

Polymerization
Quarterly, 2026
Volume 15, Number 4
Pages 18-30
ISSN: 2252-0449

Application of Polyacrylamide Nanocomposites in Wound Dressings

Fatemeh Sepahvand, Zeynab Toraby, and Pedram Manafi*

Department of Polymer Engineering, Amirkabir University of Technology, Mahshahr
Campus, P.O. Box 63517-13178, Mahshahr, Iran

Received: 18 May 2025, Accepted: 3 November 2025

Abstract

Chronic infected wounds remain a major challenge in tissue regeneration and clinical wound management. Smart hydrogel-based wound dressings, particularly those using polyacrylamide (PAM), have gained increasing attention due to their three-dimensional structure, high water absorption capacity, biocompatibility, and drug-loading potential. These hydrogels provide an optimal environment for wound healing by moisture retention and facilitating nutrient and oxygen exchange. However, limitations such as poor mechanical strength, instability under stress, and lack of intrinsic antibacterial properties have limited their widespread application. In recent years, the incorporation of functionalized nanoparticles, such as silver nanoparticles (AgNPs), cellulose nanocrystals (CNC), and photodynamic nanoparticles (chloro-e6-carboxymethyl chitosan, Ce6/CMCS), has significantly enhanced the mechanical, biological, and antibacterial properties of PAM-based hydrogels. The nanoparticles contribute to improve structural integrity, increase strength, and enable controlled release of therapeutic agents, which accelerates wound healing process. This study systematically reviews the impact of various nanoparticles on the structural, mechanical, and functional performance of PAM hydrogels. Also, key mechanisms including controlled drug release, stimuli-responsive behavior, and enhanced wound healing are critically discussed. The findings suggest that PAM nanocomposites play an important role in the development of next-generation wound dressings and open new avenues for intelligent and targeted tissue regeneration therapies that have the potential for personalized medical applications.

Key Words

polyacrylamide,
nanocomposite,
wound dressing,
hydrogel,
nanoparticles

(*) To whom correspondence should be addressed.
E-mail: pedram_manafi@aut.ac.ir

کاربرد نانوکامپوزیت‌های پلی‌آکریل آمید در زخم‌پوش‌ها

فاطمه سپهوند، زینب ترابی و پدرام منافی*

ماهشهر، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، پردیس ماهشهر، گروه مهندسی پلیمر، صندوق پستی ۱۳۱۷۸-۶۳۵۱۷

دریافت: ۱۴۰۴/۲/۲۸، پذیرش: ۱۴۰۴/۸/۱۲

زخم‌های مزمن عفونی همچنان چالشی بزرگ در بازسازی بافت و مدیریت بالینی زخم‌ها هستند. زخم‌پوش‌های برپایه هیدروژل‌های هوشمند، به‌ویژه انواعی که در آن‌ها از پلی‌آکریل آمید (PAM) استفاده می‌شود، به دلیل ساختار سه‌بعدی، ظرفیت جذب آب زیاد، زیست‌سازگاری و قابلیت بالقوه بارگذاری دارو توجه زیادی را جلب کرده‌اند. این هیدروژل‌ها با حفظ رطوبت و آسان‌سازی تبادل مواد مغذی و اکسیژن، محیط بهینه‌ای را برای بهبود زخم ایجاد می‌کنند. با این حال، محدودیت‌هایی مانند استحکام مکانیکی ضعیف، ناپایداری زیر تنش و نداشتن خواص ضدباکتری ذاتی کاربرد گسترده آن‌ها را محدود کرده است. در سال‌های اخیر ادغام نانوذرات عامل‌دار، مانند نانوذرات نقره (AgNPs)، نانوبلورهای سلولوز (CNC) و نانوذرات نورپویا (کلر e6-کربوکسی‌متیل کیتوسان، Ce6/CMCS) به‌طور درخور توجهی خواص مکانیکی، زیستی و ضدباکتری هیدروژل‌های برپایه PAM را بهبود داده است. این نانوذرات به بهبود یکپارچگی ساختاری، افزایش استحکام و امکان رهاسازی کنترل‌شده عوامل درمانی کمک می‌کنند که روند بهبود زخم را شتاب می‌بخشد. در این مطالعه، کاربرد نانوکامپوزیت‌های پلی‌آکریل آمید در زخم‌پوش‌ها به‌طور جامع مرور می‌شود. همچنین، اثر نانوذرات مختلف نظیر نقره، نانوبلورهای سلولوزی و نانوذرات نورپویا بر خواص مکانیکی، زیستی و ضدباکتری هیدروژل‌های برپایه پلی‌آکریل آمید استفاده‌شده در زخم‌پوش‌ها، بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد، نانوکامپوزیت‌های PAM، نقش مهمی در توسعه زخم‌پوش‌های نسل آینده ایفا می‌کنند و افق‌های جدیدی را برای درمان‌های هدفمند و هوشمند بازسازی بافت به‌وجود می‌آورند که پتانسیل استفاده‌های پزشکی شخصی‌سازی‌شده را دارند.

چکیده



فاطمه سپهوند



زینب ترابی



پدرام منافی

واژگان کلیدی

پلی‌آکریل آمید،
نانوکامپوزیت،
زخم‌پوش،
هیدروژل،
نانوذرات

* مسئول مکاتبات، پیام‌نگار:

pedram_manafi@aut.ac.ir

مقدمه

زخم‌ها، به‌ویژه زخم‌های مزمن عفونی، از چالش‌های مهم و پیچیده در ترمیم بافت به‌شمار می‌روند. در حوزه زخم‌پوش‌ها، ابتدا باید به تفاوت کلیدی زخم‌های مزمن عفونی با سایر انواع زخم‌ها، به‌ویژه زخم‌های حاد، توجه شود. زخم‌های حاد، مانند بریدگی‌ها یا سوختگی‌های درجه یک، معمولاً در روند ترمیم طبیعی و سازمان‌یافته بهبود می‌یابند. در مقابل زخم‌های مزمن عفونی، مانند زخم پای دیابتی یا زخم‌های فشاری، اغلب به دلیل عوامل زمینه‌ای مانند بیماری‌های سامانمند، عفونت‌های پایدار و پاسخ التهابی طولانی‌مدت، وارد چرخه ترمیم ناموفق می‌شوند. از مهم‌ترین ویژگی‌های این زخم‌ها، تشکیل زیست‌فيلم‌های باکتریایی است که به مقاومت در برابر آنتی‌بیوتیک‌ها و سامانه ایمنی بدن منجر می‌شود. این شرایط، نیاز به زخم‌پوش‌هایی با ویژگی‌های درمانی خاص را افزایش می‌دهد که بتوانند به‌طور هم‌زمان عفونت را کنترل کرده و محیط مناسب برای ترمیم بافت را فراهم کنند [۱-۴]. شکل‌های ۱ و ۲، نمای بالینی به‌ترتیب از نوعی زخم مزمن عفونی و زخم سطحی را نشان می‌دهند.

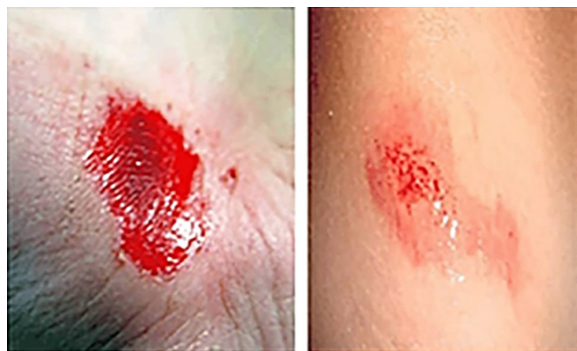
برای مقابله مؤثر با این چالش‌ها، زخم‌پوش‌ها باید چندمنظوره باشند. ویژگی‌های کلیدی آن‌ها شامل خاصیت ضدباکتری قوی، قابلیت جذب ترشحات، زیست‌سازگاری و قابلیت پاسخ‌دهی هوشمند به تغییرات محیطی زخم است [۵]. توسعه زخم‌پوش‌هایی که افزون‌بر ایجاد سد فیزیکی، قابلیت پاسخ‌گویی فعال به شرایط محیط زخم را داشته باشند، از اولویت‌های اساسی در مهندسی زیستی و داروسازی است. در این میان، هیدروژل‌ها به دلیل تورم‌پذیری و نگهداری حجم زیادی از آب در ساختار آن‌ها بدون حل‌پذیری، به‌عنوان بستر مناسبی برای زخم‌پوش‌های پیشرفته مطرح شده‌اند. در طول سال‌ها، نسل‌های جدیدی از این مواد با خواص بهبودیافته معرفی شده‌اند. هیدروژل‌های ابرمتخلخل (SPH) با ساختار متخلخل باز و به‌هم پیوسته، امکان جذب سریع و زیاد آب را فراهم

می‌کنند. در مقابل، پلیمرهای ابرجاذب (SAP) نیز قابلیت جذب آب زیادی دارند، اما سرعت تورم به‌اندازه ذرات آن‌ها وابسته است. این مواد به‌واسطه ساختار سه‌بعدی، قابلیت حفظ رطوبت و نفوذپذیری مناسب برای اکسیژن، جایگاه ویژه‌ای در زخم‌پوش‌ها یافته‌اند [۵-۱۱]. شکل ۳، طبقه‌بندی هیدروژل‌ها را نشان می‌دهد.

