



Journal of Applied Research of Chemical-Polymer Engineering

journal homepage: www.arcpe.modares.ac.ir

Research Paper

Polylactic Acid/Nigella sativa Nanofibers for Burn Wound Healing

Payam Zahedi ^{1,*}, Parmida Harirchi ¹, Armina Nazari ¹, Zeinab Ebrahimi Elti ²¹ Department of Polymer Engineering, School of Chemical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran² Department of Separation Processes, Caspian Faculty of Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Rezvanshahr, Iran

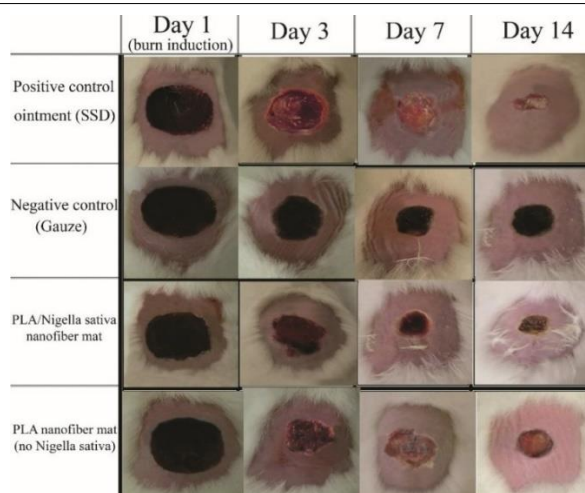
ARTICLE INFO

Received 2025-07-30
 Revised 2026-05-16
 Accepted 2026-06-26
 Available online 2026-07-15
 ISSN: 2588-5316
 Online ISSN: 2588-5324

Keywords:

Polylactic acid
 Nigella sativa
 Electrospinning
 Bioactive
 Wound dressing

GRAPHICAL ABSTRACT

**ABSTRACT**

Research subject: Based on the reports in the past few years, more than 60% of burn-related deaths occur due to infection and bacterial growth at the wound site. Biocompatible nanofiber wound dressings containing antimicrobial compounds can enhance the healing process of burn wounds. This study aimed to investigate the effect of polylactic acid (PLA) nanofibers loaded with *Nigella sativa* extract on burn wound healing and their antimicrobial activity.

Research approach: Polylactic acid (PLA) nanofibers were fabricated via electrospinning from a polymeric solution of PLA dissolved in a chloroform: dimethylformamide solvent mixture with a volume ratio of 3:7. The optimal solution concentration (12 w/v%) was determined based on rheometry tests and scanning electron microscopy imaging to obtain uniform, bead-free fibers with optimized diameter. Physical properties, including swelling behavior and hydrolytic degradation, were investigated. The release of *Nigella sativa* extract from the nanofibers over 48 hours was measured, and antimicrobial activity against *Pseudomonas aeruginosa* (Gram-negative) and *Staphylococcus aureus* (Gram-positive) was assessed. Additionally, extract-loaded and extract-free nanofibers were applied to burn wounds in an animal model for 14 days, and the wound healing process was monitored by periodic imaging.

Main results: The results showed that PLA nanofibers containing *Nigella sativa* extract exhibited approximately 69% release within 48 hours, more than a one-log reduction in bacterial population, and a 30–35% improvement in wound closure rate in the animal model. The performance of the extract-loaded nanofibers was comparable to silver sulfadiazine ointment. These findings demonstrate that the developed nanofibers provide a biocompatible and effective antimicrobial wound dressing for burn healing applications.

* Corresponding author: phdzahedi@ut.ac.ir – ORCID: 0000-0001-6636-4534



نشریه پژوهش‌های کاربردی مهندسی شیمی-پلیمر

آدرس صفحه: www.arcpe.modares.ac.ir

مقاله تحقیقاتی

نانوالیاف پلی لاکتیک اسید/نیگلاساتیوا برای ترمیم زخم سوختگی

پیام زاهدی^{۱*}، پارمیدا حریرچی^۱، آرمینا نظری^۱، زینب ابراهیمی التی^۲

^۱ گروه مهندسی پلیمر، دانشکده مهندسی شیمی، دانشکده‌گان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

^۲ گروه فرایندهای جداسازی، دانشکده فنی کاسپین، دانشگاه تهران، رضوانشهر، ایران

چکیده

موضوع تحقیق: بر اساس گزارش‌های پژوهشی در سال‌های اخیر، بیش از ۶۰٪ مرگ‌ومیر ناشی از سوختگی به دلیل عفونت و تکثیر باکتری در محل زخم رخ می‌دهد. استفاده از پوشش‌های نانوالیاف زیست‌سازگار حاوی ترکیبات ضد میکروبی می‌تواند روند ترمیم زخم‌های سوختگی را بهبود بخشد. هدف این مطالعه بررسی اثر نانوالیاف پلی لاکتیک اسید (PLA) حاوی عصاره نیگلاساتیوا در ترمیم زخم‌های سوختگی و فعالیت ضد میکروبی آن بود.

روش تحقیق: نانوالیاف PLA به روش الکتروریسی از محلول پلیمری پلی لاکتیک اسید تهیه شد. برای تهیه محلول الکتروریسی، پلی لاکتیک اسید در مخلوط حلال کلروفرم:دی‌متیل فرماید با نسبت حجمی ۳:۷ حل شد. غلظت بهینه محلول (۱۲٪ وزنی) بر اساس آزمون‌های رئومتری و تصویربرداری میکروسکوپ الکترونی روبشی برای دستیابی به الیافی یکنواخت و بدون دانه با قطر بهینه تعیین شد. خواص فیزیکی شامل میزان تورم و مقاومت در برابر تخریب آب‌کافت بررسی شد. رهائش عصاره نیگلاساتیوا از نانوالیاف طی ۴۸ ساعت مورد سنجش قرار گرفت و فعالیت ضد میکروبی علیه سودوموناس آئروژینوزا (گرم منفی) و استافیلوکوکوس اورئوس (گرم مثبت) ارزیابی شد. علاوه بر آن، نانوالیاف حاوی و فاقد عصاره به مدت ۱۴ روز بر روی زخم‌های سوختگی در مدل حیوانی اعمال و روند ترمیم با تصویربرداری دوره‌ای پیگیری شد.

نتایج اصلی: نتایج نشان داد که نانوالیاف PLA حاوی عصاره نیگلاساتیوا با رهائش حدود ۶۹ درصدی طی ۴۸ ساعت، کاهش قابل توجه جمعیت باکتریایی (بیش از یک لاگ کاهش) و بهبود میانگین ۳۵-۳۰ درصدی سرعت ترمیم زخم در مدل حیوانی، عملکردی رقابتی با پماد نقره سولفادیازین نشان دادند. این نتایج، پتانسیل بالای این نانوالیاف را به عنوان زخم‌پوشی زیست‌سازگار و ضد میکروبی تأیید می‌کند.

کلیدواژه‌ها

پلی لاکتیک اسید
نیگلاساتیوا
الکتروریسی
زیست فعال
زخم‌پوش

اطلاعات مقاله

دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۰۸
بازنگری: ۱۴۰۵/۰۲/۲۶
پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۰۷
دسترس آنلاین: ۱۴۰۵/۰۴/۲۴
ISSN: 2588-5316
Online ISSN: 2588-5324

* نویسنده مسئول: phdzahedi@ut.ac.ir - ORCID: 0000-0001-6636-4534

کپی‌رایت © ۲۰۲۵، نویسندگان. این مقاله به صورت دسترسی آزاد منتشر شده و تحت مجوز بین‌المللی Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 قرار دارد. بر اساس این مجوز، شما می‌توانید این مطلب را در هر قالب و رسانه‌ای کپی، بازنشر و بازآفرینی کنید و یا آن را ویرایش و بازسازی نمایید، به شرط آنکه نام نویسنده را ذکر کرده و از آن برای مقاصد غیرتجاری استفاده کنید.

