseinidoust Z. Liposomes for antibiotic encapsulation and delivery. *ACS infectious diseases*. 2020;6(5):896-908.
51. Rukholm G, Mugabe C, Azghani AO, Omri A. Antibacterial activity of liposomal gentamicin against *Pseudomonas aeruginosa*: a time-kill study. *International journal of antimicrobial agents*. 2006;27(3):247-52.
52. Sanches BCP, Rocha CA, Martin Bedoya JG, Silva VLd, Silva PBd, Fusco-Almeida AM, et al. Rhamnolipid-based liposomes as promising nano-carriers for enhancing the antibacterial activity of peptides derived from bacterial toxin-antitoxin systems. *International Journal of Nanomedicine*. 2021:925-39.
53. Hallaj-Nezhadi S, Hassan M. Nanoliposome-based antibacterial drug delivery. *Drug delivery*. 2015;22(5):581-9.
54. Maja L, Željko K, Mateja P. Sustainable technologies for liposome preparation. *The Journal of Supercritical Fluids*. 2020;165:104984.
55. Rai P. Liposome-loaded biosynthetic bacterial cellulose hydrogels for wound management applications. 2022.
56. Pandey S, Shamim A, Shaif M, Kushwaha P. Development and evaluation of Resveratrol-loaded liposomes in hydrogel-based wound dressing for diabetic foot ulcer. *Naunyn-Schmiedeberg's Archives of Pharmacology*. 2023;396(8):1811-25.
57. Poornima G, Deepa M, Devadharshini M, Gopan G, Mani M, Kannan S. In-situ synthesis and evaluation of anti-bacterial efficacy and angiogenesis of curcumin encapsulated lipogel dermal patch for wound healing applications. *Biomaterials Advances*. 2024:213989.
58. Schulte-Werning LV, Singh B, Johannessen M, Engstad RE, Holsæter AM. Antimicrobial liposomes-in-nanofiber wound dressings prepared by a green and sustainable wire-electrospinning set-up. *International Journal of Pharmaceutics*. 2024;657:124136.
59. Li S, Wang Y, Wang S, Xie J, Fu T, Li S. In situ gelling hydrogel loaded with berberine liposome for the treatment of biofilm-infected wounds. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 2023;11:1189010.
60. Ferrier DC, Honeychurch KC. Carbon nanotube (CNT)-based biosensors. *Biosensors*. 2021;11(12):486.
61. Norizan MN, Moklis MH, Demon SZN, Halim NA, Samsuri A, Mohamad IS, et al. Carbon nanotubes: Functionalisation and their application in chemical sensors. *RSC advances*. 2020;10(71):43704-32.
62. Astefanei A, Núñez O, Galceran MT. Characterisation and determination of fullerenes: a critical review. *Analytica chimica acta*. 2015;882:1-21.
63. Popov VN. Carbon nanotubes: properties and application. *Materials Science and Engineering: R: Reports*. 2004;43(3):61-102.
64. Hamblin MR. Fullerenes as photosensitizers in photodynamic therapy: pros and cons. *Photochemical & Photobiological Sciences*. 2018;17(11):1515-33.
65. Sudha PN, Sangeetha K, Vijayalakshmi K, Barhoum A. Nanomaterials history, classification, unique properties, production and market. *Emerging applications of nanoparticles and architecture nanostructures*: Elsevier; 2018. p. 341-84.