پلی‌آکریل‌آمید به‌عنوان یکی از کاربردی‌ترین پلیمرهای سنتزی در تولید هیدروژل‌ها، به دلیل ویژگی‌هایی چون ساختار شبکه‌ای منظم، توان زیاد جذب آب و زیست‌سازگاری مطلوب، به‌طور گسترده در حوزه‌های مختلف زیست‌پزشکی به‌کار گرفته شده است. هیدروژل‌های برپایه این پلیمر، به دلیل شباهت ساختاری به ماتریس برون‌یاخته‌ای (ECM)، به‌عنوان بسترهای مناسب برای حمایت از رشد یاخته‌ای، تبادل اکسیژن و مواد مغذی و ترمیم بافت مطرح شده‌اند [۱۲، ۱۳]. با این حال، محدودیت‌هایی چون ضعف خواص مکانیکی و نداشتن خاصیت ضدباکتری ذاتی کارایی این پلیمر را در کاربردهای پیشرفته محدود کرده است [۱۴، ۱۵]. در سال‌های اخیر، پژوهشگران به استفاده از نانوذرات به‌عنوان تقویت‌کننده‌های عامل‌دار در ساختار هیدروژل‌های پلی‌آکریل‌آمید توجه بسیاری داشته‌اند. استفاده از نانوذرات فلزی مانند نقره (AgNPs) [۱۷-۱۵]، نانوبلورهای سلولوزی (CNC) [۱۴] و نانوذرات نوروبیا (CMCS/Ce6) [۱۸] با برخورداری از ویژگی‌هایی چون نسبت سطح به حجم زیاد به بهبود هم‌زمان خواص مکانیکی، پایداری، زیست‌سازگاری و فعالیت ضدباکتری هیدروژل‌ها منجر شده‌اند. این مقاله با هدف بررسی جامع و انتقادی، اثر این نانوذرات را بر خواص مکانیکی، زیستی و ضدباکتری هیدروژل‌های پلی‌آکریل‌آمید و کاربردهای آن‌ها در حوزه زخم‌پوش‌ها را مرور می‌کند [۱۶، ۱۹].

انواع نانوذرات و اثر آن‌ها بر خواص پلی‌آکریل‌آمید

پلی‌آکریل‌آمید به‌عنوان پلیمر سنتزی پرکاربرد در زیست‌پزشکی،



شکل ۲- نمای بالینی از زخم سطحی [۲۲۲].

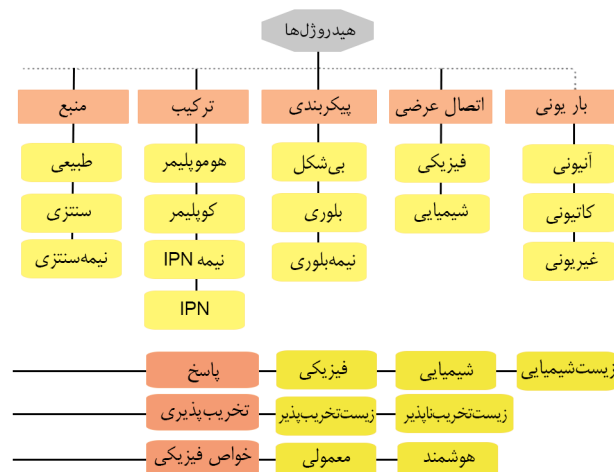


شکل ۱- نمای بالینی از زخم مزمن عفونی [۲۲۲].

آکریل‌آمید (AAM) روی Cs با نسبت‌های وزنی مختلف با استفاده از پرسولفات پتاسیم به‌عنوان آغازگر و N,N -متیلن بیس‌آکریل‌آمید به‌عنوان عامل اتصال عرضی تهیه شدند. سپس آب‌کافت شدند تا موادی با بیشترین خواص تورمی به‌دست آید. درنهایت، نانوذرات نقره با استفاده از نیترات نقره به‌عنوان پیش‌ساز و عصاره گیاه *Curcuma longa* به‌عنوان عوامل کاهنده و تثبیت‌کننده به‌طور زیستی سنتز و در داخل هیدروژل‌ها محبوس شدند. این مطالعه برپایه اصول سنتز سبز تلاش کرده است تا سامانه هیدروژلی مناسبی را برای کاربردهای زیست‌پزشکی، به‌ویژه در زمینه زخم‌پوش‌های ضدباکتری، ارائه کند.

نانوذرات نقره با میانگین اندازه ۲۱ nm تا ۲۶ nm به‌شکل کروی تولید شده و وجود آن‌ها با آزمون‌های طیف‌سنجی فرابنفش مرئی (UV-Vis) و زیرقرمز تبدیل فوریه (FTIR)، میکروسکوپی الکترونی عبوری (TEM)، پراش پرتو ایکس (XRD) و طیف‌سنجی پلاسمای جفت‌شده القایی (ICP) تأیید شد. این نانوکامپوزیت‌ها فعالیت ضدباکتری چشمگیری را در برابر باکتری‌های گرم منفی *Escherichia coli* کلی (کلی) و گرم مثبت *Staphylococcus aureu* نشان دادند. به‌طوری‌که نمونه‌های حاوی AgNPs توانستند تا ۹۹/۹۹٪ از رشد باکتری‌ها را مهار کنند. همچنین، افزایش مقدار نانوذرات نقره موجب تقویت خاصیت ضدباکتری و پایداری گرمایی سامانه شد، گرچه بر ظرفیت تورم و نگهداری آب اثر کاهشی داشت.

پایداری گرمایی هیدروژل‌های نانوساختاری نیز با تجزیه گرماوزن‌سنجی (TGA) بررسی شد. زیرا در طول آماده‌سازی، نگهداری و بازیافت مواد در کاربردهای زیستی نقش مهمی دارد [۱۵]. شکل ۴، گرمانگارهای هیدروژل‌های کیتوسان-g-پلی‌آکریل‌آمید (Cs-g-PAAM) آزاد و نمونه‌های نانوساختاری آن‌ها با بارگذاری بیشتر نانوذرات نقره را نشان می‌دهد. به‌طورکلی، نمونه‌ها دو مرحله تجزیه گرمایی را نشان می‌دهند. مرحله اول، که از حدود ۲۲۰ °C تا ۲۹۸ °C گسترده می‌شود، به‌دلیل ازدست رفتن وزن گروه‌های آمیدی و پیونددهنده‌هاست. مرحله دوم، که از حدود ۲۹۸ °C آغاز می‌شود و تا حدود ۵۰۰ °C ادامه می‌یابد، به‌دلیل تجزیه و شکست زنجیر اصلی پلی‌آکریل‌آمید و کیتوسان رخ می‌دهد. این یافته‌ها نشان می‌دهد، این هیدروژل‌ها تا دمای حدود ۲۹۸ °C، پایداری گرمایی درخور توجهی را نشان می‌دهند. بنابراین می‌توان انتظار داشت، این مواد هیدروژلی در کاربردهای زیست‌شناسی تا دمای ۱۸۰ °C در مدت زمان مناسب و در شرایط خاص قابل استفاده باشند [۸، ۱۵].



شکل ۳- طبقه‌بندی هیدروژل‌ها [۹۹].

به‌ویژه در طراحی زخم‌پوش‌های هوشمند، به‌واسطه ویژگی‌هایی مانند تورم‌پذیری زیاد، زیست‌سازگاری و فرایندپذیری مناسب شناخته شده است. بااین‌حال، همان‌طور که در مقدمه اشاره شد، ضعف در خواص مکانیکی و عملکردهای زیستی آن، نیاز به اصلاح ساختاری را الزامی می‌سازد. مطالعات متعدد نشان داده‌اند، افزودن نانوذرات به ماتریس پلی‌آکریل‌آمید می‌تواند موجب بهبود چشمگیر خواص مکانیکی، ضدباکتری، گرمایی و پاسخ‌دهی به محرک‌های محیطی شود [۱۲، ۱۴، ۱۶، ۱۹]. نانوذرات مختلفی از جمله:

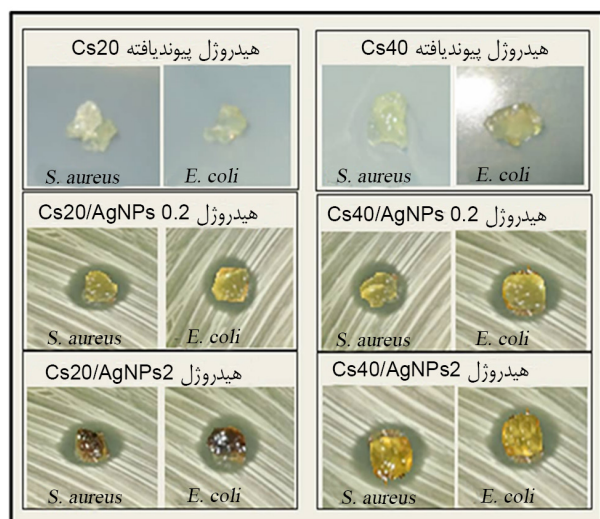
- نانوذرات فلزی (مانند نانوذرات مس) که به‌دلیل خواص ضدباکتری قوی و قابلیت مقابله با عفونت‌های مقاوم به آنتی‌بیوتیک مورد توجه هستند [۲۰].