۱ مقدمه

سوختگی یکی از شایع‌ترین آسیب‌های پوستی است که با عوارض گسترده‌ای همچون عفونت، التهاب و مرگ بافت همراه است. طبق گزارش‌ها، بیش از ۶۰ درصد از مرگ‌ومیرهای ناشی از سوختگی به علت عفونت و رشد باکتری در محل زخم رخ می‌دهد [۱]. در سال‌های اخیر، با پیشرفت فناوری نانو، تلاش‌های گسترده‌ای در راستای توسعه پانسمان‌های پیشرفته بر پایه نانوالیاف انجام شده است؛ به‌ویژه استفاده از نانوالیاف حاوی ترکیبات طبیعی با خواص ضدباکتری و زیست‌فعال برای درمان زخم‌های سوختگی موردتوجه قرار گرفته است [۲].

یکی از پلیمرهای زیست‌سازگار پرکاربرد در این حوزه، پلی‌لاکتیک اسید (PLA) است؛ پلی‌استری آلیفاتیک که به دلیل ویژگی‌هایی همچون زیست‌تخریب‌پذیری، استحکام مکانیکی مطلوب و نرخ کنترل‌شده تجزیه، در کاربردهای پزشکی متعددی از جمله نخ بخیه، داربست‌های مهندسی بافت و حامل‌های دارویی به کار رفته است [۳، ۴]. PLA به‌طور گسترده برای تولید نانوالیاف الکترووریسی شده مورد استفاده قرار گرفته است که امکان بارگذاری دارو یا ترکیبات ضد میکروبی را فراهم می‌کند. مطالعات اخیر نشان داده‌اند که نانوالیاف PLA می‌توانند با افزودن ترکیباتی مانند اسید روسمارینیک [۵]، کاتچین [۶]، کورکومین [۷] یا خاکستر گیاهی [۸] عملکرد ضد میکروبی و توانایی بهبود زخم را بهبود دهند. علاوه بر این، افزودن پلیمرهای کمکی مانند پلی اتیلن گلیکول یا ژلاتین (Gel) می‌تواند ویژگی‌هایی مانند آب‌دوستی و پراکندگی دارو در الیاف را بهبود دهد و تولید نانوالیاف یکنواخت را تسهیل کند. این مطالعات نشان می‌دهند که PLA به‌عنوان سامانه حمل دارو برای پانسمان زخم، مزایای قابل توجهی دارد.

ازسوی دیگر، نیگل‌ساتیوا (سیاه‌دانه) گیاهی علفی با ساقه‌ای افراشته و منشعب به ارتفاع ۱۵ تا ۳۰ سانتی‌متر است که برگ‌های آن به صورت نخ‌ی شکل در اطراف دمبرگ قرار دارند و گل‌های منفرد آن به رنگ سفید شیری دیده می‌شوند [۹]. عصاره این گیاه، که در طب سنتی ایران و سایر فرهنگ‌ها سابقه مصرف گسترده‌ای دارد، دارای خواص درمانی اثبات‌شده‌ای مانند اثرات آنتی‌اکسیدانی، ضدالتهابی، ضد میکروبی و تنظیم‌کننده قند و فشارخون است [۱۰، ۱۱]. بخش دارویی این گیاه عمدتاً دانه‌های سیاه‌رنگ و سه‌وجهی آن هستند که ترکیبات فعال موجود در آن‌ها شامل تیموکینون، فلاونوئیدها و اسیدهای چرب مفید است [۱۰، ۱۲].

روش الکترووریسی، به‌عنوان یکی از روش‌های نوین و کارآمد برای تولید نانوالیاف با قطرهای در حد نانومتر، امکان ساخت پوشش‌های با نسبت سطح به حجم بالا، تخلخل مناسب و قابلیت بارگذاری دارو را فراهم می‌کند [۱۳]. در مجموع، مرور مطالعات نشان می‌دهد که نانوالیاف PLA عمدتاً به‌عنوان بستر حامل ترکیبات زیست‌فعال طبیعی مانند پلی‌فنول‌ها، فلاونوئیدها و عصاره‌های گیاهی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این ترکیبات معمولاً موجب بهبود خواص ضد میکروبی، افزایش سرعت ترمیم زخم و ارتقای تعامل سلول با بستر پلیمری شده‌اند. با این حال، بیشتر مطالعات بر روی ترکیبات شناخته‌شده‌ای مانند کورکومین، کاتچین و اسید روسمارینیک متمرکز بوده و تنوع ترکیبات گیاهی بررسی‌شده محدود است. بنابراین هنوز ظرفیت استفاده از عصاره‌های گیاهی دیگر با ترکیبات فعال

متفاوت در این سامانه‌ها وجود دارد. در سال‌های اخیر، پژوهش‌های متعددی نانوالیاف PLA و ترکیبات زیست‌فعال مختلف را برای بهبود ترمیم زخم مورد بررسی قرار داده‌اند. برای مثال، Liu و همکاران [۵] نانوالیاف PLA حاوی اسید روسمارینیک Rosmarinic Acid و اکسید گرافن Graphite Oxide را تهیه و فعالیت ضد میکروبی و بهبود زخم را مشاهده کردند. Ranjbar-Mohammadi و همکاران [۶] نانوالیاف Gel/PLA حاوی کاتچین را تولید کردند که چسبندگی سلول و فعالیت ضد میکروبی بهبود یافته بود. همچنین، Nguyen و همکاران [۷] نشان دادند که نانوالیاف PLA حاوی کورکومین باعث افزایش قابل توجه سرعت بسته‌شدن زخم در مدل موش می‌شوند، و Cai و همکاران [۸] با استفاده از خاکستر گیاهی، محیط خنثی و مناسبی برای بهبود زخم ایجاد کردند.

با توجه به پژوهش‌های پیشین، نانوالیاف PLA حامل ترکیبات ضد میکروبی و داروهای گیاهی مختلف برای بهبود زخم‌ها بررسی شده‌اند، اما مطالعات کمی به بررسی نانوالیاف PLA حاوی عصاره نیگل‌ساتیوا و اثرات هم‌زمان ضد میکروبی و زیست‌فعال آن‌ها بر روند ترمیم زخم‌های سوختگی پرداخته‌اند. نوآوری این مطالعه در استفاده از عصاره نیگل‌ساتیوا به‌عنوان ترکیب طبیعی فعال در نانوالیاف PLA، بررسی اثرات هم‌زمان ضد میکروبی و ترمیمی و ارزیابی کمی و کیفی عملکرد نانوالیاف در مدل حیوانی زخم سوختگی است.

۲ بخش تجربی

۲-۱ مواد

در این تحقیق، پلی‌لاکتیک اسید (PLA) گرید D۳۰۰۱ از شرکت NatureWorks، آمریکا به‌عنوان پلیمر پایه استفاده شد. داروی گیاهی مورد استفاده، عصاره نیگل‌ساتیوا، از پژوهشکده دارویی جهاد دانشگاهی تهیه شد. حلال مورد استفاده برای PLA، مخلوط کلروفرم/دی‌متیل‌فرمامید با نسبت ۷:۳ (v/v) بود. همچنین برای تهیه نانوالیاف مرجع، پلی‌کاپرولاکتون (PCL) به دلیل زیست‌سازگاری بالا، زیست‌تخریب‌پذیری کنترل‌شده و کاربرد گسترده در مهندسی بافت و پانسمان‌های ترمیم زخم مورد استفاده قرار گرفت. PCL به‌عنوان پلیمر مرجع تأییدشده توسط FDA برای ارزیابی مقایسه‌ای عملکرد فیزیکوشیمیایی و زیستی نانوالیاف مورد استفاده قرار گرفت.

