



## Recent Advances in Antibacterial Nano-Dressings for Chronic Wounds Application

**Moluk Aivazi \***

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

### Abstract

The number of patients undergoing amputations is increasing annually due to inadequate treatment of chronic wounds, especially wounds caused by diabetes mellitus. Therefore, the development of smart nano-dressings containing the necessary materials seems essential for successful healing, preventing infection, and preventing scar formation at the wound site. The Modern dressings include: hydrocolloid, alginate, hydrogel, foam and film. In comparison to traditional dressings, they have demonstrated better biocompatibility, biodegradability, pain relief, and moisture retention. They also have wound-facilitating properties. The development of smart nano-dressings, due to changes in their physical and chemical properties, they will help accelerate the healing process. The aim of this article was to review recent advances in antibacterial smart nano-dressings for the treatment of chronic wounds.

**Keywords:** chronic wounds, modern dressing, smart nano-dressing, antibacterial

Received: 14/April/2025

Accepted: 10/June/2025

eISSN: -----

ISSN: -----

## پیشرفت‌های اخیر در نانو پانسمان‌های هوشمند ضد باکتریایی جهت کاربرد در زخم‌های مزمن

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

### چکیده

تعداد بیماران قطع عضو به خاطر درمان‌های ناکافی زخم‌های مزمن به‌ویژه زخم‌های ناشی از دیابت شیرین، سالانه رو به افزایش است؛ بنابراین، فرآیند درمان و ترمیم زخم‌های مزمن، حائز اهمیت است. از این رو، توسعه‌ی نانو پانسمان‌های هوشمند حاوی مواد لازم جهت ترمیم موفق، ممانعت از عفونت و عدم تشکیل اسکار در محل زخم، ضروری به نظر می‌رسد. پانسمان‌های مدرن، شامل هیدروکلوئید، آلژینات، هیدروژل، فوم و فیلم هستند؛ و در مقایسه با پانسمان‌های سنتی، خاصیت، زیست‌سازگاری، تجزیه‌پذیری، تسکین درد و حفظ رطوبت بهتری را از خود نشان داده‌اند؛ همچنین پانسمان‌های مدرن، دارای عملکرد تسهیل‌کننده‌ی زخم نیز هستند. توسعه‌ی نانو پانسمان‌های هوشمند، به علت تغییر در ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن‌ها، به تسریع روند بهبودی کمک خواهند نمود. هدف از این مقاله، مروری بر پیشرفت‌های اخیر در نانو پانسمان‌های هوشمند ضد باکتریایی برای درمان زخم‌های مزمن است.

**کلیدواژه‌ها:** زخم‌های مزمن، پانسمان مدرن، نانو پانسمان هوشمند، ضد باکتریایی

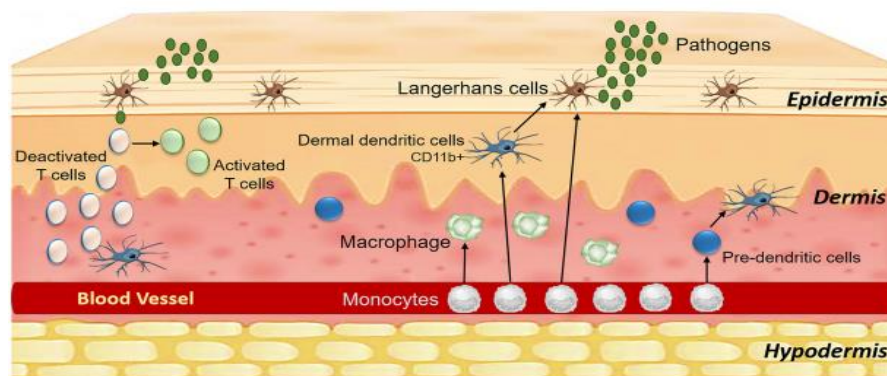
## مقدمه

### تاریخچه

هرساله، صدها میلیون نفر در سراسر جهان، از زخم‌های پوستی خارجی (مانند خراشیدگی، جراحی و سوختگی) یا درون‌زا (مثلاً دیابت و بیماری‌های عروق خونی) رنج می‌برند. در چند سال گذشته، زمینه‌ی تحقیق و توسعه در خصوص مواد پانسمان زخم، مرحله‌ی پیشرفته‌ای از استانداردها را به خود اختصاص داده که به درک کافی درباره‌ی پاتوژنز زخم‌های مزمن منجر شده است (۱). جیمز ماریون سیمز، برای اولین بار در سال ۱۸۵۲، از سیم‌های نقره‌ای به‌عنوان بخیه استفاده کرد. او در قرن نوزدهم، نخ‌های بخیه‌ی نقره‌ای را به جامعه‌ی پزشکی معرفی کرد. دوره‌ی بعدی استفاده‌ی رایج و گسترده از نقره در پزشکی، در زمان جنگ جهانی اول بود؛ زمانی که از برگ‌های نقره برای درمان زخم‌ها استفاده می‌شد تا خطر عفونت کاهش یابد و بهبود زخم تسریع شود. اگرچه استفاده‌ی تجربی از نقره در پزشکی، هزاران سال است که شناخته شده؛ اما مکانیسم‌های فعالیت ضد باکتریایی آن، پیچیده است (۲).