- نانوذرات سرامیکی (مانند نانوذرات روی اکسید و گرافن اکسید) که به‌خاطر پایداری زیاد، نقش در بازسازی بافت و تقویت خواص مکانیکی شناخته شده‌اند [۱۶، ۲۱].

در این بخش، سه نانوذره کلیدی نانوذرات نقره (AgNPs)، نانوبلورهای سلولوزی (CNC) و نانوذرات نورپویا و اثر آن‌ها بر عملکرد هیدروژل‌های PAM معرفی می‌شوند که در حوزه زخم‌پوش‌ها از اهمیت بیشتری برخوردارند [۱۷-۱۹].

نانوذرات نقره (AgNPs)

در پژوهشی [۱۵]، توسعه نانوکامپوزیت‌های هیدروژلی زیست‌سازگار با قابلیت ضدباکتری برجسته با بهره‌گیری از کیتوسان (Cs) و PAM به‌عنوان ماتریس‌های پلیمری و نانوذرات نقره (AgNPs) سنتز شده با روش سبز با استفاده از عصاره گیاه زردچوبه با نام علمی *Curcuma longa*، بررسی شد. در این روش، ابتدا هیدروژل‌ها از طریق کوپلیمر شدن پیوندی و اتصال عرضی



شکل ۵- ارزیابی فعالیت ضدباکتری هیدروژل‌های کیتوسان-g- پلی‌آکریل‌آمید آزاد (Cs20 و Cs40) و نانوسازه‌های آن‌ها در برابر باکتری‌های استافیلوکوکوس اورئوس و اشرشیا کلی [۴۴].

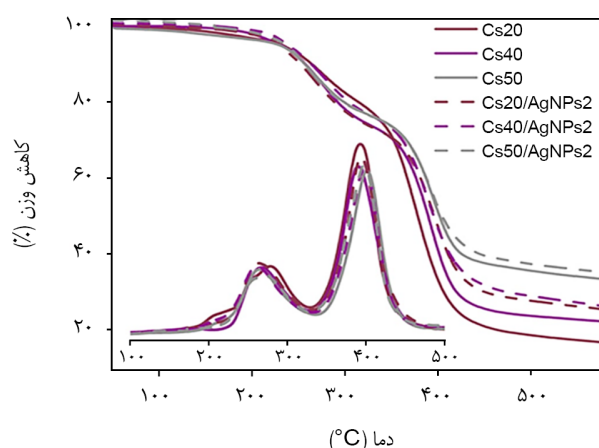
نمونه‌های هیدروژل پس از ۲۴ h تماس است. به‌خوبی مشخص شده است، فعالیت ضدباکتری برای مقادیر کاهش لگاریتمی بیش از ۳ زیاد (اثر باکتری‌کشی)، بین ۱ و ۳ متوسط (اثر باکتری‌ایستاد) و کمتر از ۱ کم در نظر گرفته می‌شود [۹،۱۰].

جدول ۱، نتایج مربوط به رشد یاخته‌های باکتری در تعلیق‌های باکتری استافیلوکوکوس اورئوس (1×10^8 CFU/mL) و باکتری اشرشیا کلی (1×10^8 CFU/mL) را هنگام مواجهه با هیدروژل‌های آزاد و حاوی (AgNP)، تجزیه و تحلیل می‌کند. یافته‌های زیر در زمینه زنده‌مانی باکتری‌ها، تأییدی بر این نکته است:

- همان‌طور که پیش‌بینی می‌شد، هیدروژل ساده PAAm، هیچ‌گونه فعالیت ضد میکروبی نشان نمی‌دهد، بنابراین باکتری‌ها در این شرایط به تکثیر ادامه می‌دهند.

- تمام هیدروژل‌های بدون AgNP صرف‌نظر از مقدار Cs، فعالیت ضدباکتری درخور توجهی را نشان می‌دهند. این پدیده احتمالاً به دلیل شرایط دینامیکی تماس است که در آن، نمونه‌ها طی گرم‌خانه‌گذاری با سرعت ۱۶۰ rpm/min به مدت ۲۴ h هم‌می‌خورند و فعالیت ضد میکروبی نمونه به تماس مستقیم ریزاندامگان با عامل فعال بستگی دارد. با این حال، کاهش لگاریتمی در رشد یاخته‌های باکتری در محدوده ۰/۲ تا ۰/۳ مشاهده می‌شود.

- تمام نانوکامپوزیت‌های هیدروژل AgNP در مقایسه با هیدروژل‌های مشابه دارای AgNP آزاد، فعالیت‌های ضدباکتری چشمگیری را در برابر هر دو نوع باکتری نشان می‌دهند. این موضوع



شکل ۴- دمانگشت‌های TG و d(TG) هیدروژل‌های Cs-g-PAAm و نانوکامپوزیت‌های آن‌ها [۴۴].

به‌منظور بررسی فعالیت ضدباکتری نانوکامپوزیت‌ها که می‌تواند به‌طور انحصاری ناشی از ذرات نانوقره باشد، در این مطالعه تمام نمونه‌های هیدروژل در محیط خشتی با استفاده از آب یون‌زدوده متورم شدند و در ابتدا تحت روش کیفی صفحه-نفوذ قرار گرفتند. همان‌طور که انتظار می‌رفت در شکل ۵، هیچ فعالیتی علیه هر دو باکتری برای هیدروژل‌های حاوی نانوذرات نقره آزاد مشاهده نشد. درحالی‌که نواحی مهار رشد در اطراف سایر نمونه‌های حاوی نانوذرات نقره، بدون تفاوت اساسی بین آن‌ها، مشهود بود. این نتیجه نشان می‌دهد، فعالیت ضدباکتری عمدتاً به نانوذرات نقره نسبت داده می‌شود و نه صرفاً به شبکه‌ای که به‌عنوان حامل پایدار برای ذرات نانوقره عمل می‌کند. افزون‌براین، روش کمی بالن تکانشی پویا (dynamic shake flask) برای تعیین فعالیت ضدباکتری نمونه‌های هیدروژل انجام شد. شبکه ساده PAAm بدون ترکیب Cs نیز برای بررسی اثر ضد میکروب ذاتی کیتوسان در شبکه‌های کیتوسان-g-پلی‌آکریل‌آمید دارای نانوذرات نقره آزاد آزمایش شد. فعالیت باکتری و نسبت کاهش باکتری (R%) با استفاده از معادله‌های (۱) و (۲) محاسبه شد:

$$\text{Bactericidal activity} = \log(\text{CFU}_0) - \log(\text{CFU}_{24}) \quad (1)$$

$$R(\%) = \frac{(\text{CFU}_0)_{24} - (\text{CFU}_C)_{24}}{(\text{CFU}_C)_{24}} \times 100 \quad (2)$$

در اینجا، (CFU_0) و $(\text{CFU}_C)_{24}$ به‌ترتیب نشانگر تعداد باکتری‌های زنده در نمونه شاهد در زمان‌های تماس ۰ و ۲۴ h هستند. درحالی‌که $(\text{CFU}_H)_{24}$ نماد تعداد باکتری‌های زنده‌مانده در

جدول ۱- ارزیابی کمی فعالیت ضدباکتری هیدروژل‌های Cs-g-PAAm آزاد و نانوکامپوزیت‌های متناظر Cs-g-PAAm/AgNP.

نمونه	شمارش باکتری (CFU/mL)		فعالیت باکتری کشی (کاهش لگاریتمی)		کاهش باکتری، R (%)	
	<i>E. coil</i>	<i>S. aureus</i>	<i>E. coil</i>	<i>S. aureus</i>	<i>E. coil</i>	<i>S. aureus</i>
شاهد (لکه)	$2/50 \times 10^8$	$2/70 \times 10^8$	-	-	-	-
PAAm	$2/64 \times 10^7$	$3/20 \times 10^8$	-	-	-	-
Cs20	$5/72 \times 10^4$	$6/40 \times 10^7$	$0/252$	$0/215$	$77/120$	$76/300$
Cs20/AgNPs0.2	$2/20 \times 10^4$	$3/20 \times 10^4$	$3/666$	$3/516$	$99/991$	$99/998$
Cs20/AgNPs2	$4/27 \times 10^3$	$8/70 \times 10^3$	$4/380$	$4/083$	$99/998$	$99/996$
Cs40	$4/60 \times 10^7$	$5/36 \times 10^7$	$0/345$	$0/300$	$81/620$	$80/141$
Cs40/AgNPs0.2	$2/20 \times 10^6$	$2/80 \times 10^6$	$1/666$	$1/574$	$99/120$	$98/963$
Cs40/AgNPs2	$1/62 \times 10^4$	$1/00 \times 10^5$	$3/126$	$3/021$	$99/969$	$99/962$
Cs50	$4/80 \times 10^7$	$5/72 \times 10^7$	$0/327$	$0/265$	$80/800$	$78/888$
Cs50/AgNPs0.2	$7/50 \times 10^6$	$8/30 \times 10^6$	$1/133$	$1/104$	$97/200$	$96/924$
Cs50/AgNPs2	$3/20 \times 10^6$	$4/00 \times 10^6$	$1/503$	$1/420$	$98/740$	$98/518$

نانوکامپوزیت‌های تولیدشده می‌تواند تحت تأثیر اندازه AgNP‌ها نیز قرار گیرد. به‌طوری‌که نانوذرات کوچک‌تر با سطح ویژه قابلیت نفوذ به غشای یاخته را بیشتر افزایش داده و اثر باکتری‌کشی بیشتری نسبت به نانوذرات بزرگ‌تر نشان می‌دهند [۲۲، ۲۳].