۲-۲ روش تهیه

۲-۲-۱ تهیه محلول‌های پلیمری

برای تهیه نانوالیاف PLA خالص، این پلیمر در غلظت‌های مختلف وزنی-حجمی در مخلوط حلال کلروفرم/دی‌متیل‌فرمامید در دمای ۲۵ °C به مدت ۲ ساعت تحت هم‌زدن مغناطیسی قرار گرفت تا محلول یکنواخت حاصل شود.

برای تهیه نانوالیاف PLA حاوی عصاره نیگل‌ساتیوا، ابتدا PLA در کلروفرم حل شد و سپس عصاره که در دی‌متیل‌فرمامید حل شده بود به محلول پلیمر افزوده شد و به مدت ۲ ساعت دیگر تحت هم‌زدن قرار گرفت. برای نانوالیاف مرجع PCL، محلول ۱۰ درصد وزنی-حجمی در مخلوط کلروفرم/متانول (۳:۱) تهیه شد.

میزان رهایش دارو با استفاده از دستگاه UV-Vis مدل (UV mini-1240 Shimadzu، ژاپن) اندازه‌گیری شد.

۲-۳-۵ فعالیت ضد میکروبی

فعالیت ضد میکروبی نانوالیاف PLA خالص و PLA حاوی عصاره نیگلا بر روی باکتری‌های *Pseudomonas aeruginosa* و *Staphylococcus aureus* طی ۴۸ ساعت بررسی شد.

۲-۳-۶ آزمون‌های حیوانی

برای بررسی عملکرد پانسمان‌ها از موش‌های ویستار نر (وزن ۲۵۰-۳۰۰ گرم) استفاده شد. زخم سوختگی درجه دو با قطر ۲۰ میلی‌متر از طریق تماس فلز داغ (۱۱۰°C) به مدت ۱۰ ثانیه ایجاد شد. درصد بسته‌شدن زخم به‌صورت میانگین $\pm$ انحراف معیار برای حداقل سه حیوان گزارش شد.

۲-۳-۷ تحلیل آماری

تحلیل آماری داده‌ها با استفاده از آزمون ANOVA یک‌طرفه و آزمون تعقیبی Tukey انجام شد. سطح معنی‌داری آماری $p < 0.05$ در نظر گرفته شد.

۳ نتایج و بحث

نتایج آزمون سوانگاری گازی عصاره گیاه نیگل‌ساتیوا مورد استفاده، در جدول ۱ و ۲ آورده شده است.

بهترین شیوه انتخاب غلظت بهینه محلول پلیمری، بررسی هم‌زمان نتایج گرانی و عکس‌های SEM نانوالیاف الکترورسی است. به این منظور قبل از ریسندگی نانوالیاف با به‌کارگیری دستگاه رثومتر به تعیین غلظت بهینه و در نتیجه گرانی مناسب برای فرایند الکترورسی پرداخته شد. جدول ۳، نتایج استخراج شده از آزمون رثومتري را برای نمونه محلولی PLA نشان می‌دهند.

در محدوده غلظتی بررسی‌شده (۹ تا ۱۵ درصد وزنی/حجمی)، افزایش قابل‌توجهی در گرانی محلول مشاهده شد که ناشی از افزایش درهم‌تنیدگی زنجیره‌های پلیمری است. بررسی تصاویر SEM نشان داد که در این محدوده، الیاف یکنواخت و بدون تشکیل دانه (Beads) تولید می‌شوند. با وجود مناسب بودن بازه ۹ تا ۱۵ درصد وزنی/حجمی برای الکترورسی، غلظت ۱۲ درصد وزنی/حجمی به دلیل ایجاد تعادل مناسب میان گرانی محلول، یکنواختی مورفولوژی و قطر متوسط نانوالیاف، به عنوان غلظت بهینه انتخاب شد. بنابراین، بر اساس نتایج رثومتري و مشاهدات مورفولوژیکی در این مطالعه، این محدوده غلظتی به عنوان شرایط مناسب برای الکترورسی نانوالیاف PLA انتخاب شد.

همان گونه که در شکل ۱ نشان داده شده است، نتایج حاصل از آزمون گرانی و سنجی و بررسی‌های مورفولوژیکی به‌خوبی با یکدیگر تطابق دارند؛ به‌طوری که نانوالیاف با میانگین قطر بهینه و ریخت‌شناسی یکنواخت و تقریباً عاری از تشکیل دانه در محدوده غلظت بهینه تعیین شده توسط آزمون رثومتري مشاهده می‌شوند. در غلظت‌های پایین‌تر از محدوده بهینه، الیاف تولیدشده دارای قطر میانگین کمتر ولی همراه با تشکیل دانه‌های مِه‌مانند هستند که وجود این دانه‌ها می‌تواند موجب به دام افتادن دارو

۲-۲-۲ فرایند الکترورسی

نانوالیاف با استفاده از دستگاه eSpinner NF-COEN/II (شرکت فناوری نانو ساختار آسیا، ایران) ریسیده شد. شرایط الکترورسی برای تمام نمونه‌ها مشابه بود:

ولتاژ: ۲۰ کیلوولت، نرخ جریان: ۰/۸ میلی‌لیتر/بر ساعت و فاصله افشانه تا جمع‌کننده: ۱۵ سانتی‌متر

نانوالیاف بر روی فویل آلومینیومی جمع‌آوری شده و سپس به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق (رطوبت نسبی ۳۲٪) به‌منظور حذف کامل حلال خشک شدند. در ادامه، از بستر لیفی غیربافته (Nonwoven Fabric) تجاری با وزن سطحی حدود $50-60 \text{ g/m}^2$ به‌عنوان زیرلایه استفاده شد. این بستر به‌دلیل ساختار متخلخل، استحکام مناسب و سازگاری با کاربردهای زیست‌پزشکی انتخاب شد. لایه‌های نانوالیاف PLA خالص و PLA حاوی عصاره نیگل‌ساتیوا به‌صورت مستقیم بر روی سطح Nonwoven Fabric قرار داده شدند. سپس به‌منظور تثبیت یکنواخت نانوالیاف و جلوگیری از جداسدن آن‌ها در حین آزمون‌ها، فرایند پرس سرد انجام شد. در این مرحله، نمونه‌ها تحت بار ۵۰ کیلوگرم به مدت ۵ دقیقه قرار گرفتند تا اتصال مکانیکی مناسب بین لایه نانوالیاف و بستر Nonwoven Fabric ایجاد شود.

ضخامت لایه نانوالیاف پس از فرایند تثبیت در حدود $0.2-0.3$ میلی‌متر اندازه‌گیری شد. نمونه‌های آماده‌شده در ادامه برای آزمون‌های رهایش دارو، فعالیت ضد میکروبی و مطالعات حیوانی مورد استفاده قرار گرفتند.

۲-۳-۲ روش‌های مشخصه‌یابی

۲-۳-۲-۱ اندازه‌گیری گرانی محلول‌ها

گرانی محلول‌ها با استفاده از رثومتر مدل Anton Paar MCR 300، (اتریش) در دمای 25°C اندازه‌گیری شد.

۲-۳-۲-۲ بررسی ریخت‌شناسی و قطر نانوالیاف

ریخت‌شناسی و قطر نانوالیاف با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل (AIS2100 Seron Technology، کره جنوبی) بررسی شد.

۲-۳-۲-۳ تحلیل سوانگاری گازی عصاره

برای شناسایی ترکیبات فعال موجود در عصاره نیگل‌ساتیوا، تحلیل سوانگاری گازی انجام شد. ترکیبات عصاره نیگل‌ساتیوا با استفاده از دستگاه Gas Chromatograph (Agilent 7890B) مجهز به ستون $30 \text{ m} \times 0.25 \text{ mm}$ capillary HP-5 $0.25 \mu\text{m}$ تحلیل شد. شرایط عملیاتی به شرح زیر بود: دمای اولیه ستون: 60°C (نگهداری ۲ دقیقه)، نرخ افزایش دما: $^\circ\text{C}/\text{min}$ ۱۰ تا 280°C ، دمای نهایی: 280°C (نگهداری ۵ دقیقه)، گاز حامل: هلیوم با دبی $1 \text{ mL}/\text{min}$ ، تزریق نمونه: split (نسبت تقسیم ۵۰:۱) و شناسایی ترکیبات با استفاده از کتابخانه NIST انجام شد.