### آناتومی پوست و فیزیولوژی مراحل ترمیم زخم

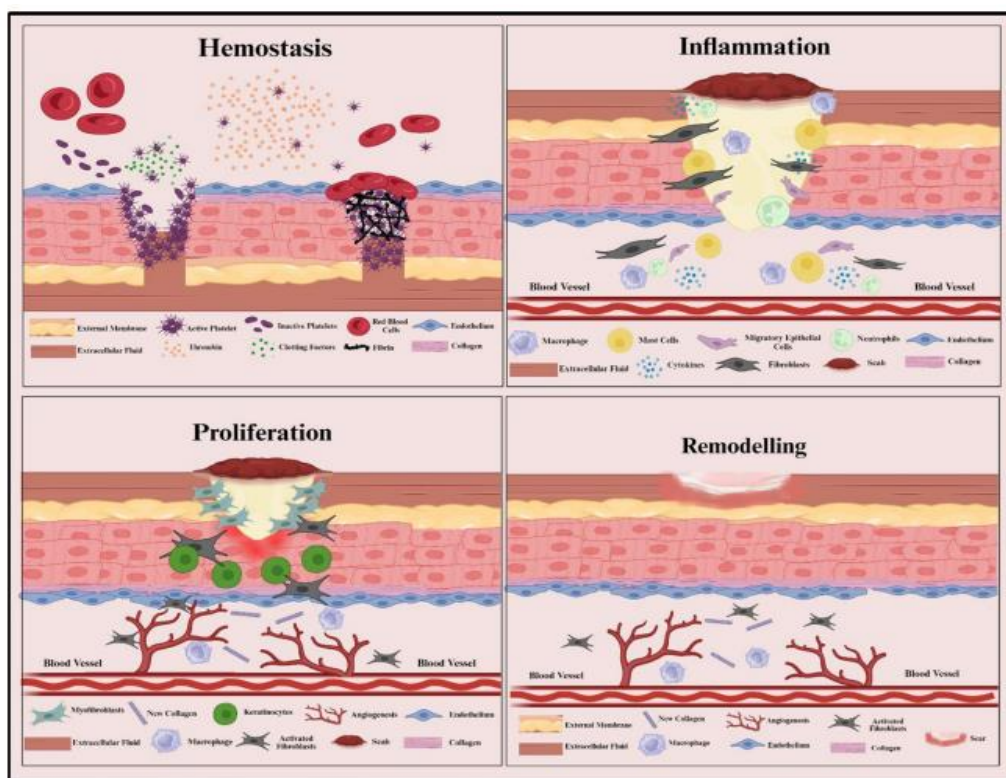
پوست، از سه لایه‌ی اپیدرم، درم و هیپودرم تشکیل شده است. همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، اپیدرم، خارجی‌ترین لایه‌ی پوست بوده و از چندین لایه و انواع سلول‌های مختلف برای عملکرد آن تشکیل شده است. لایه‌های اپیدرمی از عمق به سطح، شامل لایه‌ی پایه، خاردار، گرانولوزوم، شفاف و شاخی است. درم، توسط غشای پایه به اپیدرم متصل می‌شود. درم، از دو لایه بافت همبند پاپیلاری و مشبک تشکیل شده است که بدون مرزبندی واضح، با هم ادغام می‌شوند. هیپودرم یا فاسیای زیر جلدی، در زیر درم قرار دارد. این لایه، عمیق‌ترین لایه‌ی پوست بوده و حاوی لوبول‌های چربی، نوروهای حسی، رگ‌های خونی و فولیکول‌های مو است (۳). زخم‌ها، بر اساس زمان و ویژگی‌های روند بهبود، به دو دسته‌ی زخم‌های حاد و زخم‌های مزمن تقسیم می‌شوند. در حالی که زخم‌های حاد، زخم‌های پوستی یا زخم‌های جراحی هستند، زخم‌های مزمن، شامل زخم‌های فشاری، زخم‌های پا، سوختگی‌های شدید و زخم‌های دیابتی می‌باشند (۴).



شکل ۱. تصویری از لایه‌های پوست در بدن انسان (۳)

انواع متعدد سلول‌ها و فاکتورهای رشد، با هماهنگی مجموعه‌ی پیچیده‌ای از سیستم‌های فیزیولوژیکی، به بهبود زخم‌ها کمک می‌کنند. بهبود زخم (مطابق با شکل ۲)، به چهار مرحله‌ی هموستاز، التهاب، تکثیر و بازسازی تقسیم می‌شود. هدف از مرحله‌ی هموستاز، به حداقل رساندن خونریزی و توقف آن است. در فاز التهابی، معمولاً بلافاصله التهاب شروع می‌شود و تا سه روز ادامه می‌یابد. در این مرحله، اتساع عروق، افزایش نفوذپذیری عروق و آزادسازی

واسطه‌های التهابی، روی می‌دهد. مرحله‌ی تکثیر، همراه با تشکیل عروق جدید و رشد بافت پوششی طی چند هفته در طول دوره‌ی بهبودی زخم است. مرحله‌ی بازسازی، آخرین مرحله از بهبود زخم است که در طی آن ساختار کلاژن اولیه‌ی بافت سالم، ترمیم می‌شود. در این مرحله، فیبروبلاست‌ها مسئول سنتز متالوپروتئینازهای ماتریکس خارج سلولی و ماتریکس هستند که انقباض زخم را تسهیل کرده و از تشکیل اسکار جلوگیری می‌کنند (۵).