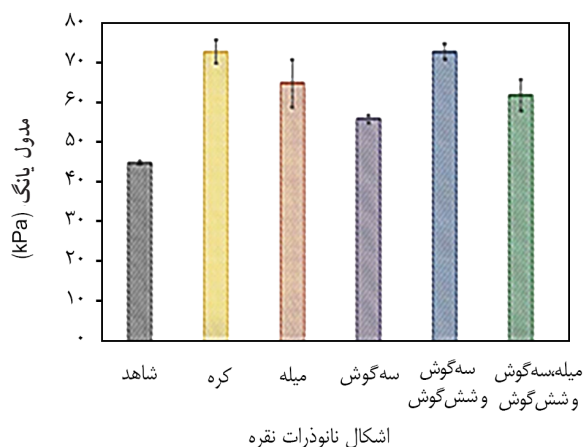
هیدروژل‌ها به‌واسطه داشتن ساختار متخلخل، قابلیت زیادی در جذب محلول‌ها، داروها و نانومواد دارند. ترکیب آن‌ها با نانوذرات فلزی به توسعه سامانه‌های هوشمندی منجر شده است که خاصیت مکانیکی تقویت‌شده و ویژگی‌های ضد میکروب مؤثر دارند. نانوذرات نقره به دلیل نسبت سطح به حجم زیاد، قابلیت بالقوه ضدباکتری زیاد را نشان داده‌اند [۲۴]. در مطالعه دیگری [۱۱]، نانوذرات نقره با شکل‌های مختلف مانند کروی، میله‌ای و سه‌گوش از طریق کاهش شیمیایی و با تنظیم میزان کاهنده سنتز شدند. سپس این نانوذرات به کمک روش جذب چرخه‌ای موسوم به تنفس-دم در ماتریس هیدروژل پلی‌آکریل‌آمید-n-متیلن‌بیس‌آکریل‌آمید (PAA-MBA) قرار داده شدند. ویژگی‌های مکانیکی هیدروژل‌های ترکیبی با استفاده از آزمون‌های رئولوژی، مدول‌های ذخیره و یانگ و میکروسکوپی نیروی اتمی (AFM) ارزیابی شد.

مطابق شکل ۶الف، هیدروژل شاهد (بدون نانوذرات نقره) کمترین مقدار مدول ذخیره‌سازی ($2 \pm 0/14$ kPa) را نشان داد. درحالی‌که هیدروژل‌های حاوی نانوذرات نقره مقادیر بیشتری ۴ تا ۵ kPa ($0 \pm 1 - 0/38$) داشتند. این نتایج نشانگر افزایش استحکام مکانیکی هیدروژل پلی‌آکریل‌آمید-n-متیلن‌بیس‌آکریل‌آمید با افزودن نانوذرات نقره بدون وابستگی درخور توجه به شکل

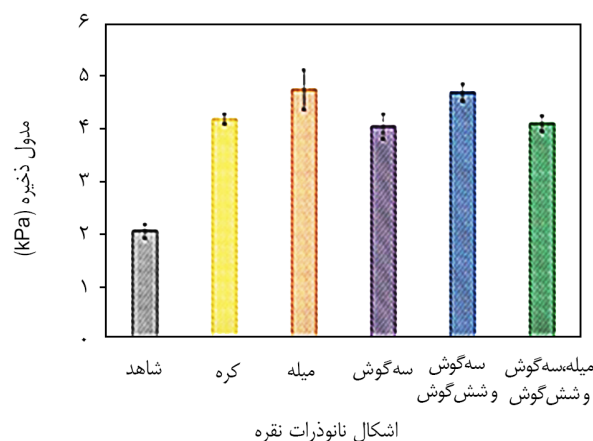
به دلیل به دام افتادن نانوذرات درون شبکه‌های ماتریسی است. با افزایش بارگذاری نانوذرات نقره، فعالیت ضدباکتری افزایش می‌یابد و به کاهش لگاریتمی بیش از ۱ می‌رسد. بارزترین اثر ضدباکتری در مجاورت غالب Cs20 بارگذاری‌شده با AgNP مشاهده می‌شود که با کاهش $4 - \log$ در رشد هر دو ریزاندامگان و نسبت کشتار $99/99\%$ همراه است. این نتایج نشان می‌دهد، AgNP‌های محبوس‌شده می‌توانند به‌طور شایان ملاحظه‌ای کارایی ضدباکتری هیدروژل‌های Cs-g-PAAm را ارتقا دهند و درنهایت به تولید نانوکامپوزیت‌هایی با آثار باکتری‌کشی یا باکتری‌ایستاد منجر شوند.

کاهش حساسیت هیدروژل‌ها نسبت به باکتری استافیلوکوکوس اورئوس (گرم مثبت) در مقایسه با باکتری اشرشیا کلی (گرم منفی) مشاهده می‌شود. این امر احتمالاً به ساختار اختصاصی دیواره یاخته‌ای اشرشیا کلی مربوط می‌شود که شامل یک لایه اضافی از پپتیدوگلیکان است که عمدتاً از مولکول‌های لیپوپلی‌ساکارید متراکم تشکیل شده است. این ساختار ممکن است از رسیدن اجزای فعال به غشای سیتوپلاسمی جلوگیری کند [۱۱].

اگرچه سازوکار دقیق فعالیت ضدباکتری نانوذرات نقره به‌طور کامل شناخته نشده است، اما مطالعات نشان می‌دهد، AgNP‌ها یا یون‌های نقره‌ای آزادشده در اثر اکسایش تدریجی نانوذرات می‌توانند نفوذپذیری غشا را افزایش دهند و از این طریق به داخل یاخته‌ها نفوذ کنند. این امر به برهم‌کنش با دیواره پپتیدوگلیکان و غشای سیتوپلاسمی منجر می‌شود و به‌طور مستقیم به تخریب غشای یاخته می‌انجامد. شایان توجه است، فعالیت ضدباکتری



(ب)



(الف)

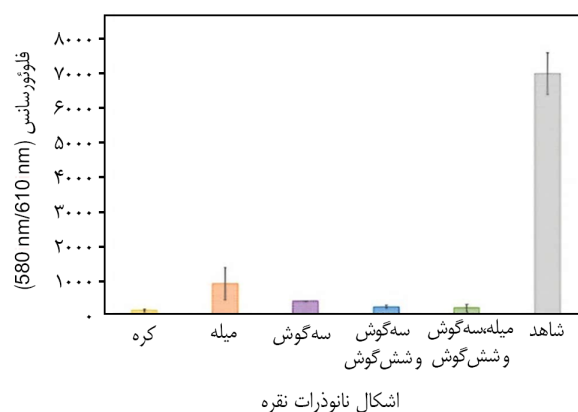
شکل ۶- استحکام مکانیکی ژل‌های هیدروژلی پلی آکریل آمید-n-متیلن بیس آکریل آمید با داربست نانوذرات نقره با اشکال مختلف: (الف) مشخصه‌سازی رئولوژیکی و (ب) مقایسه مدول‌های یانگ براساس مطالعات تصویربرداری کمی AFM. تمام نوارهای خطا نشانگر انحراف معیار سه‌بار اندازه‌گیری (n=3) هستند [۱۷].

درحالی‌که نمونه‌های بدون این نانوذرات رشد درخور توجهی از کلونی‌های باکتری را نشان دادند. میان اشکال مختلف، نانوذرات سه‌گوش و کروی عملکرد ضدباکتری قوی‌تری نشان دادند و نانوذرات میله‌ای کمترین اثر را داشتند. این مسئله به‌احتمال زیاد ناشی از تفاوت در سطح تماس مؤثر و قابلیت نفوذ نانوذرات به دیواره یاخته‌ای باکتری‌هاست.