۲-۳-۴ رهایش دارو

آزمون رهایش دارو در بافر استات با $\text{pH}=5$ انجام شد. بافر از حل ۱۵۰ گرم سدیم‌استات در ۲۵۰ میلی‌لیتر آب و افزودن ۱۵ میلی‌لیتر اسیداستیک گلاسیال تهیه و سپس با آب مقطر به حجم ۱۰۰۰ میلی‌لیتر رسانده شد.

همکاران [۱۵] نقش گرانیوی محلول و درهم‌تنیدگی زنجیره‌های پلیمری را به‌عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل کنترل‌کننده کیفیت نانوالیاف PLA معرفی کرده‌اند.

در جدول ۴، مقادیر میانگین قطر نانوالیاف نمونه‌های ارائه‌شده در شکل ۱ بر حسب نانومتر آمده است که از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی استخراج شده‌اند.

در ساختار آن‌ها شده و فرایند رهایش دارو را مختل کند. این نتایج با گزارش‌های پیشین در زمینه الکتروریسی PLA هم‌خوانی دارد. مطالعات نشان داده‌اند که افزایش غلظت محلول پلیمری و در نتیجه افزایش درهم‌تنیدگی زنجیره‌ها، منجر به تشکیل الیاف یکنواخت‌تر و کاهش ساختارهای دانه‌ای می‌شود. Nguyen و همکاران [۷] نیز در تولید نانوالیاف PLA حاوی کورکومین گزارش کردند که غلظت‌های پایین‌تر پلیمر منجر به تشکیل دانه و ناپایداری مورفولوژیکی می‌شود، درحالی‌که غلظت‌های بهینه باعث تشکیل شبکه الیافی یکنواخت و پایدار می‌شود. همچنین Fattahi و

جدول ۱ نتایج حاصل از آزمون اسیدهای چرب عصاره نیگلاساتیوا

Table 1 Fatty acid composition analysis of Nigella sativa extract

Fatty acid	Palmitic	Stearic	Oleic	Linoleic	Arachidonic
Percentage (%)	14.86	3.53	21.82	55.27	4.52

جدول ۲ مواد عمده تشکیل‌دهنده اساس موجود در عصاره نیگلاساتیوا

Table 2 Major constituents of Nigella sativa extract essential oil

Compound	Parasamin	Thymoquinone	Alpha-Thujene	Alpha-Pinene	Beta-Pinene
Percentage (%)	30.35	24.33	14.62	3.01	2.84

جدول ۳ نتایج حاصل از آزمون رئومتری

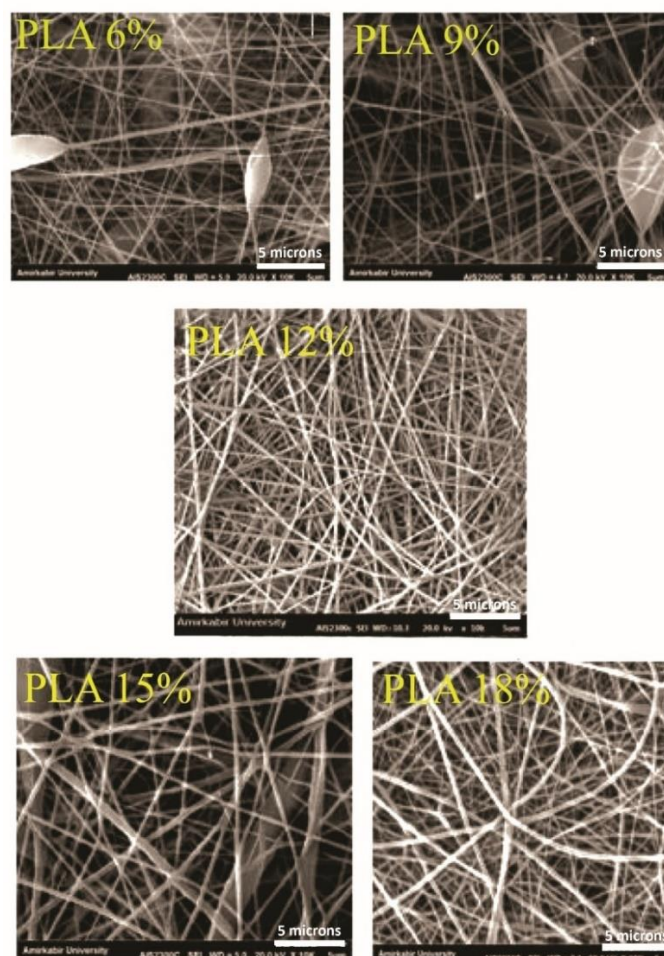
Table 3 Rheological test results

Concentration (w/v%)	6	9	12	15	18
Viscosity (cP)	39	50	94	178	359

جدول ۴ قطر میانگین نانوالیاف PLA

Table 4 Average diameter of PLA nanofibers

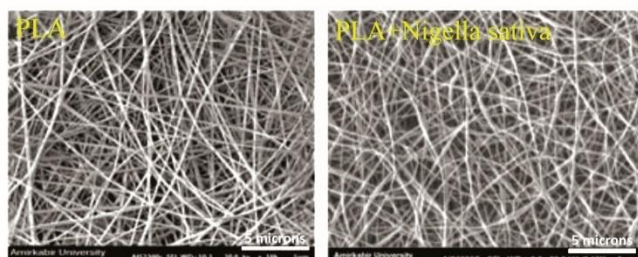
PLA concentration (wt. %)	6	9	12	15	18
Average diameter (nm)	115±21	194±38	270±40	351±26	412±17



شکل ۱ تصاویر SEM نانوالیاف الکترورسی شده از محلول PLA با غلظت‌های وزنی/حجمی ۶، ۹، ۱۲، ۱۵ و ۱۸ درصد (مقیاس: ۵ میکرومتر)

Figure 1 SEM images of electrospun PLA nanofibers prepared from solutions with 6, 9, 12, 15, and 18 (w/v%) concentrations (Scale bar: 5 μ m)

عملکرد نانوالیاف PLA/نیگلاساتیوا، نانوالیاف PCL به‌عنوان پلیمر مرجع تأییدشده توسط FDA و به‌منظور مقایسه‌ای استاندارد در ارزیابی رفتار فیزیکوشیمیایی و زیستی تهیه و بررسی شد. بنابراین، حضور PCL به‌عنوان نمونه مرجع، امکان مقایسه‌ای دقیق و قابل‌اتکا با پلیمر استاندارد بالینی را فراهم کرد. ریخت‌شناسی، فعالیت ضد میکروبی و رفتار رهایش عصاره نانوالیاف PCL در کنار نمونه‌های PLA مورد بررسی قرار گرفت تا چارچوب مقایسه‌ای معتبر ایجاد شود. بر اساس نتایج، میزان جذب رطوبت در نمونه‌های PLA کمتر از PCL بود. این تفاوت را می‌توان به بلورینگی بالاتر PLA نسبت داد که منجر به کاهش نفوذپذیری آب در ساختار پلیمری می‌شود.