شکل ۲. تصویری از چهار مرحله‌ی ترمیم زخم: هموستاز، التهاب، تکثیر و بازسازی

### ساختار و عملکرد نانو پانسمان‌های ضد باکتریایی و پیشینه‌ی تحقیق

بر اساس مطالعات انجام‌شده، علاوه بر پانسمان‌های سنتی زخم، تکنیک‌های مدرن نیز مانند هیدروژل، هیدروکلوئید، فوم و فیلم‌های پلیمری، می‌توانند باعث بهبود زخم شوند. با این حال، پانسمان‌های زخم زیست فعال که دارای آنتی‌بیوتیک‌ها یا سایر اجزای ضدباکتریایی می‌باشند، نه تنها در مبارزه با عفونت‌های باکتریایی مؤثرتر هستند، بلکه روند ترمیم زخم را نیز تسریع می‌کنند. آنتی‌بیوتیک‌های سنتی، مانند تتراسایکلین‌ها، آمینوگلیکوزیدها، کینولون‌ها و سفالوسپورین‌ها، با از بین بردن دیواره‌ی سلولی باکتری به دلیل تأثیر آن‌ها بر سنتز پروتئین و اسید نوکلئیک، در از بین بردن باکتری‌ها مؤثر بوده‌اند. با این حال، سوءمصرف آنتی‌بیوتیک‌ها، به ایجاد چندین باکتری مقاوم به دارو و تشکیل بیوفیلم‌ها منجر شده است. بیوفیلم‌های تولیدشده توسط باکتری‌ها، از نفوذ آنتی‌بیوتیک جلوگیری می‌کنند؛ بنابراین، مقاومت دارویی را تشدید و عفونت زخم را محدود می‌کنند و موجب افزایش سریع در بروز عفونت زخم، همراه با پیامدهایی مانند مرگ‌های قطع عضو مرتبط با زخم‌های مزمن می‌شوند؛ از این رو، توسعه‌ی فناوری‌ها جدید در راستای کارایی درمان و تسریع بهبود عفونت زخم، مؤثر خواهد بود (۶). پانسمان‌های مدرن با زیست‌سازگاری، تجزیه‌پذیری، تسکین درد و حفظ رطوبت بهتر، علاوه بر پوشاندن زخم، به عنوان تسهیل‌کننده‌ی عملکرد زخم نیز عمل می‌کنند. پانسمان‌های مدرن مورد استفاده، شامل هیدروکلوئید، آلترینات، هیدروژل، فوم و فیلم هستند. پانسمان‌های هیدروکلوئیدی، از یک گرانول کلوئیدی آب‌دوست و چسب پوشیده‌شده با یک پلی اورتان خارجی ضد آب تشکیل

شده‌اند. این نوع پانسمان، ترشحات زخم را جذب نموده و در برابر بخار آب غیرقابل نفوذ است؛ از طرفی محیط مرطوبی را برای ترمیم زخم فراهم نموده، اما نسبت به اکسیژن نفوذناپذیر است؛ که اپیتلیال شدن و سنتز کلاژن را تسریع نموده و pH ترشحات زخم را کاهش می‌دهد؛ از این‌رو، منجر به کاهش تعداد باکتری‌ها در زخم می‌شود (۴). این نوع از پانسمان‌ها، از آلودگی جلوگیری نموده، اتولیز<sup>۱</sup> را برای برداشتن بافت‌های آسیب‌دیده یا عفونی ترویج می‌کنند و نیازی به پانسمان ثانویه ندارند. از زمانی که اولین محصول در سال‌های ۱۹۸۳-۱۹۸۲ به بازار عرضه شد، مطالعات متعددی انجام شده است که اثربخشی پانسمان‌های هیدروکلئیدی را نشان می‌دهد. جین و همکاران، اثر ترمیم زخم و فعالیت ضد باکتریایی پانسمان هیدروکلئیدی حاوی بنزالکونیوم کلرید را در مدل‌های آزمایشگاهی و حیوانی ارزیابی کرده‌اند و نتایج فعالیت ضد باکتریایی قابل توجهی را علیه استرپتوکوکوس اورئوس، اشرشیاکلی و سودوموناس آئروژینوزا نشان داده‌اند؛ همچنین اندازه‌ی زخم، عفونت و سایدگی با استفاده از پانسمان هیدروکلئیدی حاوی بنزالکونیوم، کاهش یافته است. در مطالعه‌ی دیگری روی موش‌های مبتلا به دیابت، کاهش سریع ماکروفاژهای عفونی و ظهور ماکروفاژهای ضد آماس، مشاهده شده است. همچنین علائم بهبود زخم، از جمله اپیتلیال شدن مجدد و رنگ‌زایی را نشان داده است. در مطالعه‌ی تاکیکی و چن، با استفاده از پانسمان هیدروکلئیدی فوق نازک دئودرم<sup>۲</sup> بر روی موضع آسیب‌دیده در نوزادان، همه‌ی زخم‌ها بدون نقص در عملکرد، بهبود قابل توجهی نشان دادند. در مطالعه‌ی شینوها و همکاران، پانسمان‌های هیدروکلئیدی حاوی سرامید برای واکنش پوستی دست و پا در کف پای بیماران تحت درمان با سورافنیب برای کارسینومای متاستاتیک سلول کلیوی، مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج، نشان داده‌اند که پانسمان هیدروکلئیدی حاوی سرامید، از تشدید واکنش پوستی دست و پا ناشی از سورافنیب در بیماران مبتلا به سرطان سلول کلیوی متاستاتیک جلوگیری می‌کند.