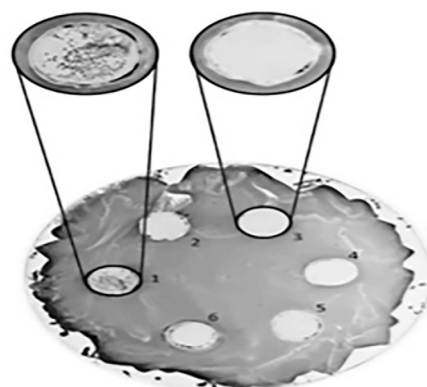
شکل ۷الف، تصویر فلئورسان پس از کشت باکتری اشرشیا کلی mCherry روی پلیت آگار حاوی هیدروژل‌های با اشکال مختلف AgNPs را نشان می‌دهد. این باکتری نوعی اشرشیا کلی بوده که به‌طور ژنتیکی با پروتئین فلئورسان قرمز رنگ (mCherry) اصلاح

آن‌هاست. در شکل ۶ب برای ارزیابی مدول یانگ (E)، که رابطه تنش-کرنش را توصیف می‌کند، از AFM استفاده شد. نتایج نشان داد، مدول یانگ برای هیدروژل‌های حاوی نانوذرات نقره بیشتر از هیدروژل‌های کنترل است. این افزایش استحکام مکانیکی می‌تواند به‌دلیل برهم‌کنش‌های غیرکووالانسی نانوذرات نقره و زنجیرهای هیدروژل باشد که موجب تقویت شبکه هیدروژل و افزایش مدول کشسانی می‌شود [۱۷].

در بخش دیگری از مطالعه، عملکرد ضدباکتری هیدروژل‌ها در برابر باکتری اشرشیا کلی بررسی شد. نتایج نشان داد، تمام نمونه‌های دوپه‌شده با نانوذرات نقره مانع رشد باکتری شدند.



(ب)



(الف)

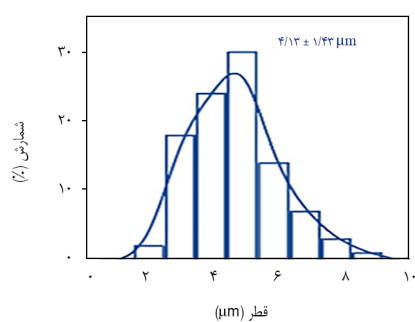
شکل ۷- (الف) تصویر پلیت آگار حاوی خط کشی شده با باکتری *E. coli mCherry* و هیدروژل PAA-MBA: (۱) ژل شاهد (بدون AgNP) و حاوی AgNP‌های مختلف (۲) کروی، (۳) میله‌ای، (۴) مخلوطی از میله‌ای، سه‌گوش و شش‌گوش، (۵) سه‌گوش و شش‌گوش و (۶) سه‌گوش، (ب) نمودار رشد باکتری *E. coli mCherry* بر هیدروژل PAM-MBA حاوی AgNP با استفاده از فلئورسان [۴۴۴].

شده است. مشاهده می‌شود، تنها نمونه‌های شاهد (بدون نانوذرات نقره) رشد کلونی‌های باکتری اشرشیا کلی را روی هیدروژل‌ها نشان دادند، درحالی‌که پنج هیدروژل دیگر حاوی نانوذرات نقره، هیچ رشد کلونی قابل تشخیصی را نشان ندادند. برای بررسی بیشتر اثر ضدباکتری، نمونه‌های مشابه در دستگاه میکروپلیت‌خوان فلوتورسان قرار داده شدند. همان‌طور که در شکل ۷ ب دیده می‌شود، هیدروژل شاهد در مقایسه با سایر هیدروژل‌های دارای نانوذرات نقره، شدت فلوتورسان بسیار بیشتری را نشان داده است. نانوذرات نقره میله‌ای شکل، شدت کمی بیشتری را نسبت به سایر انواع نانوذرات نقره نشان دادند [۱۷].

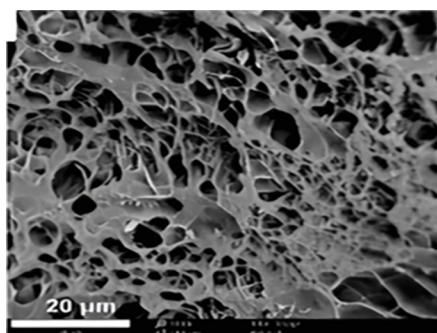
نانوذرات نورپویا (Ce6/CMCS)

زخم‌های مزمن عفونی، به‌ویژه در بیماران مبتلا به دیابت یا نقص ایمنی، یکی از چالش‌های عمده در مراقبت‌های بالینی محسوب می‌شوند. افزایش مقاومت باکتری‌ها به آنتی‌بیوتیک‌ها، اثربخشی این داروها را به‌شدت محدود کرده و ضرورت ارائه راهکارهای درمانی نوین را پررنگ‌تر ساخته است. در سال‌های اخیر، درمان نورپویا به‌عنوان روشی غیرتهاجمی، ایمن و مؤثر در نابودی ریزاندامگان بدون آسیب به بافت‌های سالم، مورد توجه فراوانی قرار گرفته است [۲۴].

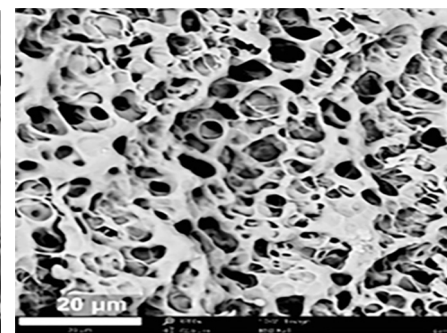
در مطالعه‌ای نوین [۱۸]، سامانه هیدروژلی طراحی شده که با بهره‌گیری از نانوذرات نورپویای خودهم‌گذاری، قابلیت مقابله با عفونت‌های باکتریایی و تسریع روند ترمیم زخم را به‌طور هم‌زمان داراست. این سامانه شامل ترکیب PAM، نانوذرات خودهم‌گذاری شده CMCS/Ce6 و یون‌های Mg^{2+} است. نانوذرات CMCS/Ce6 از طریق خودهم‌گذاری، به‌واسطه تعاملات الکتروستاتیکی و آب‌گریز بین Ce6 و نانوذره CMCS شکل گرفته‌اند. نانوذره CMCS به‌دلیل دارا بودن بار مثبت، اتصال قوی به غشای باکتری‌های گرم مثبت و گرم منفی را ممکن می‌سازد. فوتوسنسایزر Ce6 نیز در حضور نور قرمز با طول موج ۶۶۰ nm فعال شده با انتقال انرژی به مولکول‌های اکسیژن محیط، مقادیر زیادی اکسیژن منفرد را تولید می‌کند که به مرگ باکتری منجر می‌شود. به‌علاوه یون منیزیم موجود در سامانه، افزون‌بر تقویت پیوندهای یونی در ساختار هیدروژل، در تحریک رشد یاخته‌های پوست و سنتز کلاژن نیز نقش مؤثری دارد. نتایج حاصل از بررسی‌های ریزساختار هیدروژل‌ها با استفاده از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) نمونه‌های فریز خشک‌شده نشان داد که افزودن نانوذرات و یون Mg^{2+} به ساختار هیدروژل موجب افزایش تراکم اتصال‌های عرضی شده است (شکل‌های ۸ الف و ب). به‌طور خاص، نتایج



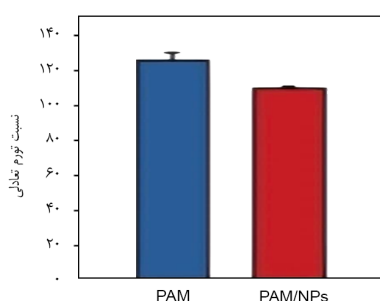
(پ)



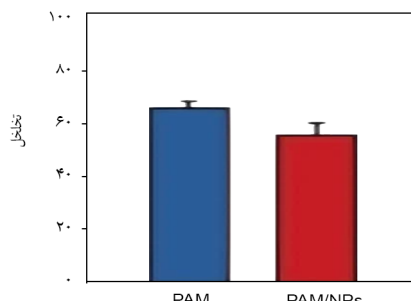
(ب)



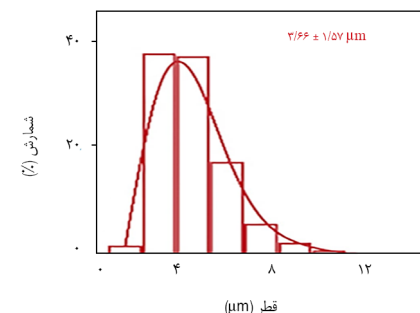
(الف)



(ج)



(ث)



(ت)

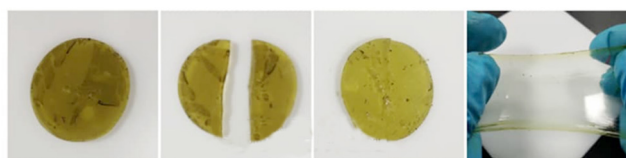
شکل ۸- تصاویر SEM از: (الف) هیدروژل‌های PAM، (ب) PAM/NP و توزیع اندازه منافذ در هیدروژل‌های (پ) PAM، (ت) پلی‌آکریل‌آمید- نانوذرات، (ث) تخلخل هیدروژل‌ها و (ج) نسبت تورم تعادلی هیدروژل [۱۸].