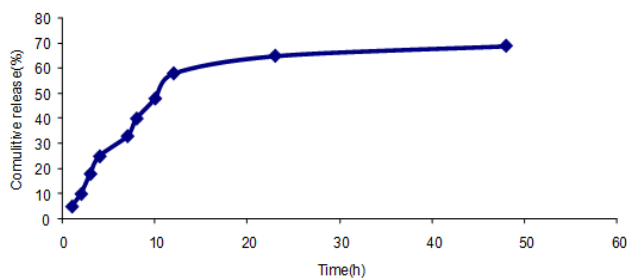
شکل ۲ تصاویر SEM نمونه PLA فاقد و حاوی نیگلاساتیوا (مقیاس: ۵ میکرومتر)

Figure 2 SEM images of PLA nanofibers without and with *Nigella sativa* extract (Scale bar: 5 μ m)

از آن‌جا که در تصاویر SEM مربوط به نانوالیاف تهیه‌شده با غلظت ۱۲٪ پلی‌لاکتیک‌اسید، که در محدوده غلظت بهینه تعیین‌شده توسط آزمون گرانیوی سنجی قرار دارد، هیچ‌گونه ساختار دانه‌ای مشاهده نمی‌شود، می‌توان نتیجه گرفت که آزمون گرانیوی سنجی روشی قابل‌اعتماد برای تعیین غلظت مناسب محلول پلیمری برای تولید نانوالیاف یکنواخت و عاری از دانه‌های معیوب است. باتوجه به این یافته، نمونه‌های حاوی عصاره نیگلاساتیوا نیز در همین غلظت (۱۲٪) تهیه شدند.

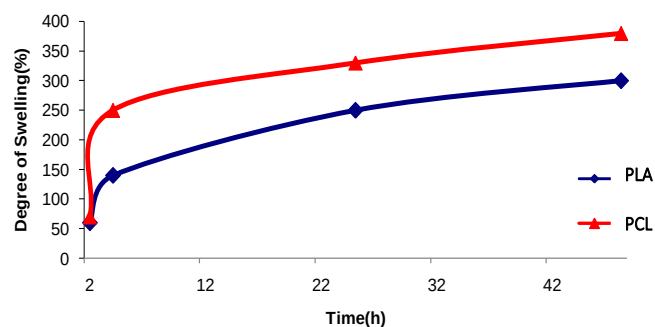
در شکل ۲، تصویر SEM مربوط به نانوالیاف حاوی عصاره گیاهی مشاهده می‌شود. این الیاف دارای قطر بالا و ساختاری به‌هم‌چسبیده هستند. این چسبندگی احتمالاً ناشی از برهمکنش عصاره با سامانه پلیمری، ماهیت نسبتاً آبگریز/چرب برخی ترکیبات عصاره و نیز تغییر در رفتار تبخیر حلال و شکل‌گیری نانوالیاف در حین الکترورسی است. این پدیده نشان‌دهنده یکی از چالش‌های رایج در استفاده از ترکیبات گیاهی در فرمول‌بندی‌های پلیمری است، به‌ویژه زمانی که ترکیبات فعال دارای قطبیت پایین یا ویژگی‌های چربی‌دوست باشند.

آزمون تورم به‌عنوان یکی از شاخص‌های مؤثر در فرایند رهایش دارو و به‌تبع آن، اثربخشی درمان زخم، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از آزمون تورم نمونه‌های PLA به‌مدت ۴۸ ساعت در محیط بافر استات با pH برابر ۵/۵ و دمای ۳۷ درجه سانتی‌گراد، در شکل ۳ ارائه شده است. برای ارزیابی



شکل ۵ رهائش جمعی نیگلا را در مدت ۴۸ ساعت از نمدهای نانوالیاف الکتروپس شده PLA

Figure 5 Cumulative release of Nigella sativa extract from electrospun PLA nanofiber mats over 48 hours

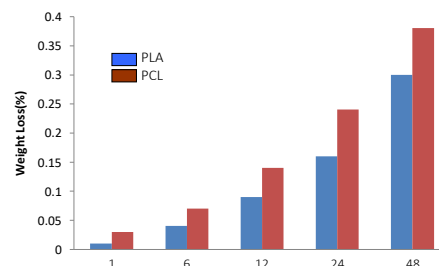


شکل ۳ تورم نمونه الیاف PLA در مقایسه با PCL

Figure 3 Swelling of PLA nanofiber samples compared to PCL

میزان کاهش وزن نمونه‌های نانوالیاف PLA در محیط بافر استات مورد بررسی قرار گرفت. همان‌گونه که در شکل ۴ نشان داده شده است، تغییر وزنی قابل توجهی در نمونه‌ها طی ۴۸ ساعت مشاهده نشد. مقایسه این رفتار با نمونه‌های PCL نشان می‌دهد که کاهش وزن PLA کمتر از PCL است. این تفاوت را می‌توان به بلورینگی بالاتر PLA نسبت داد، به‌طوری‌که نفوذ آب به درون ساختار نانوالیاف PLA دشوارتر بوده و در نتیجه، تخریب و کاهش وزن آن در مدت‌زمان مورد بررسی محدود باقی مانده است. رفتار تورم و تخریب محدود مشاهده‌شده در نانوالیاف PLA، از نظر عملکرد زخم‌پوش اهمیت زیادی دارد؛ زیرا حفظ پایداری ساختاری در کنار جذب کنترل‌شده رطوبت، می‌تواند محیط مناسبی برای ترمیم زخم فراهم کند. مطالعات پیشین نیز نشان داده‌اند که نانوالیاف PLA به‌دلیل بلورینگی بالاتر، تخریب آهسته‌تر و پایداری مکانیکی مناسب‌تری نسبت به برخی پلیمرهای زیست‌تخریب‌پذیر دیگر دارند [۵، ۱۵].

این ویژگی می‌تواند از تخریب سریع پانسمان در محیط مرطوب زخم جلوگیری و آزادسازی تدریجی ترکیبات فعال را تسهیل کند.



شکل ۴ درصد کاهش وزن نمونه‌های نانوالیاف الکتروپس PLA، در مقایسه با PCL در محیط بافر استات برای مدت ۴۸ ساعت

Figure 4 Weight loss percentage of electrospun PLA nanofiber samples compared to PCL in acetate buffer over 48 hours

رهائش تجمعی عصاره نیگلاساتیوا/ از نانوالیاف PLA در محیط بافر استات طی ۴۸ ساعت مورد ارزیابی قرار گرفت. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، الگوی رهائش شامل دو مرحله مشخص است: در مرحله اول، رهائش سریع (Initial Burst Release) رخ می‌دهد که به واجذب اولیه دارو از سطح نانوالیاف نسبت داده می‌شود. در مرحله دوم، رهائش با آهنگی آهسته‌تر و نسبتاً یکنواخت ادامه می‌یابد. این الگو با نتایج گزارش‌شده در مطالعات پیشین نیز هم‌خوانی دارد، که در آن‌ها، رهائش سریع اولیه ناشی از حضور دارو در نزدیکی سطح الیاف و نفوذ آسان آن به محیط اطراف گزارش شده است.

رهائش آنی عصاره نیگلاساتیوا در لحظات اولیه تماس نانوالیاف با محیط، می‌تواند نقش مؤثری در جلوگیری از بروز عفونت‌های اولیه پس از سوختگی ایفا کند؛ چرا که اغلب این عفونت‌ها در ساعات ابتدایی حادثه رخ می‌دهند. به‌طور کلی، رهائش یک جزء فعال از ماتریس پلیمری متورم طی دو مرحله انجام می‌شود. در مرحله نخست، نفوذ مولکول‌های آب به درون ماتریس موجب تورم ساختار پلیمری می‌شود. در پی این پدیده، تخلخل‌های موجود در ساختار پلیمر گسترش یافته، امکان آزادسازی مولکول‌های دارو به محیط بیرونی فراهم می‌شود تا در نهایت تعادل ترمودینامیکی میان دو فاز ایجاد شود. الگوی رهائش دوم‌مرحله‌ای مشاهده‌شده در این مطالعه، مشابه نتایج گزارش‌شده برای سایر نانوالیاف PLA حامل ترکیبات زیست‌فعال است. Liu و همکاران [۵] نیز برای نانوالیاف PLA حاوی اسید روزمارینیک، آزادسازی اولیه سریع و سپس رهائش تدریجی را گزارش کردند. این رفتار معمولاً به حضور بخشی از ماده فعال در سطح یا نزدیکی سطح نانوالیاف و سپس نفوذ تدریجی بخش محصورشده در ماتریس پلیمری نسبت داده می‌شود. چنین الگویی برای زخم‌های سوختگی اهمیت ویژه‌ای دارد، زیرا آزادسازی اولیه می‌تواند به مهار سریع آلودگی میکروبی کمک کرده و رهائش تدریجی در ادامه، شرایط مناسب برای ترمیم بافت را حفظ کند [۱۶].