یکی دیگر از انواع پانسمان‌های مدرن، آلژینات است که یک بیوماده با ساختاری شبیه به ماتریکس خارج سلولی بوده و زیست‌سازگاری بالایی را نشان می‌دهد. پانسمان آلژینات، ترشحات زخم را جذب کرده و محیطی مرطوب برای بهبود زخم ایجاد می‌کند. ژل، با اعمال آلژینات بر روی سطح زخم، تشکیل شده و به راحتی در هنگام برداشتن پانسمان یا شستشو با نمک استریل، برداشته می‌شود. به علاوه، پانسمان‌های آلژینات می‌توانند التهاب و بوی زخم را کاهش داده و نفوذپذیری خوبی در برابر اکسیژن، گازهای دیگر یا مایعات داشته باشند. آلژینات، نمی‌تواند خود چسبنده باشد؛ بنابراین، یک پانسمان ثانویه مورد نیاز است. در صورت تشکیل ژل، ممکن است به دلیل ماهیت فیبری آلژینات، الیاف اضافی در زخم باقی بماند که مکانیسم التهاب را تشدید خواهد نمود (۴). در مطالعه‌ی دیگر در خصوص آلژینات حاوی پوویدون-ید و نانوذرات نقره، تمایل مشخصی به حذف میکروارگانیسم‌ها بدون نیاز به پانسمان‌های دیگر مشاهده شده است (۷). نتایج مطالعات حیوانی بر روی پانسمان آلژینات با بسیاری از ترکیبات ضد باکتری، مانند نانو ذرات اکسید روی، نشانگر مؤثر بودن آن در چسبندگی کراتینوسیت‌ها و تکثیر سلولی بوده است؛ که به طور مؤثری منجر به بسته شدن زخم شده است (۸، ۹). شفیع و همکاران<sup>۳</sup> (۱۰) نیز طی مطالعه‌ای، بیان کردند که این پانسمان زیست فعال، نه تنها باعث بهبود بسته شدن زخم می‌شود، بلکه موجب سنتز کلاژن و تشکیل عروق نیز خواهد شد.

این پانسمان زیست تخریب‌پذیر و زیست‌سازگار، خواص ضد میکروبی و ضد عفونی نیز دارد. نوع دیگری از پانسمان‌های مدرن، هیدروژل‌ها هستند. هیدروژل‌ها، زنجیره‌های پلیمری سه بعدی آب دوست هستند که می‌توانند مقدار زیادی حجم آب به دلیل وجود قطعات آب دوست را جذب کنند. بر اساس منشأ پلیمرهای جزء، سه نوع هیدروژل

1. autolysis

2. duoderm

3. Shafei et al.

وجود دارد که عبارت‌اند از: هیدروژل‌های طبیعی، مصنوعی و هیبرید یا نیمه‌مصنوعی. هیدروژل‌های هیبرید، عمدتاً هر دو ویژگی زیست‌سازگاری بالای پلیمرهای طبیعی و خواص مکانیکی الاستیک پلیمرهای مصنوعی را دارند. هیدروژل‌ها را می‌توان به صورت ژل آمورف و یا به صورت ورق الاستیک جامد، استفاده کرد. پانسمان‌های هیدروژل با ایجاد یک محیط مرطوب در محل زخم، شرایط مساعدی را برای بازسازی بافت بدن ایجاد می‌کند که اثر تسکینی برای زخم را نیز به دنبال دارد. با این حال، این تجمع مایع، می‌تواند منجر به عفونت‌های پوستی، رشد باکتری‌ها و باعث ایجاد بوی بد در محل زخم‌ها شود. علاوه بر این، پانسمان هیدروژل، به زخم یا بافت‌ها غیرچسبنده است و درد را در حین تغییر پانسمان کاهش می‌دهد. خواص مکانیکی قابل تنظیم هیدروژل‌ها، باعث مناسب بودن آن‌ها برای استفاده در انواع زخم‌ها می‌شود. محصولات پانسمان هیدروژل، معمولاً برای زخم‌های فشاری، زخم پای دیابتی، پارگی‌های پوستی و زخم‌های جراحی و سوختگی‌ها، از جمله سوختگی‌های جزئی، سوختگی‌های درجه اول و دوم مناسب هستند. پانسمان‌های هیدروژل، باید با پانسمان ثانویه، مانند فیلم یا فوم یا بدون پانسمان ثانویه استفاده شوند (۱۱، ۱۲). پانسمان زخم هیدروژل، موادی با خواص فیزیکی-شیمیایی منحصربه‌فرد و قابل انعطاف هستند.