حاصل از تحلیل تصاویر SEM نشان داد که میانگین اندازه منافذ در هیدروژل PAM برابر با $4/13 \mu\text{m}$ و در نمونه PAM/NP معادل $3/66 \mu\text{m}$ بوده است (شکل‌های ۸ پ و ت). به دنبال کاهش اندازه منافذ، تخلخل ساختاری در نمونه PAM/NP نیز کاهش می‌یابد که در نمودار (شکل ۸ ث) به وضوح دیده می‌شود. این تغییرات ساختاری به کاهش نسبت تورم تعادلی (equilibrium swelling ratio) از ۱۲۵٪ در نمونه PAM به ۱۰۸٪ در نمونه PAM/NP منجر شده است (شکل ۸ ج). با این حال، لازم به ذکر است که تمام هیدروژل‌ها دارای نسبت تورم بیش از ۱۰۰٪ بوده‌اند که نشانگر قابلیت زیاد آن‌ها در جذب سریع مایعات و ترشحات زخم بوده و آن‌ها را برای کاربرد به عنوان زخم‌پوش مناسب و مؤثر معرفی می‌کند [۱۸].

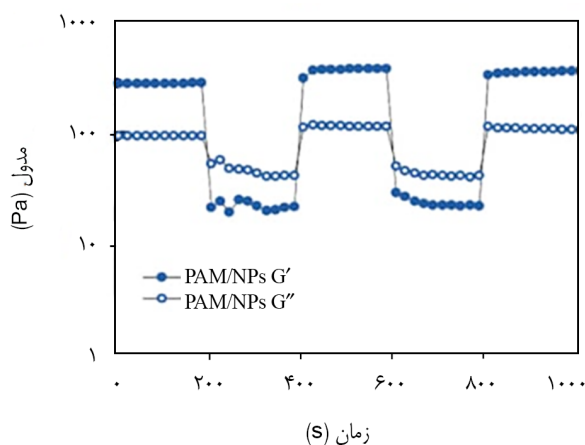
هیدروژل‌های دارای ویژگی خودترمیمی می‌توانند به طور چشم‌گیری طول عمر زخم‌پوش‌ها را افزایش دهند. در این مطالعه، قابلیت خودترمیمی هیدروژل پلی‌آکریل‌آمید-نانوذرات بدون استفاده از هیچ‌گونه افزودنی و صرفاً از طریق مشاهدات عینی ارزیابی شد (شکل ۹ الف). نمونه‌های بریده‌شده از هیدروژل پس از تماس به مدت ۲ h، دوباره به یکدیگر پیوسته و شکل اولیه خود را بازیابی کردند. همچنین هیدروژل ترمیم‌شده کشش‌پذیری مناسبی بدون ایجاد ترک یا شکست را نشان داد که بیانگر ترمیم طبیعی

بدون نیاز به اعمال نیروی خارجی بود. این رفتار خودترمیمی عمدتاً به بازآرایی پیوندهای هیدروژنی نسبت داده می‌شود، فرایندی که به وسیله نفوذ متقابل زنجیرهای آزاد پلی‌آکریل‌آمید در محل برش آسان می‌شود.

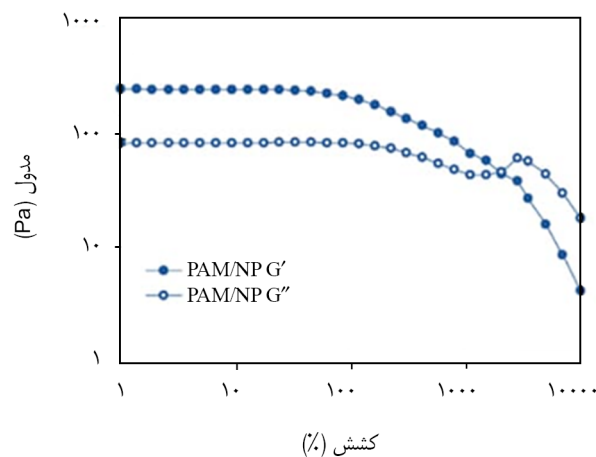
به منظور بررسی کمی‌تر این پدیده، آزمون رئولوژیکی نیز روی نمونه‌ها انجام شد. مطابق با داده‌های به دست آمده از آزمون، دامنه کرنش (شکل ۹ ب)، مقادیر مدول‌های ذخیره (G') و اتلاف (G'') در سطوح کرنش زیاد (کمتر از ۲۰۰٪) تقریباً موازی بودند که نشانگر قابلیت زیاد هیدروژل در تحمل تغییر شکل‌های گسترده است. نقطه تلاقی این دو مدول در حدود کرنش ۲۰۰٪ تعیین شد که به عنوان مرز انتقال از حالت جامد به مایع در شبکه هیدروژلی محسوب می‌شود. افزون‌براین، آزمون جاروب کرنش مرحله‌ای (step-strain sweep) نیز به منظور بررسی برگشت‌پذیری شبکه پلیمری انجام شد (شکل ۹ پ). با اعمال کرنش ۳۰۰٪، مقدار G' به شدت کاهش یافت و از مقدار G'' کمتر شد که حاکی از تخریب شبکه پلیمری و از بین رفتن اتصالات عرضی در ساختار هیدروژل بود. اما بلافاصله پس از کاهش کرنش به ۱۰٪، مقدار G' به سطح اولیه خود بازگشت ($G' > G''$) که این موضوع بازسازی ساختار هیدروژلی را تأیید می‌کند. این رفتار برگشت‌پذیر حتی در تکرار متوالی این دو مرحله نیز مشاهده شد [۱۸].



(الف)



(ب)



(ب)

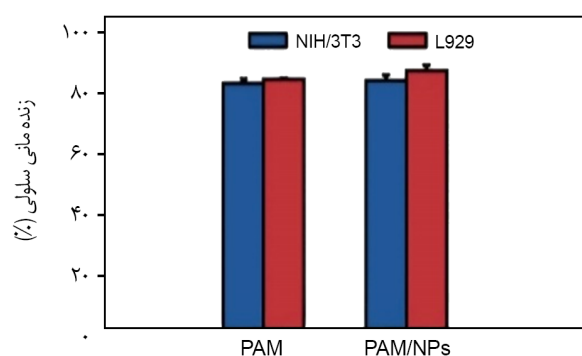
شکل ۹- خواص خودترمیمی هیدروژل PAM/NP: (الف) عکس‌هایی از فرایند خودترمیمی با هیدروژل قرصی شکل و داده‌های رئولوژیکی هیدروژل با (ب) آزمون دامنه کرنش ۱٪ تا ۱۰۳٪ در بسامد ۱ Hz و (پ) تعویض متناوب مرحله‌ای کرنش از کرنش کم به زیاد.

عمل‌آوری شده با هیدروژل به‌طور محسوسی بیش از گروه شاهد بوده است. ارزیابی نیمه‌کمی سطح خراش باقی‌مانده (شکل ۱۰ا) نیز این یافته‌ها را تأیید کرد، به‌طوری‌که تفاوت‌های آماری معنی‌داری بین گروه‌ها مشاهده شد ($p < 0/05$ و $p < 0/01$) [۱۸].

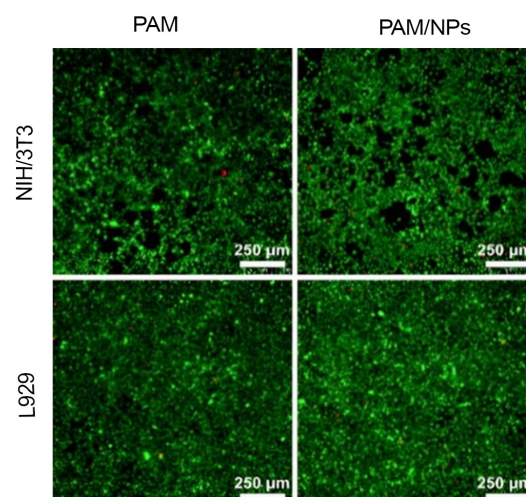
نانوبلورهای سلولوز (CNC)

مطابق با پژوهش انجام‌گرفته [۱۹]، افزودن نانوبلورهای سلولوز (CNC) به ساختار هیدروژل‌های PAM موجب بهبود درخور توجهی در ویژگی‌های فیزیکی، مکانیکی و تورمی این مواد شده است. CNC به‌عنوان نانوذرات زیست‌سازگار و زیست‌تخریب‌پذیر از طریق فرایند آب‌کافت اسیدی الیاف سلولوز تولید شده و به‌علت دارا بودن مدول کشسانی و سطح ویژه زیاد و رفتار بلورمایی به‌عنوان عامل تقویت‌کننده در شبکه‌های پلیمری PAM استفاده