سینتیک رهائش عصاره نیگلا از نانوالیاف PLA را می‌توان تابع سه فرایند اصلی دانست:

نفوذ آب به درون ساختار نانوالیاف، آسودگی درشت‌مولکولی زنجیره‌های پلیمری و نفوذ مؤلفه فعال از شبکه متورم‌شده پلیمری به محیط اطراف [۱۷].

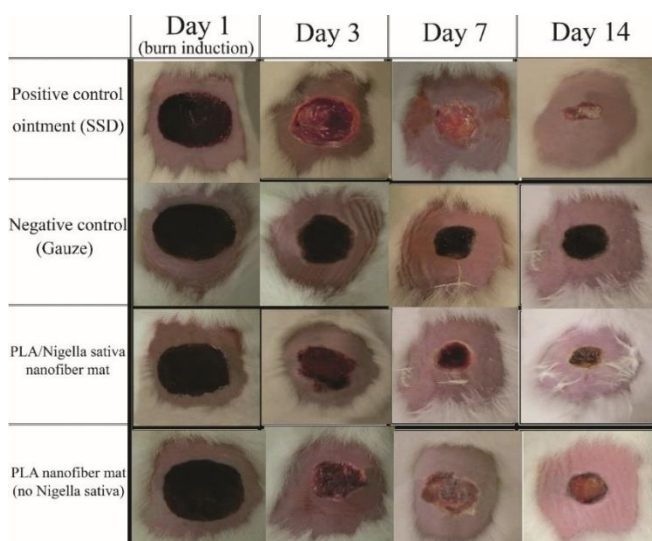
این رفتار را می‌توان بر اساس سازوکار نفوذ فیک (Fickian Diffusion) تفسیر کرد که توصیف‌کننده رفتار رهائش کنترل‌شده از ماتریس‌های پلیمری غیرتخریب‌شونده یا با تخریب کند است. برای ارزیابی خواص ضد میکروبی نانوالیاف، نمونه‌هایی از نمدهای نانوالیاف PLA حاوی عصاره نیگلا (با مقدار ۰/۱۴۴ گرم، انتخاب‌شده بر اساس آزمون‌های مقدماتی و بهینه‌سازی بارگذاری عصاره) تهیه و بر محیط آگار کشت‌شده با باکتری‌های سودوموناس آئروژینوزا و استافیلوکوکوس اورئوس قرار داده شد. مطابق نتایج به‌دست‌آمده (شکل ۶)، در اطراف نانوالیاف حاوی عصاره نیگلا، نواحی شفاف و فاقد رشد میکروبی (هاله بازدارندگی) مشاهده شد که نشان‌دهنده اثر بخشی قابل توجه ترکیب در مهار رشد هر دو نوع باکتری گرم مثبت و گرم منفی است. خاصیت ضد میکروبی مشاهده‌شده را می‌توان به ترکیبات

درحالی‌که تفاوت بین گروه نیگلا و SSD در برخی زمان‌های ارزیابی معنی‌دار نبود ($p > 0.05$). تمامی داده‌های کمی حاصل از آزمون‌های فیزیکی و زیستی با استفاده از آزمون ANOVA یک‌طرفه و آزمون Tukey تحلیل شدند.

جدول ۵ درصد حدودی بسته‌شدن زخم‌ها گروه‌ها در روزهای سوم، هفتم و چهاردهم

Table 5 Wound closure percentage in different groups on days 3, 7, and 14

Group	Day 3 (%)	Day 7 (%)	Day 14 (%)
Positive control (SSD)	50	68	92
Negative control (Gauze)	25	39	69
PLA nanofiber + Nigella	45	65	86
PLA nanofiber (without Nigella)	35	53	75

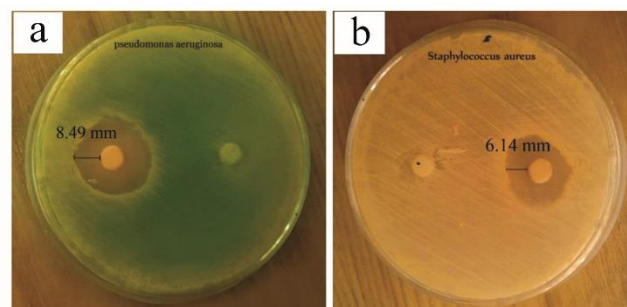


شکل ۷ تصاویر ترمیم زخم‌ها در گروه‌ها و روزهای متفاوت منطبق با جدول ۵
Figure 7 Images of wounds healing at different groups and various time points corresponding to Table 5

همان‌گونه که در جدول ۵ و شکل ۷ مشاهده می‌شود، در تمام گروه‌ها تا روز چهاردهم، روند ترمیم زخم به‌طور قابل‌توجهی پیشرفت داشته است. بااین‌حال، سرعت ترمیم زخم در گروه‌های نمد نانوالیاف PLA حاوی عصاره نیگلاساتیوا و نیز گروه پماد نقره سولفادیازی (SSD) نسبت به دو گروه دیگر بیشتر بود. مقایسه عملکرد این دو گروه نشان می‌دهد که اثربخشی نمونه‌های حاوی نیگلا، با تقریب مناسبی قابل‌مقایسه با پماد تجاری SSD است. تحلیل آماری نشان داد که تفاوت درصد ترمیم زخم در روز چهاردهم بین گروه نانوالیاف حاوی نیگلا و گروه SSD، معنی‌دار نبود ($p > 0.05$)، درحالی‌که این گروه‌ها هر دو نسبت به گروه کنترل منفی و گروه نانوالیاف بدون عصاره تفاوت معناداری داشتند ($p < 0.05$). این نتایج کمی، یافته‌های کیفی تصاویر زخم را تأیید می‌کند. اگرچه عملکرد گروه SSD از نظر درصد نهایی ترمیم زخم اندکی بهتر از نانوالیاف حاوی عصاره نیگلا بود، اما نتایج نشان دادند که نانوالیاف PLA/نیگلا توانسته‌اند روند ترمیمی قابل‌مقایسه‌ای

زیست‌فعال موجود در عصاره نیگلاساتیوا، به‌ویژه تیموکینون، نسبت داد. مطالعات پیشین نشان داده‌اند که تیموکینون با آسیب به غشای سلولی باکتری‌ها، ایجاد تنش اکسیداتیو و اختلال در متابولیسم سلولی، می‌تواند رشد طیف وسیعی از میکروارگانیسم‌ها را مهار کند [۱۰، ۱۸، ۱۹]. همچنین ساختار متخلخل نانوالیاف و نسبت سطح به حجم بالای آن‌ها، سطح تماس بیشتری با محیط فراهم کرده و می‌تواند در افزایش اثربخشی ضد میکروبی نقش داشته باشد.

همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شده است، اندازه ناحیه بازدارندگی مربوط به باکتری‌های سودوموناس آئروژینوزا و استافیلوکوکوس اورئوس به‌ترتیب ۸/۴۹ میلی‌متر و ۶/۱۴ میلی‌متر است. این بدان معناست که اندازه ناحیه بازدارندگی در باکتری گرم‌منفی (سودوموناس) بیشتر از باکتری گرم‌مثبت (استافیلوکوکوس) است، که این نتیجه با برخی از پژوهش‌های پیشین اندکی مغایرت دارد [۱۶، ۲۰، ۲۱]. علت این تفاوت می‌تواند کاهش سرعت و میزان رهایش دارو از نانوالیاف PLA در محیط آگار نسبت به بافر باشد؛ زیرا آگار محیطی نیمه‌جامد بوده، رهایش دارو در آن دشوارتر انجام می‌شود.