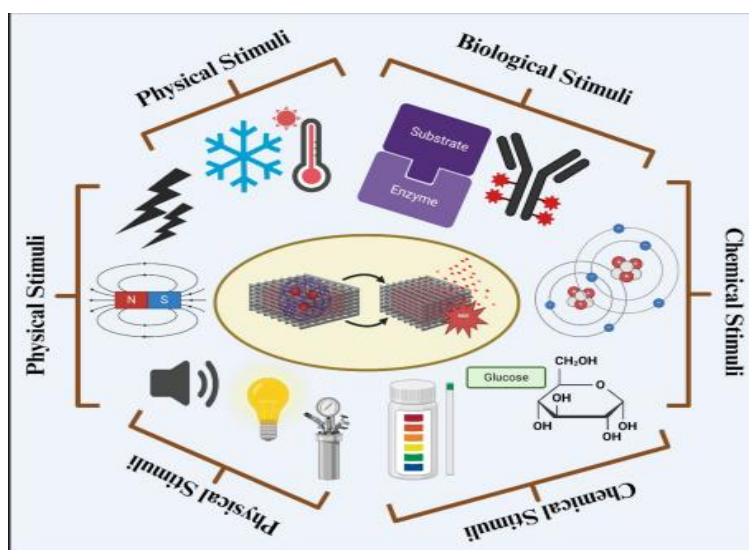
چن و همکاران<sup>۱</sup> (۱۳)، با طراحی یک هیدروژل چندکاره با اتصال متقابل هماهنگ پلی‌اتیلن گلیکول تیوله چندبازویی با نیترات نقره و بارگذاری داروی رگ‌زای دسفرال، نتایج بالقوه‌ای در بازسازی زخم‌های پوستی دیابتی و زخم‌های باز نشان داده‌اند. اخیراً یک پانسمان هیدروژل دیگری به نام ای.اچ.او-۸۵-۱۰۱<sup>۲</sup> سنتز شده است. این پانسمان جدید، به‌ویژه برای زخم‌های مرطوب با خواص آنتی‌اکسیدانی استفاده می‌شود که قادر به حفظ محیط‌های اسیدی، تسریع در بهبود زخم‌های مزمن سخت‌ترمیم و تحریک تشکیل بافت دانه‌بندی بر اساس سایر انواع زخم‌ها است (۱۴-۱۶). یکی دیگر از انواع پانسمان‌های مدرن، فوم است که دارای ساختار متخلخلی بوده و بر اساس عملکرد مویرگی، توانایی جذب مواد را در فضاهای دارای هوا دارد. رایج‌ترین پانسمان‌های فوم، از پلی اورتان ساخته می‌شوند. ساختار متخلخل با قدرت جذب بالا، باعث می‌شود پانسمان فوم برای بسیاری از زخم‌های ترشحي مناسب باشد (۱۷).

مشابه ویژگی‌های هیدروژل، پانسمان فوم می‌تواند محیطی مرطوب را در اطراف زخم‌ها حفظ کند. دو خاصیت فوم، شامل عایق حرارتی و جاذب ترشحات است که توسط بافت، ضخامت و اندازه‌ی منافذ فوم کنترل می‌شود؛ از این‌رو، ساختار متخلخل با قابلیت جذب بالا باعث می‌شود که پانسمان فوم برای بسیاری از زخم‌های تراوش‌کننده، مناسب باشد. پانسمان‌های فوم، برای ایجاد سد مقاوم در برابر آب و میکروب، معمولاً با یک غشای سیلیکونی برای نگه داشتن مناسب پانسمان در محل زخم و محافظت از زخم در برابر ضربه هنگام تعویض پانسمان‌ها عرضه می‌شود. پانسمان‌های فوم را می‌توان بسته به سطح آگزودا، تا یک هفته نگه داشت (۱۸). پانسمان‌های فومی، برای زخم‌های خشک اپیتلیال، زخم‌های نکروزه و زخم‌هایی که نیاز به مراقبت مکرر دارند، تجویز نمی‌شوند. یک مطالعه، اثربخشی سه پانسمان فوم تجاری موجود، یعنی مپیلکس بردر فلکس<sup>۳</sup>، آلوین لایف<sup>۴</sup> و اپتیفوم<sup>۵</sup> را در درمان زخم‌های مزمن مورد بررسی قرار داده و اثربخشی پانسمان‌های فوم در درمان زخم‌ها، به‌ویژه زخم‌های مزمن را تأیید نموده است. نتایج آزمایش‌های بالینی بر روی فعالیت‌های ضد باکتریایی سه پانسمان فومی Mepilex Ag، Mepilex Border Ag و Mepilex Transfer Ag، نشان داده است که فوم‌پوش‌های حاوی ذرات نقره، در کنترل زخم مؤثر هستند و علائم عفونت موضعی را در زخم‌های حاد و مزمن برطرف می‌کنند (۱۹).