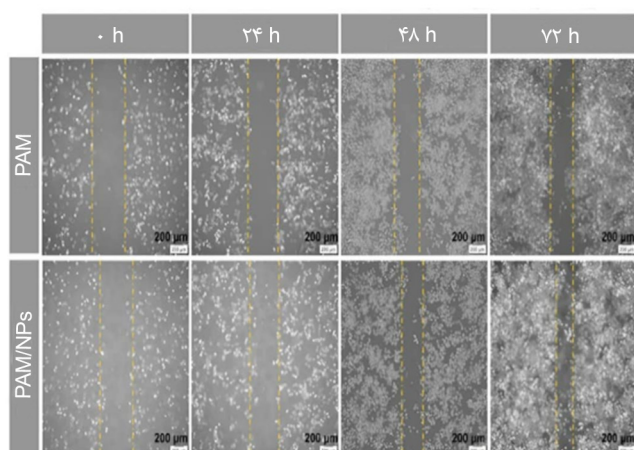
به‌منظور ارزیابی زیست‌سازگاری هیدروژل‌های طراحی شده و بررسی قابلیت آن‌ها در بهبود زخم در شرایط برون‌تنی، آزمون‌های متعددی انجام گرفت. ابتدا آزمون رنگ‌آمیزی زنده-مرده روی رده‌های یاخته‌ای فیروبلاست موش، NIH/3T3 و L929 انجام شد. نتایج نشان داد، درصد زیادی از یاخته‌ها پس از دو روز تماس با هیدروژل‌ها زنده باقی‌مانده‌اند (شکل ۱۰الف) که این موضوع حاکی از زیست‌سازگاری مناسب ترکیبات استفاده شده است. همچنین آزمون رنگ‌سنجی حیات یاخته‌ای (MTT) برای بررسی زنده‌مانی یاخته‌ها نیز بیانگر عدم سمیت شایان توجه یاخته‌ای در اثر مواجهه با هیدروژل‌ها بود (شکل ۱۰ب). به‌منظور بررسی توان ترمیمی هیدروژل‌ها، از آزمون خراش یاخته‌ای (cell scratch assay, CSA) استفاده شد. تصاویر ثبت‌شده از فرایند ترمیم خراش در کشت یاخته‌ای (شکل ۱۰پ) نشان داد، میزان مهاجرت یاخته‌ها در گروه‌های



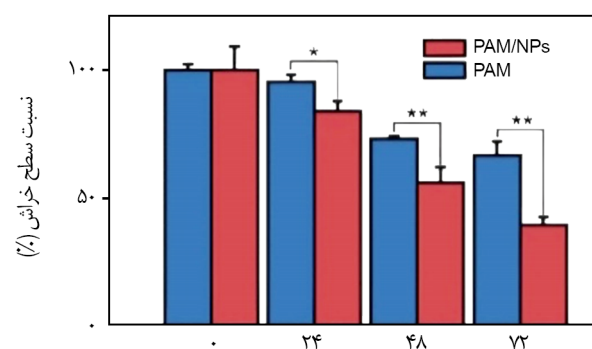
(ب)



(الف)



(ت)



(پ)

شکل ۱۰- ارزیابی زیست‌سازگاری و ترمیم زخم هیدروژل‌ها در شرایط برون‌تنی: (الف) آزمون رنگ‌آمیزی زنده-مرده یاخته‌های فیروبلاست موش، (ب) نتایج آزمون رنگ‌سنجی برای بررسی زنده‌مانی یاخته‌ها، (پ) تصاویر آزمون خراش یاخته‌ای و (ت) ارزیابی نیمه‌کمی سطح خراش باقی‌مانده.

در تجاری‌سازی این محصولات به‌شمار می‌رود. فرایندهای پیچیده ساخت، کنترل دقیق کیفیت برای تضمین یکنواختی محصول و همچنین هزینه زیاد مواد اولیه و فناوری‌های پیشرفته باعث می‌شود تا این محصولات در مقایسه با زخم‌پوش‌های سنتی، از لحاظ اقتصادی کمتر مقرون‌به‌صرفه باشند [۲۶].

چالش‌های بالینی و نظارتی

عدم وجود داده‌های بالینی کافی و جامع درباره اثربخشی و ایمنی زخم‌پوش‌های نانوکامپوزیتی در انسان، چالش بزرگی است. اغلب مطالعات موجود در مراحل آزمایشگاهی یا حیوانی انجام شده‌اند. افزون‌براین، مقررات و دستورکارهای نظارتی برای تأیید و طبقه‌بندی این محصولات نوآورانه در بسیاری از کشورها هنوز به‌طور کامل تدوین نشده است. این موضوع فرایند ورود به بازار را کند و پیچیده می‌سازد. به‌عنوان مثال، سازمان غذا و داروی آمریکا (FDA) به‌تازگی پیشنهادهایی برای طبقه‌بندی مجدد برخی از این محصولات ارائه کرده است [۲۵، ۲۶].

چشم‌اندازهای پژوهشی آینده

در راستای پاسخ به این چالش‌ها و ترسیم مسیر پژوهش‌های آینده، پیشنهاد می‌شود مطالعات بعدی درباره سایر نانوذراتی متمرکز شود که قابلیت بالقوه زیادی در ترکیب با ماتریس پلی‌آکریل‌آمید را دارند. این نانوذرات شامل موارد زیر هستند:

- نانوذرات روی اکسید (ZnO NPs): این نانوذرات به‌دلیل خواص ضد میکروب گسترده، زیست‌سازگاری و نقش آن‌ها در تحریک بازسازی بافت، مورد توجه قرار گرفته‌اند. نانوکامپوزیت‌های پلی‌آکریل‌آمید حاوی ZnO NPs می‌توانند با تولید گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) و آزادسازی یون‌های روی، به‌طور مؤثر با عفونت‌های باکتریایی مبارزه کرده و درعین‌حال به ترمیم زخم کمک کنند [۱۶].

- نانوذرات گرافن اکسید (GO NPs): گرافن اکسید به‌دلیل داشتن سطح مقطع زیاد، گروه‌های عاملی اکسیژن‌دار و خواص مکانیکی و گرمایی عالی، می‌تواند به‌عنوان تقویت‌کننده قوی در ماتریس پلی‌آکریل‌آمید عمل کند. استفاده از نانوذرات اکسید گرافن می‌تواند استحکام مکانیکی، پایداری گرمایی و خاصیت ضدباکتری هیدروژل را به‌شکل شایان توجهی بهبود بخشد [۲۱].

- نانوذرات مس (Cu NPs): مس، عنصری کمیاب و ضروری برای بدن است و نانوذرات آن به‌دلیل خواص ضد میکروب قوی و نقش مهم در فرایندهای رگ‌زایی (angiogenesis) یا تشکیل

می‌شود. افزایش درصد وزنی نانوبلورهای سلولوز در شبکه پلی‌آکریل‌آمید به افزایش چشمگیر مدول کشسانی و استحکام کششی هیدروژل منجر شده است. نتایج تجربی نشان داد، با وجود ۴۰/۱٪ وزنی CNC، مدول یانگ به ۲۷۴۰ MPa و استحکام کششی در نقطه شکست به ۷۰/۴ MPa افزایش یافته است. این اعداد بیانگر افزایش چگالی اتصالات عرضی و استحکام ساختار داخلی شبکه هیدروژل هستند. افزودن CNC در غلظت‌های کم (تا ۳٪ وزنی) موجب کاهش نسبت تورم از ۱۱/۶۹٪ برای پلی‌آکریل‌آمید خالص به ۱۰/۳۳٪ شده است. این پدیده به‌دلیل کاهش تخلخل شبکه در اثر افزایش تراکم اتصالات عرضی میان زنجیرهای پلیمری است. بااین‌حال، در غلظت‌های بیشتر (۵٪ وزنی)، نسبت تورم مجدداً افزایش یافته و به ۱۴/۱۴٪ رسیده است که ناشی از ایجاد ساختارهای متخلخل‌تر در شبکه هیدروژل است. ترکیب خواص مکانیکی ارتقایافته با کنترل رفتار تورمی، هیدروژل‌های پلی‌آکریل‌آمید تقویت‌شده با نانوبلورهای سلولوز را به گزینه مناسبی برای کاربرد در زخم‌پوش‌های زیستی تبدیل کرده است. این سامانه‌ها قابلیت تأمین محیطی مرطوب در محل زخم، جذب مایعات زائد و محافظت مکانیکی مناسب از بافت آسیب‌دیده را دارند [۷، ۱۹].

چالش‌های کاربرد بالینی و چشم‌اندازهای آینده

باوجود پیشرفت‌های چشمگیر در توسعه زخم‌پوش‌های نانوکامپوزیتی پلی‌آکریل‌آمید برای استفاده بالینی گسترده این محصولات، چالش‌های مهمی وجود دارد که باید به آن‌ها پرداخته شود. این چالش‌ها عمدتاً در سه حوزه اصلی قابل‌دسته‌بندی هستند که در ادامه به آن‌ها پرداخته می‌شود.

چالش‌های مربوط به ایمنی و زیست‌سازگاری

یکی از نگرانی‌های اصلی، سمیت و زیست‌سازگاری نانوذرات موجود در ماتریس پلیمری است. درحالی‌که نانوذرات می‌توانند خواص ضد میکروب یا سایر عملکردهای درمانی را بهبود بخشند. تجمع آن‌ها در بدن و احتمال سمیت درازمدت برای یاخته‌ها و بافت‌های سالم، چالشی اساسی است. پژوهش‌ها نشان می‌دهد، سمیت برخی نانوذرات فلزی مانند نانوذرات نقره می‌تواند وابسته به اندازه و غلظت آن‌ها باشد که این موضوع نیازمند مطالعات بالینی دقیق‌تر است [۲۵].