شکل ۶ مشاهده هاله عدم رشد: (a) باکتری سودوموناس آئروژینوزا و (b) استافیلوکوکوس اورئوس در اطراف نمد نانوالیاف PLA حاوی عصاره نیگلاساتیوا (نمونه‌های فاقد هاله عدم رشد مربوط به نمدهای PLA بدون عصاره هستند)
Figure 6 Observation of inhibition zones: (a) *Pseudomonas aeruginosa* and (b) *Staphylococcus aureus* around PLA nanofiber mats containing Nigella sativa extract. The samples without inhibition zones correspond to PLA nanofiber mats without the extract

برای بررسی ترمیم زخم در مدل حیوانی، موش‌ها به چهار گروه تقسیم شدند:

۱. گروه کنترل منفی (پوشش گاز استریل)
۲. گروه کنترل مثبت (پماد نقره سولفادیازین تجاری)
۳. گروه نمد الکتروریسی شده فاقد دارو
۴. گروه نمد الکتروریسی شده حاوی عصاره نیگلاساتیوا

از موش‌ها در روزهای اول، سوم، هفتم و چهاردهم تصویربرداری و قطر زخم اندازه‌گیری شد تا درصد ترمیم زخم محاسبه شود. جدول ۵، درصد ترمیم زخم‌ها در روزهای سوم، هفتم و چهاردهم را نشان می‌دهد و شکل ۷، تصاویر مربوط به روند ترمیم را نمایش می‌دهد. بر اساس نتایج آزمون ANOVA یک‌طرفه و آزمون تعقیبی توکی، تفاوت میان گروه‌ها از نظر درصد ترمیم زخم در روزهای مختلف از نظر آماری معنی‌دار بود. ($p < 0.05$) به‌طور مشخص، گروه نانوالیاف حاوی عصاره نیگلا و گروه SSD نسبت به گروه کنترل منفی و گروه نانوالیاف بدون عصاره اختلاف معنی‌دار نشان دادند،

کاربردهای دارورسانی و ترمیم زخم مناسب می‌سازد. آزمایش رهایش دارو نیز نشان داد که عصاره نیگلاساتیوا در ساعات ابتدایی آزاد می‌شود و پس از ۴۸ ساعت به حدود ۶۹ درصد می‌رسد که نشان‌دهنده روندی نسبتاً سریع در آزادسازی مؤثر ماده مؤثره است. در آزمون ضدباکتری، نانوالیاف حاوی عصاره گیاه عملکرد قابل توجهی در مهار رشد باکتری‌های بیماری‌زا از خود نشان دادند، به‌ویژه در برابر سودوموناس آئروژینوزا (گرم منفی)، که معمولاً در زخم‌های سوختگی مقاوم‌تر است. در نهایت، نتایج به‌دست‌آمده از مدل حیوانی نشان داد که استفاده از نانوالیاف حاوی عصاره نیگلاساتیوا در بهبود زخم‌های سوختگی درجه دو مؤثر بوده، روند ترمیم را نسبت به گروه‌های کنترل به‌طور قابل توجهی بهبود بخشیده است. این یافته‌ها نشان می‌دهند که نانوالیاف PLA حاوی عصاره نیگلاساتیوا، با برخورداری از خواص ضد میکروبی، قابلیت جذب رطوبت مناسب، آزادسازی کنترل شده ترکیبات فعال و عملکرد قابل قبول در ترمیم زخم، قابلیت استفاده به‌عنوان زخم‌پوش زیست‌سازگار برای سوختگی‌های درجه دو را دارند. باین‌حال، انجام مطالعات تکمیلی شامل ارزیابی‌های سلولی، سمیت بلندمدت و بررسی‌های بافت‌شناسی برای تأیید نهایی کاربرد بالینی این سامانه ضروری است.

تقدیر و تشکر

نویسندگان این پژوهش مراتب قدردانی خود را بابت فراهم‌سازی زیرساخت‌ها و امکانات آزمایشگاهی موردنیاز در دانشگاه تهران ابراز می‌دارند. همچنین بدینوسیله نویسندگان از زحمات داوران محترم که با نظرات ارزشمند خود باعث بهبود چشمگیر ویرایش نهایی این مقاله گردیدند، سپاسگزاری و قدردانی می‌نمایند.

تعرض منافع

برای نویسندگان تعارض منافی وجود ندارد.

سهم نویسندگان

پیام زاهدی (تحلیل صوری، تأمین بودجه، پژوهش، مدیریت پروژه، نظارت، نگارش - بازبینی و ویرایش) با سهم ۵۰٪، پارمیدا حریرچی (پردازش و ساماندهی داده‌ها، تحلیل صوری، بررسی و تحقیق، روش‌شناسی) با سهم ۲۵٪، آرمینا نظری (پردازش و ساماندهی داده‌ها، تحلیل صوری، بررسی و تحقیق) با سهم ۱۵٪ و زینب ابراهیمی ال‌تی (گردآوری و ساماندهی داده‌ها، تحلیل صوری، پژوهش، روش‌شناسی، نگارش - پیش‌نویس اولیه) با سهم ۱۰٪ در این پژوهش سهم داشته‌اند.

منابع مالی

از منابع مالی در انجام این پژوهش استفاده نشده است.

بیانیه هوش مصنوعی

در ویرایش چکیده انگلیسی از هوش مصنوعی استفاده شده است.

مراجع

1. K. Szczepanowicz, J. Stefanska, R. P. Socha, and P. Warszynski, Preparation of silver nanoparticles via chemical

ایجاد کنند. این اثر احتمالاً ناشی از ترکیب چند عامل شامل حفظ رطوبت موضع زخم، ساختار متخلخل نانوالیاف، آزادسازی تدریجی ترکیبات فعال و خواص ضدالتهابی و ضد میکروبی عصاره نیگلاساتیوا است. مطالعات مشابه نیز نشان داده‌اند که نانوالیاف PLA حاوی ترکیبات زیست‌فعال می‌توانند از طریق فراهم کردن محیط مرطوب، تسهیل مهاجرت سلولی و کاهش بار میکروبی، روند ترمیم زخم را تسریع کنند [۵، ۷، ۸]، برای مثال، Cai و همکاران [۸] گزارش کردند که زخم‌پوش‌های الکتروریسی شده مبتنی بر PLA موجب تسریع ترمیم زخم و بهبود بازسازی بافت در مدل حیوانی شدند. تحلیل داده‌های کمی مربوط به درصد ترمیم زخم نیز یافته‌های کیفی را تأیید می‌کند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در روز چهاردهم، بیشترین میزان ترمیم زخم مربوط به گروه پماد نقره سولفادیازین (۹۲٪) بود، درحالی‌که گروه نانوالیاف حاوی عصاره نیگلاساتیوا (۸۶٪) عملکرد بهتری نسبت به گروه نانوالیاف بدون عصاره (۷۵٪) و گروه کنترل منفی (۶۹٪) نشان داد. روند بهبود زخم در گروه نانوالیاف حاوی عصاره نیگلا نشان‌دهنده اثر مثبت این ترکیب در تسریع ترمیم نسبت به گروه‌های کنترل منفی و نانوالیاف بدون عصاره است، باین‌حال عملکرد این گروه در مقایسه با پماد نقره SSD در سطح پایین‌تری قرار دارد.