66. Madurani KA, Suprpto S, Machrita NI, Bahar SL, Illiya W, Kurniawan F. Progress in graphene synthesis and its application: history, challenge and the future outlook for research and industry. *ECS Journal of Solid State Science and Technology*. 2020;9(9):093013.
67. Day C. Andre Geim and Konstantin Novoselov win 2010 physics Nobel for graphene. 2010.
68. Soldano C, Mahmood A, Dujardin E. Production, properties and potential of graphene. *Carbon*. 2010;48:۲۱۲۷-۵۰:(۸)
69. Saedi M, Shirshahi V, Mirzaii M, Nikbakht M. Preparation of graphene oxide nanoparticles and their derivatives: Evaluation of their antimicrobial and anti-proliferative activity against 3T3 cell line. *Journal of Dispersion Science and Technology*. 2024;45(3):381-9.
70. Shirshahi V, Saedi M, Nikbakht M, Mirzaii M. Unveiling the antimicrobial potential of oxidized graphene derivatives: Promising materials for advanced wound dressings and antibacterial surfaces. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*. 2023;88:104949.
71. Zhang Y-Z, El-Demellawi JK, Jiang Q, Ge G, Liang H, Lee K, et al. MXene hydrogels: fundamentals and applications. *Chemical Society Reviews*. 2020;49(20):7229-51.
72. Wang J, Shen M, Liu Z, Wang W. MXene materials for advanced thermal management and thermal energy utilization. *Nano Energy*. 2022;97:107177.
73. Lei J-C, Zhang X, Zhou Z. Recent advances in MXene: Preparation, properties, and applications. *Frontiers of Physics*. 2015;10:276-86.
74. Gao L, Li C, Huang W, Mei S, Lin H, Ou Q, et al. MXene/polymer membranes: synthesis, properties, and emerging applications. *Chemistry of Materials*. 2020;32(5):1703-47.
75. Xu X, Wang S, Wu H, Liu Y, Xu F, Zhao J. A multimodal antimicrobial platform based on MXene for treatment of wound infection. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*. 2021;207:111979.
76. Singhwane A, Chaturvedi K, Mohapatra RK, Srivastava AK, Verma S. Mxene-Based Composite Materials as Antibacterial Agents for Healthcare Applications. *Age of MXenes, Volume 2 Applications in Diagnostics, Therapeutics, and Environmental Remediation: ACS Publications*; 2023. p. 1-17.
77. Zeng W, Cheng N-m, Liang X, Hu H, Luo F, Jin J, et al. Electrospun polycaprolactone nanofibrous membranes loaded with baicalin for antibacterial wound dressing. *Scientific Reports*. 2022;12(1):10900.
78. Diedkova K, Pogrebnyak AD, Kyrlyenko S, Smyrnova K, Buranich VV, Horodek P, et al. Polycaprolactone-MXene nanofibrous scaffolds for tissue engineering. *ACS applied materials & interfaces*. 2023;15(11):1.۴۰۳۳-۴۷
79. Li L, Ji X, Chen K. Conductive, self-healing, and antibacterial Ag/MXene-PVA hydrogel as wearable skin-like sensors. *Journal of Biomaterials Applications*. 2023;37(7):1169-81.
80. Park H, Kim J-U, Kim S, Hwang NS, Kim HD. Sprayable Ti3C2 MXene hydrogel for wound healing and drug release system. *Materials Today Bio*. 2023;23:100881.
81. Zhou H, Chen L, Huang C, Jiang Z, Zhang H, Liu X, et al. Endogenous electric field coupling Mxene sponge for diabetic wound management: haemostatic, antibacterial, and healing. *Journal of Nanobiotechnology*. 2024;22(1):530.
82. Gheisari F, Shafiee M, Abbasi M, Jangjou A, Izadpanah P, Vaez A, et al. Janus nanoparticles: an efficient intelligent modern nanostructure for eradicating cancer. *Drug Metabolism Reviews*. 2۰۲۳;۵۳(۴):۵۹۲-۶۰۳;۰۲۱
83. Zhang X, Fu Q, Duan H, Song J, Yang H. Janus nanoparticles: From fabrication to (bio) applications. *ACS nano*. 2021;15(4):6147-91.
84. Chen S, Li A, Wang Y, Zhang Y, Liu X, Ye Z, et al. Janus polyurethane sponge as an antibiofouling , antibacterial, and exudate-managing dressing for accelerated wound healing. *Acta Biomaterialia*. 2023;171:428-39.