چالش‌های فنی و تولیدی

قابلیت تولید در مقیاس صنعتی و هزینه تولید از موانع مهم دیگر

سلولوز (CNC) و نانوذرات نورپویای Ce6/CMCS تمرکز داشته‌اند. نتایج نشان می‌دهد، افزودن نانوذرات نقره به هیدروژل‌های PAM، نه تنها خواص مکانیکی را بهبود می‌بخشد، بلکه فعالیت ضدباکتری قوی در برابر باکتری‌های گرم مثبت و گرم منفی ایجاد می‌کند. نانوذرات نورپویا نیز با قابلیت پاسخ به نور، امکان درمان هدفمند عفونت‌های زخم را فراهم می‌کنند. ازسوی دیگر نانوبلورهای سلولوز با افزایش استحکام کششی و مدول یانگ، هیدروژل‌هایی با دوام مکانیکی زیاد را تولید کرده‌اند. این پیشرفت‌ها نشان می‌دهد، نانوکامپوزیت‌های برپایه PAM، قابلیت بالقوه زیادی برای توسعه زخم‌پوش‌های هوشمند با قابلیت‌های چندمنظوره دارند. بااین حال برای ورود این محصولات به عرصه بالینی، چالش‌هایی نظیر سمیت احتمالی برخی نانوذرات، هزینه و پیچیدگی تولید در مقیاس صنعتی و نیز نبود داده‌های بالینی کافی وجود دارد که باید در پژوهش‌های آتی به آن‌ها پرداخته شود.

عروق خونی جدید و سنتز کلاژن، به عنوان عامل درمانی مؤثر در زخم‌پوش‌ها شناخته می‌شوند. آزادسازی کنترل‌شده یون‌های مس از نانوکامپوزیت پلی‌آکریل‌آمید می‌تواند فرایند ترمیم زخم را شتاب بخشد [۲۰].

نتیجه‌گیری

پلی‌آکریل‌آمید به عنوان یکی از پلیمرهای پرکاربرد در ساخت هیدروژل‌های زخم‌پوش، به دلیل ساختار سه‌بعدی، زیست‌سازگاری و قابلیت بارگذاری دارو، توجه بسیاری را در حوزه پزشکی جلب کرده است. بااین حال، چالش‌هایی مانند استحکام مکانیکی کم و فقدان خاصیت ضدباکتری ذاتی، کاربرد آن را محدود کرده است. برای غلبه بر این محدودیت‌ها، پژوهش‌های اخیر بر ترکیب PAM با نانوذرات عامل‌دار مانند نانوذرات نقره (AgNPs)، نانوبلورهای

مراجع

1. Kamoun E.A., Kenawy E.R.S., and Chen X., A Review on Polymeric Hydrogel Membranes for Wound Dressing Applications: PVA-Based Hydrogel Dressings, *J. Adv. Res.*, **8**, 217-233, 2017.
2. Li Y., Huang G., Zhang X. et al., Magnetic Hydrogels and Their Potential Biomedical Applications, *Adv. Funct. Mater.*, **23**, 660-672, 2013.
3. Percival S.L., McCarty S.M., and Lipsky B., Biofilms and Wounds: An Overview of the Evidence, *Adv. Wound Care*, **4**, 373-381, 2015.
4. Gore M., Jadhav S., Schultz G., and Mehta D., Evaluation of Safety and Efficacy of Barrier Foam Dressing in Patients with Exuding Wounds, *Biomed. J. Sci. Tech. Res.*, **33**, 26292-26297, 2021.
5. Hu Y., Yu L., Dai Q., Hu X., and Shen Y., Multifunctional Antibacterial Hydrogels for Chronic Wound Management, *Biomater. Sci.*, **12**, 2460-2479, 2024.
6. Aswathy S.H., Narendrakumar U., and Manjubala I., Commercial Hydrogels for Biomedical Applications, *Heliyon*, **6**, e03719, 2020.
7. Singh S.K., Dhyani A., and Juyal D., Hydrogel: Preparation, Characterization and Applications, *Pharma Innov.*, **6**, 25, 2017.
8. Juby K.A., Dwivedi C., Kumar M. et al., Silver Nanoparticle-Loaded PVA/Gum Acacia Hydrogel: Synthesis, Characterization and Antibacterial Study, *Carbohydr. Polym.*, **89**, 906-913, 2012.
9. Boonkaew B., Suwanpreuksa P., Cuttle L. et al., Hydrogels Containing Silver Nanoparticles for Burn Wounds Show Antimicrobial Activity without Cytotoxicity, *J. Appl. Polym. Sci.*, **131**, 40215, 2014.
10. Hoellman D.B., Pankuch G.A., and Appelbaum P.C., Antistaphylococcal Activity of CB-181963 (CAB-175), *Antimicrob. Agents Chemother.*, **48**, 4037-4039, 2004.
11. Kanatt S.R. et al., Active Chitosan-Polyvinyl Alcohol Films with Natural Extracts, *Food Hydrocoll.*, **29**, 290-297, 2012.
12. Fathinejad H. and Karimi E., Synthesis and Characterization of Polyacrylamide-Based Antibacterial Hydrogel Nanocomposite, *Soft Mater.*, **22**, 295-302, 2024.
13. Bardajee G.R., Dianatnejad N., Mahmoodi N.O., and Mahmoodain H., Mechanical Properties and Development of Silver Nanoparticle-Enhanced Alginate-Polyacrylamide Double Network Hydrogel, *J. Polym. Res.*, **31**, 343, 2024.
14. Sabbagh F. and Muhamad I.I., Physical and Chemical Characterisation of Acrylamide-Based Hydrogels, Aam, Aam/NaCMC and Aam/NaCMC/MgO, *J. Inorg. Organomet. Polym. Mater.*, **27**, 1439-1449, 2017.
15. Ferfera-Harrar H., Berdous D., and Benhalima T., Hydrogel Nanocomposites Based on Chitosan-g-Polyacrylamide and

- Silver Nanoparticles Synthesized Using Curcuma longa for Antibacterial Applications, *Polym. Bull.*, **75**, 2819-2846, 2018.
16. Rajendran N.K., Kumar S.S.D., Houreld N.N., and Abrahamse H., A Review on Nanoparticle Based Treatment for Wound Healing, *J. Drug Deliv. Sci. Technol.*, **44**, 421-430, 2018.
 17. Ferrag C., Li S., Jeon K. et al., Polyacrylamide Hydrogels Doped with Different Shapes of Silver Nanoparticles: Antibacterial and Mechanical Properties, *Colloids Surf. B Biointerfaces*, **197**, 111397, 2021.
 18. Kang T., Guo Z., Lu Y. et al., Hybrid Hydrogels of Polyacrylamide and Self-Assembly Photodynamic Nanoparticles with Diverse Adhesion for Infected Chronic Wound Healing, *Biomacromolecules*, **25**, 7475-7484, 2024.
 19. Awasthi S., Gaur J.K., Bobji M.S., and Srivastava C., Nanoparticle-Reinforced Polyacrylamide Hydrogel Composites for Clinical Applications: A Review, *J. Mater. Sci.*, **57**, 8041-8063, 2022.
 20. Pino P., Bosco F., Mollea C., and Onida B., Antimicrobial Nano-Zinc Oxide Biocomposites for Wound Healing Applications: A Review, *Pharmaceutics*, **15**, 970, 2023.
 21. Rumon M.M.H., Sarkar S.D., Uddin M.M. et al., Graphene Oxide Based Crosslinker for Simultaneous Enhancement of Mechanical Toughness and Self-Healing Capability of Conventional Hydrogels, *RSC Adv.*, **12**, 7453-7463, 2022.
 22. Abd El-Mohdy H.L., Radiation Synthesis of Nanosilver/ Poly Vinyl Alcohol/Cellulose Acetate/Gelatin Hydrogels for Wound Dressing, *J. Polym. Res.*, **20**, 177, 2013.
 23. Baker C. et al., Synthesis and Antibacterial Properties of Silver Nanoparticles, *J. Nanosci. Nanotechnol.*, **5**, 244-249, 2005.
 24. Zhang L. et al., AIE Multinuclear Ir (III) Complexes for Biocompatible Organic Nanoparticles with Highly Enhanced Photodynamic Performance, *Adv. Sci.*, **6**, 1802050, 2019.
 25. Zhang L., Tang Y.J., Zhang W.Q. et al., Polyhydroxy Structure Orchestrates the Intrinsic Antibacterial Property of Acrylamide Hydrogel as a Versatile Wound-Healing Dressing, *Front. Bioeng. Biotechnol.*, **12**, 1396892, 2024.
 26. Indrakumar S., Dash T.K., Mishra V. et al., Silk Fibroin and Its Nanocomposites for Wound Care: A Comprehensive Review, *ACS Polym. Au*, **4**, 168-188, 2024.