1. Chen et al.  
2. EHO-85-101  
3. mepilex border flex  
4. allevyn life  
5. optifoam gentle EX



پانسمان‌های فیلم، شامل ورقه‌های پلی اورتان نازک، انعطاف‌پذیر و شفاف هستند که برای چسبیدن به پوست اطراف زخم و حفظ رطوبت در محیط بهبودی طراحی شده‌اند. خاصیت چسبندگی پانسمان‌های فیلم، به آن‌ها اجازه می‌دهد تا روی سطوح متحرک مانند اتصالات قرار گیرند؛ اما ممکن است هنگام برداشتن پانسمان‌ها، به اطراف زخم آسیب وارد کنند. پانسمان‌های مذکور، در ابتدا از مشتقات نایلونی با یک قاب پلی اورتان چسبنده ساخته شدند و به دلیل ظرفیت جذب محدود، برای زخم‌های اگزوداتیو<sup>۱</sup> استفاده نمی‌شدند. این پانسمان‌ها، برای محل‌های کاتتر<sup>۲</sup> داخل وریدی استفاده می‌شوند. پلیمرها، به دلیل زیست‌سازگاری و شباهت آن‌ها با ماتریکس خارج سلولی، معمولاً در زمینه‌های دارویی و زیست پزشکی استفاده می‌شوند. بستر تولیدشده از پلیمرها می‌تواند محیط زیستی را تقلید کند که به سلول‌ها در تکثیر، تمایز و ترمیم بافت آسیب‌دیده کمک می‌کند. ازجمله‌ی این پلیمرها می‌توان به کلاژن، هیالورونیک اسید، کیتوسان، فیبرینوزن، فیبرین و پلی لیزین اشاره نمود (۲۵-۲۰).



شکل ۳. تصویر انواع محرک‌های مؤثر بر رهاسازی دارو از داربست‌های نانوالیافی (۲۶)

در بیشتر موارد، پانسمان‌های مبتنی بر فناوری نانو، برای رساندن مواد فعال به بستر زخم استفاده می‌شوند. هنگامی که اندازه‌ی مواد به مقیاس نانو کاهش می‌یابد، تغییری در ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی ایجاد می‌شود که به تأثیرگذاری و تسریع روند بهبودی کمک خواهد نمود. pH پوست سالم، بین ۴/۰ تا ۶/۰ است. در روند بهبود زخم‌ها، ابتدا pH محیط زخم از قلیایی به خنثی و سپس اسیدی تغییر می‌کند. محل زخم، pH کمتری نسبت به پوست اطراف دارد. پانسمان‌های پاسخگو به pH، بر اساس این تفاوت pH برای درمان زخم‌های عفونی و مزمن استفاده شده‌اند. مواد حساس به تغییرات کنترل‌شده‌ی خارجی و تغییر pH را تحت عنوان مواد هوشمند طبقه‌بندی می‌کنند. انواع سیستم‌های دارورسانی هوشمند، مطابق با شکل ۳، مبتنی بر داربست‌های نانوالیاف، روشی پیشرفته در مهندسی بافت، به‌ویژه برای بهبود زخم‌ها هستند. این پانسمان‌های هوشمند، برای رهاسازی هدفمند داروها ساخته شده‌اند و توسط سیگنال‌های بیولوژیکی دقیق یا تغییرات محیطی، از لحاظ زمان و مکان، تنظیم می‌شوند. هدف از انتشار موضعی و هدفمند دارو، افزایش ایمنی و اثربخشی درمان است. پلیمرهای مورد استفاده در این داربست‌ها، نقش مهمی در عملکرد آن‌ها دارند؛ زیرا می‌توانند به محرک‌های مختلف، مانند pH، دما، نور، میدان‌های الکتریکی و میدان‌های مغناطیسی واکنش‌های متفاوتی نشان دهند (۲۶). داربست‌های نانو الیاف، حاوی مواد انعقادی از قبیل ترومبین، خونریزی بیشتر در

1. exudative  
2. catheter

محل زخم را محدود نموده و با متوقف نمودن رشد باکتری، در بهبودی زخم مؤثر هستند. (۲۷). در فناوری‌های جدید طراحی و ساخت نانو الیاف، با مطالعه بر روی موش‌های دارای زخم‌های دیابتی، کاهش التهاب، مهاجرت سلولی و بهبود ترمیم روی داده است (۲۸). با افزودن و بارگذاری فاکتورهای رشد و برخی ویتامین‌ها بر روی داربست‌های نانو الیاف، تکثیر سلولی و رگ‌زایی نیز مشاهده شده است (۲۹، ۳۰). به نظر می‌رسد با طراحی و ساخت نانو پانسمان‌های هوشمند حاوی مواد زیستی (از قبیل انواع فاکتورهای رشد، ویتامین‌ها، نانو ذرات آنتی باکتریال، آنتی اکسیدان‌ها و غیره)، می‌توان در راستای بهبود زخم، ممانعت از عفونت و عدم تشکیل اسکار در محل زخم، کمک مؤثری به بیماران دچار زخم‌های مزمن نمود. هدف از مقاله‌ی فوق، مروری بر پیشرفت‌های اخیر در نانو پانسمان‌های هوشمند ضد باکتریایی جهت کاربرد در زخم‌های مزمن است.