85. Yang J, Wang K, Yu D-G, Yang Y, Bligh SWA, Williams GR. Electrospun Janus nanofibers loaded with a drug and inorganic nanoparticles as an effective antibacterial wound dressing. *Materials Science and Engineering: C*. 2020;111:110805.
86. Chen J, Qiu L, Li Q, Ai J, Liu H, Chen Q. Rapid hemostasis accompanied by antibacterial action of calcium crosslinking tannic acid-coated mesoporous silica/silver Janus nanoparticles. *Materials Science and Engineering: C*. 2021;123:111958.
87. Shi Y, Zhou M, Zhao S, Li H, Wang W, Cheng J, et al. Janus amphiphilic nanofiber membranes synergistically drive antibacterial and anti-inflammatory strategies for skin wound healing. *Materials & Design*. 2023;227:111778.
88. Zhou T, Chen Y, Fu L, Wang S, Ding H, Bai Q, et al. In situ MgO nanoparticle-doped Janus electrospun dressing against bacterial invasion and immune imbalance for irregular wound healing. *Regenerative Biomaterials*. 2024:rbae107.
89. Zhu Z, Huang J, Li J, Cao H, Lin Z, Li Y. Janus hydrogel/electrospun-membrane dressing enhancing wound healing in rats. *Biomed Eng Commun*. 2024;3(2):10.
90. Karlsson M, Elmasry M, Steinvall I, Sjöberg F, Olofsson P, Thorfinn J. Superiority of silver-foam over porcine xenograft dressings for treatment of scalds in children: A prospective randomised controlled trial. *Burns*. 2019;45(6):1401-9.
91. Chen J, Zou Q, Hamblin MR, Wen X. A preliminary clinical trial comparing wet silver dressings versus wet-to-dry povidone-iodine dressings for wound healing in pemphigus vulgaris patients. *Dermatologic Therapy*. 2021;34(3):e14906.
92. Asgari P, Zolfaghari M, Bit-Lian Y, Abdi AH, Mohammadi Y, Bahramnezhad F. Comparison of hydrocolloid dressings and silver nanoparticles in treatment of pressure ulcers in patients with spinal cord injuries: a randomized clinical trial. *Journal of Caring Sciences*. 2022;11(1):1.
93. Miner SA, Lee J, Protzman NM, Brigido SA. The effect of a silver hydrogel sheet dressing on postsurgical incision healing after foot and ankle surgery. *Scars, Burns & Healing*. 2022;8:20595131221122303.
94. Shi Z-Y, Hou S-L, Li X-W. Silver dressing in the management of an infant's urachal anomaly infected with methicillin-resistant *Staphylococcus aureus*: A case report. *World Journal of Clinical Cases*. 2022;10(8):2629.
95. Wang R, Guo Y, Li B, Zheng J, Tang Z, Shu M. Application Effect of Silver-Containing Dressings in the Repair of Chronic Refractory Wounds. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*. 2022;2022(1):3616923.
96. Zhang D, Yao D, Ma R, Nan S, Lv Y, Zhu Y, et al. Effect of silver nanoparticles with thermoplastic polyurethane on postoperative rehabilitation of diabetic patients with open fracture of lower extremities. *Frontiers in Surgery*. 2022;9:954155.

Original Article

Antimicrobial Nanoparticles in Wound Dressings: A Review Study

Received: 18/04/2025 - Accepted: 17/08/2025

Tahereh sadat Tabatabai ¹
Tayebe Sadat Tabatabai ¹
Vahid Shirshahi ^{2*}

¹ Committee of Student Research,
Faculty of Medicine, Shahrour
University of Medical Sciences,
Shahrour, Iran.

² Department of Basic Sciences,
Faculty of Medicine, Shahrour
University of Medical Sciences,
Shahrour, Iran

Email: shirshahi@gmail.com

Abstract

Introduction: Currently, a variety of nanomaterials, including silver, gold, copper, and zinc oxide, have been explored for innovative applications in wound dressings. These nanomaterials primarily serve as antibacterial agents to combat infections, while also exhibiting anti-inflammatory and healing properties. Additionally, this technology facilitates controlled drug delivery and promotes new tissue growth. Overall, nanomaterials have the potential to significantly enhance the quality of treatment and improve healing outcomes, particularly for complex wounds.

Methods: This review examined recent studies on various nanomaterials, including silver, gold, copper, and zinc oxide, used in wound dressing applications. Literature searches were conducted across databases such as PubMed, Scopus, and Web of Science using keywords like "nanomaterials," "wound healing," "antibacterial," and "infection." The studies reviewed in this article were selected from 2000 to 2025 to comprehensively cover the progress and recent innovations in the use of nanomaterials in wound dressings. Inclusion criteria focused on studies published in the last decade that evaluated the antibacterial, anti-inflammatory, and healing properties of nanomaterials in wound dressings. Data extraction involved assessing the types of nanomaterials used, their synthesis methods, functionalization techniques, and their reported biological activities and healing outcomes. The review also analyzed the effectiveness of these nanomaterials in controlled drug delivery and tissue regeneration.

Results: The analysis revealed that silver, gold, copper, and zinc oxide nanoparticles exhibit significant antibacterial activity, which is crucial in preventing infection in wound management. Silver nanoparticles demonstrated the most consistent antibacterial effects, alongside anti-inflammatory and wound healing properties, often enhancing tissue regeneration when integrated into dressings. Gold and copper nanomaterials showed promising results in stimulating cell proliferation and promoting angiogenesis, respectively. Zinc oxide nanostructures contributed to rapid wound closure and reduced inflammation. Overall, nanomaterials facilitated controlled drug release, improved antimicrobial efficacy, and supported tissue growth, indicating their potential to improve treatment outcomes for complex wounds.

Conclusion: The aim of this review article is to provide an overview of advances in antimicrobial wound dressings with nanoparticles.

Keywords: Nanoparticles, Wound Dressing, Antimicrobial, Tissue engineering, Infection, Biofilm