اگرچه SSD دارویی پرکاربرد در درمان زخم‌های سوختگی است، اما استفاده از آن ممکن است با عوارضی همراه باشد؛ از جمله واکنش‌های آلرژیک، تغییر در رطوبت ناحیه زخم و دشواری در شست‌وشوی موضع. ازسوی دیگر، نمدهای نانوالیاف حاوی عصاره نیگلاساتیوا به دلیل ماهیت زیست‌سازگار پلیمر PLA و استفاده از ترکیبات طبیعی، می‌توانند پتانسیل کاهش عوارض جانبی نسبت به برخی داروهای رایج را داشته باشند، هرچند ارزیابی مستقیم عوارض و سمیت در این مطالعه انجام نشده است [۲۲].

در مورد گروه زخم‌های پوشیده‌شده با گاز استریل، میزان بسته‌شدن زخم در پایان دوره ۱۴ روزه کمتر از سایر گروه‌ها بود. این امر احتمالاً به دلیل ایجاد لخته‌های خون خشک و نبود رطوبت کافی در ناحیه زخم بوده است. همچنین، چسبیدن گاز به بافت زخم و آسیب دیدگی حین تعویض پوشش، از دیگر عوامل تأخیر در روند ترمیم است.

نانوالیاف، به‌طور کلی، به دلیل نسبت سطح به حجم بالا دارای جذب آب مؤثر و عبوردهی مناسب بخار آب هستند؛ ویژگی‌هایی که در درمان زخم‌های سوختگی که نیازمند رطوبت مداوم هستند، اهمیت ویژه‌ای دارند. ازسوی دیگر، عملکرد بهتر نانوالیاف حاوی عصاره نیگلا را می‌توان به خواص دارویی این گیاه نسبت داد؛ از جمله اثرات ضدباکتری، ضدالتهاب و گندزد، که در تسریع بهبود زخم نقش مهمی ایفا می‌کنند.

۴ نتیجه‌گیری

بر اساس یافته‌های این پژوهش، مشخص شد که محلول پلی‌لاکتیک اسید در بازه غلظتی ۹ تا ۱۵ درصد وزنی، برای تولید نانوالیاف از طریق الکتروریسی مناسب است و غلظت ۱۲٪ به‌عنوان نقطه بهینه شناسایی شد؛ چرا که در این حالت، نانوالیافی با قطر میانگین حدود ۲۷۰ نانومتر حاصل شد که ساختاری یکنواخت و پایدار داشت. نتایج حاصل از آزمون‌های فیزیکی نشان داد که نانوالیاف تهیه‌شده، قابلیت جذب آب مناسبی دارند و درعین حال از نظر ساختاری مقاوم هستند. این ویژگی‌ها، آن‌ها را برای

- review on antimicrobial effects, *Iranian journal of Basic Medical Sciences*, vol. 17, no. 12, pp. 929, 2014.
20. S. Burt, Essential oils: Their antibacterial properties and potential applications in foods—A review, *International Journal of Food Microbiology*, vol. 94, no. 3, pp. 223-253, 2004.
21. A. Radisavljevic, D. B. Stojanovic, M. Petrovic, V. Radojevic, P. Uskokovic, and M. Rajilic-Stojanovic, Electrospun polycaprolactone nanofibers functionalized with *Achillea millefolium* extract yield biomaterial with antibacterial, antioxidant and improved mechanical properties, *Journal of Biomedical Materials Research Part A*, vol. 111, no. 7, pp. 962-974, 2023.
22. F. W. Fuller, The side effects of silver sulfadiazine, *Journal of Burn Care & Research*, vol. 30, no. 3, pp. 464-470, 2009.
- reduction and their antimicrobial activity, *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, vol. 45, no. 2010, pp. 85-98, 2010.
2. F. N. Cetin, A. Mignon, S. Van Vlierberghe, and K. Kolouchova, Polymer-and lipid-based nanostructures serving wound healing applications: A review, *Advanced Healthcare Materials*, vol. 14, no. 1, pp. 2402699, 2025.
3. P. Zahedi, I. Rezaei, S. O. Ranaei-Siadat, S. H. Jafari, and P. Supaphol, A review on wound dressings with an emphasis on electrospun nanofibrous polymeric bandages, *Polymers for Advanced Technologies*, vol. 21, no. 2, pp. 77-95, 2010.
4. N. Bhardwaj and S. C. Kundu, Electrospinning: A fascinating fiber fabrication technique, *Biotechnology Advances*, vol. 28, no. 3, pp. 325-347, 2010.
5. C. Liu, G. Du, Q. Guo, R. Li, C. Li, and H. He, Fabrication and characterization of polylactic acid electrospun wound dressing modified with polyethylene glycol, rosmarinic acid and graphite oxide, *Nanomaterials*, vol. 13, no. 13, pp. 2000, 2023.
6. M. Ranjbar-Mohammadi and M. Nouri, Production and in vitro analysis of catechin incorporated electrospun gelatin/poly (lactic acid) microfibers for wound dressing applications, *Journal of Industrial Textiles*, vol. 51, no. 5_suppl, pp. 7529S-7544S, 2022.
7. T. T. T. Nguyen, C. Ghosh, S.-G. Hwang, L. D. Tran, and J. S. Park, Characteristics of curcumin-loaded poly (lactic acid) nanofibers for wound healing, *Journal of Materials Science*, vol. 48, no. 20, pp. 7125-7133, 2013.
8. Y. Cai *et al.*, Plant ash/poly(lactic acid) electrospun fiber dressing promotes wound healing through pH regulation, *Nano Biomedicine & Engineering*, vol. 16, no. 4, 2024.
9. A. A. L. Masud, Effect of date of sowing and spacing on growth and seed yield of black cumin (*Nigella sativa* L.), 2021.
10. A. Tavakkoli, V. Mahdian, B. M. Razavi, and H. Hosseinzadeh, Review on clinical trials of black seed (*Nigella sativa*) and its active constituent, thymoquinone, *Journal of Pharmacopuncture*, vol. 20, no. 3, pp. 179, 2017.
11. H. Mashayekhi-Sardoo, R. Rezaee, and G. Karimi, *Nigella sativa* (black seed) safety: An overview, *Asian Biomedicine: Research, Reviews and News*, vol. 14, no. 4, p. 127, 2020.
12. M. A. Rahim *et al.*, A narrative review on various oil extraction methods, encapsulation processes, fatty acid profiles, oxidative stability, and medicinal properties of black seed (*Nigella sativa*), *Foods*, vol. 11, no. 18, pp. 2826, 2022.
13. J. Xue, T. Wu, Y. Dai, and Y. Xia, Electrospinning and electrospun nanofibers: Methods, materials, and applications, *Chemical Reviews*, vol. 119, no. 8, pp. 5298-5415, 2019.
14. B. Tan, Poly (lactic acid) nanocomposites: water barrier properties and electrospinning, Loughborough University, 2016.
15. F. Fattahi, A. Khoddami, and O. Avinc, Poly (lactic acid) nanofibres as drug delivery systems: Opportunities and challenges, *Nanomedicine Research Journal*, vol. 4, no. 3, pp. 130-140, 2019.
16. T. J. Sill and H. A. Von Recum, Electrospinning: applications in drug delivery and tissue engineering, *Biomaterials*, vol. 29, no. 13, pp. 1989-2006, 2008.
17. M. Sharifi, S. A. Sadati, S. H. Bahrami, and S. M. A. Haramshahi, Modeling and optimization of poly (lactic acid)/poly (ε-caprolactone)/*Nigella sativa* extract nanofibers production for skin wounds healing by artificial neural network and response surface methodology models, *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 253, pp. 127227, 2023.
18. A. Ahmad *et al.*, A review on therapeutic potential of *Nigella sativa*: A miracle herb, *Asian Pacific Journal of Tropical Biomedicine*, vol. 3, no. 5, pp. 337-352, 2013.
19. F. Forouzanfar, B. S. F. Bazzaz, and H. Hosseinzadeh, Black cumin (*Nigella sativa*) and its constituent (thymoquinone): A