### بحث و نتیجه‌گیری

بر اساس مطالعات معرفی شده در قسمت مقدمه‌ی مقاله، می‌توان گفت که پانسمان‌های مدرن، یک محیط مرطوب برای بهبود زخم، کاهش درد و ضد باکتری را فراهم می‌کنند. با این حال، اثربخشی این پانسمان‌های مدرن، تنها به تعداد اندکی مطالعه‌ی بالینی محدود شده است. از سوی دیگر، زخم، یک مشکل بالینی پیچیده است که اثربخشی درمان به عوامل مختلفی چون تشخیص، بیماری‌های مزمن فرد، محل آناتومیک، وضعیت فیزیولوژیکی و اندازه‌ی زخم بستگی دارد. نانوتکنولوژی به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد نانو ذرات نقره، طلا، اکسید روی و پلی لاکتیک-گلیکولیک اسید (مانند نسبت سطح به حجم بالا که تعامل آن‌ها با سیستم‌های بیولوژیکی را افزایش می‌دهد)، مزایای خاصی مانند فعالیت ضد باکتریایی، خواص ضد التهابی و بازسازی بافت را ارائه می‌کنند. مواد هوشمند، مانند داربست‌های نانوالیافی، هیدروژل‌ها و پلیمرهای الکترواکتیو، ویژگی‌های دینامیکی را اضافه نموده که به درمان و تحویل دارو کمک می‌کنند. این مواد، شبیه ماتریکس خارج سلولی هستند، یک محیط مرطوب را فراهم می‌کنند و به محرک‌های الکتریکی پاسخ می‌دهند؛ بنابراین، رشد و مهاجرت سلول را افزایش می‌دهند. مواد جدید برای پانسمان‌های مدرن، با نتایج مثبت از طریق مطالعات مختلف آزمایشگاهی و حیوانی، منجر به نوآوری هرچه بیشتر در بهبود محصولات پانسمان در بازار خواهد شد. ایجاد محصولات پانسمان ایده‌آل با مزایای برجسته در راستای فرآیند بهبود زخم، به خواص ضد باکتریایی ذاتی، سازگاری بیولوژیکی بالا، سازگاری با محیط زیست، سهولت کارکرد، هوشمندی ساختار و مقرون به صرفه بودن آن وابسته است. علاوه بر این، برای دستیابی به پانسمان‌های زخم با اجزای فعال زیستی شامل آنتی‌بیوتیک‌ها، فاکتورهای رشد، آنتی‌اکسیدان‌ها، عوامل ضدالتهاب و ویتامین‌ها برای بهبود نتایج درمانی یا غلبه بر محدودیت‌های پانسمان، به مطالعات بیشتری نیاز است؛ به طوری که با افزودن این مواد به پانسمان، تأثیر منفی بر روی خواص مکانیکی، تکثیر سلولی در محل زخم و خاصیت جذب ترشحات پانسمان نداشته باشد. درمان‌های شخصی، شامل ایجاد برنامه‌های درمانی سفارشی بر اساس آرایش ژنتیکی، سبک زندگی و شرایط خاص زخم است که بهبودی مؤثرتر و هدفمندتر را فراهم می‌کند. با این حال، هنوز مطالعات وسیعی در زمینه‌ی طراحی و ساخت پانسمان‌های هوشمند مورد نیاز است تا بتوان به حداکثر کارایی این مواد در درمان زخم‌های مزمن، به‌ویژه زخم‌های ناشی از دیابت دست یافت.



1. Stoica AE, Chircov C, Grumezescu AM. Nanomaterials for wound dressings: An up-to-date overview. *Molecules*. 2020 Jun 10;25(11):2699.
2. 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 Dec 26;13(1):69.
3. Abdo JM, Sopko NA, Milner SM. The applied anatomy of human skin: A model for regeneration. *Wound Medicine*. 2020 Mar 1;28:100179.
4. Nguyen HM, Le TT, Nguyen AT, Le HN, Pham TT. Biomedical materials for wound dressing: Recent advances and applications. *RSC Advances*. 2023;13(8):5509-28.
5. Nasra S, Pramanik S, Oza V, Kansara K, Kumar A. Advancements in wound management: Integrating nanotechnology and smart materials for enhanced therapeutic interventions. *Discover Nano*. 2024 Oct 2;19(1):159.
6. Pang Q, Jiang Z, Wu K, Hou R, Zhu Y. Nanomaterials-based wound dressing for advanced management of infected wound. *Antibiotics*. 2023 Feb 8;12(2):351.
7. Fischer M, Gebhard F, Hammer T, Zurek C, Meurer G, Marquardt C, Hoefer D. Microbial alginate dressings show improved binding capacity for pathophysiological factors in chronic wounds compared to commercial alginate dressings of marine origin. *Journal of Biomaterials Applications*. 2017 Apr;31(9):1267-76.
8. Azimi B, Maleki H, Zavagna L, De la Ossa JG, Linari S, Lazzeri A, Danti S. Bio-based electrospun fibers for wound healing. *Journal of functional biomaterials*. 2020 Sep 22;11(3):67.
9. Fan Y, Wu W, Lei Y, Gaucher C, Pei S, Zhang J, Xia X. Edaravone-loaded alginate-based nanocomposite hydrogel accelerated chronic wound healing in diabetic mice. *Marine Drugs*. 2019 May 11;17(5):285.
10. Shafei S, Khanmohammadi M, Heidari R, Ghanbari H, Taghdiri Nooshabadi V, Farzamfar S, Akbari qomi M, Sanikhani NS, Absalan M, Tavoosidana G. Exosome loaded alginate hydrogel promotes tissue regeneration in full-thickness skin wounds: An in vivo study. *Journal of Biomedical Materials Research Part A*. 2020 Mar;108(3):545-56.
11. Liang Y, He J, Guo B. Functional hydrogels as wound dressing to enhance wound healing. *ACS Nano*. 2021 Aug 10;15(8):12687-722.
12. Otálora A, Lerma TA, Palencia M. Novel one-pot synthesis of polymeric hydrogels based on isocyanate click chemistry: Structural and functional characterization. *Journal of Polymer Research*. 2022 Nov;29(11):491.
13. Chen H, Cheng R, Zhao X, Zhang Y, Tam A, Yan Y, Shen H, Zhang YS, Qi J, Feng Y, Liu L. An injectable self-healing coordinative hydrogel with antibacterial and angiogenic properties for diabetic skin wound repair. *NPG Asia Materials*. 2019 Dec;11(1):3.
14. Liang Y, Zhu H, Wang L, He H, Wang S. Biocompatible smart cellulose nanofibres for sustained drug release via pH and temperature dual-responsive mechanism. *Carbohydrate Polymers*. 2020 Dec 1;249:116876.
15. Cui L, Wang X, Liu Z, Li Z, Bai Z, Lin K, Yang J, Cui Y, Tian F. Metal-organic framework decorated with glycyrrhetic acid conjugated chitosan as a pH-responsive nanocarrier for targeted drug delivery. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2023 Jun 15;240:124370.
16. Yao F, Zheng Y, Gao Y, Du Y, Chen F. Electrospinning of peanut protein isolate/poly-L-lactic acid nanofibers containing tetracycline hydrochloride for wound healing. *Industrial Crops and Products*. 2023 Apr 1;194:116262.
17. Nielsen J, Fogh K. Clinical utility of foam dressings in wound management: A review. *Chronic Wound Care Management and Research*. 2015 Feb 17:31-8.
18. Weller CD, Team V, Sussman G. First-line interactive wound dressing update: a comprehensive review of the evidence. *Frontiers in Pharmacology*. 2020 Feb 28;11:155.
19. Wang Z, Yu H, Liyanage A, Qiu J, Thushara D, Bao B, Zhao S. Collective diffusion of charged nanoparticles in microchannel under electric field. *Chemical Engineering Science*. 2022 Feb 2;248:117264.
20. Lian X, Fang Y, Joseph E, Wang Q, Li J, Banerjee S, Lollar C, Wang X, Zhou HC. Enzyme–MOF (metal–organic framework) composites. *Chemical Society Reviews*. 2017;46(11):3386-401.
21. Quan Y, Song Y, Shi W, Xu Z, Chen JS, Jiang X, Wang C, Lin W. Metal–organic framework with dual active sites in engineered mesopores for bioinspired synergistic catalysis. *Journal of the American Chemical Society*. 2020 Apr 25;142(19):8602-7.

22. Qian Q, Asinger PA, Lee MJ, Han G, Mizrahi Rodriguez K, Lin S, Benedetti FM, Wu AX, Chi WS, Smith ZP. MOF-based membranes for gas separations. *Chemical Reviews*. 2020 Jul 1;120(16):8161-266.
23. Nong W, Wu J, Ghiladi RA, Guan Y. The structural appeal of metal–organic frameworks in antimicrobial applications. *Coordination Chemistry Reviews*. 2021 Sep 1;442:214007.
24. Yadav P, Shah K, Kansara K, Kumar A, Rawal R, Bhatia D. Tissue-Derived primary cell type dictates the endocytic uptake route of carbon quantum dots and in vivo uptake. *ACS Applied Bio Materials*. 2023 Mar 28;6(4):1629-38.
25. Nasra S, Shukla H, Patel M, Kumar A. Bortezomib-loaded immunoliposomes against CD44 expressing macrophages: an interplay for inflammation resolution. *Nanoscale*. 2024;16(10):5280-93.
26. Nepal A, Tran HD, Nguyen NT, Ta HT. Advances in haemostatic sponges: Characteristics and the underlying mechanisms for rapid haemostasis. *Bioactive Materials*. 2023 Sep 1;27:231-56.
27. Pandey G, Pandey P, Arya DK, Kanaujiya S, Kapoor DD, Gupta RK, Ranjan S, Chidambaram K, Manickam B, Rajinikanth PS. Multilayered nanofibrous scaffold of Polyvinyl alcohol/gelatin/poly (lactic-co-glycolic acid) enriched with hemostatic/antibacterial agents for rapid acute hemostatic wound healing. *International Journal of Pharmaceutics*. 2023 May 10;638:122918.
28. Sun L, Gao W, Fu X, Shi M, Xie W, Zhang W, Zhao F, Chen X. Enhanced wound healing in diabetic rats by nanofibrous scaffolds mimicking the basketweave pattern of collagen fibrils in native skin. *Biomaterials Science*. 2018;6(2):340-9.
29. Vijayan V, Sreekumar S, Singh F, Govindarajan D, Lakra R, Korrapati PS, Kiran MS. Praseodymium–cobaltite-reinforced collagen as biomimetic scaffolds for angiogenesis and stem cell differentiation for cutaneous wound healing. *ACS Applied Bio Materials*. 2019 Jul 18;2(8):3458-72.
30. Zhan A, Chen L, Sun W, Tang Y, Chen J, Yu D, Zhang W. Enhancement of diabetic wound healing using a core-shell nanofiber platform with sequential antibacterial, angiogenic, and collagen deposition activities. *Materials & Design*. 2022 Jun 1;218:110660.

