



# Green-Synthesized PVP/ZnO Nanofibrous Composites Mediated by *Stachys lavandulifolia* Extract: Antibacterial Activity

Alireza Ehsani<sup>1</sup>, Sanaz Alamdari<sup>2\*</sup>, Mohammad Hossein Ehsani<sup>3,\*</sup>

<sup>1</sup>School of Medicine, Semnan University of Medical Sciences, Semnan, Iran

<sup>2</sup>Department of Nanotechnology, Faculty of New Sciences and Technologies, Semnan University, Semnan, Iran

<sup>3</sup>Faculty of Physics, Semnan University, PO Box: 35195-363, Semnan, Iran

Received: 2026-07-17

Revised: 2026-08-11

Accepted: 2026-09-06

**Abstract:** In this study, zinc oxide nanoparticles (ZnO NPs) were successfully synthesized via a green and eco-friendly route using *Stachys lavandulifolia* tea extract and subsequently incorporated onto polyvinylpyrrolidone (PVP) fibers for antimicrobial wound dressing applications. X-ray diffraction (XRD) analysis confirmed the formation of the wurtzite crystalline structure of ZnO NPs alongside the amorphous PVP matrix. Field-emission scanning electron microscopy (FESEM) and energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS) mapping demonstrated the successful immobilization and uniform distribution of ZnO nanoparticles on the fiber surfaces. Antimicrobial evaluation revealed exceptional antibacterial efficacy of the green-synthesized PVP/ZnO fibers against both Gram-positive (*Staphylococcus aureus*) and Gram-negative (*Escherichia coli*) bacteria, achieving complete bacterial elimination within 6 hours. Furthermore, cytocompatibility evaluations highlighted a dose-dependent effect on fibroblast viability, emphasizing the need for optimizing ZnO loading to ensure a safe therapeutic window alongside effective antimicrobial activity. These findings demonstrate that green-synthesized PVP/ZnO composite fibers hold strong potential for application as highly effective, eco-friendly antimicrobial wound dressings.

**Keywords:** Green synthesis, Zinc oxide nanoparticles (ZnO NPs), PVP fibers, Antimicrobial wound dressing

Corresponding Authors. Emails: Ehsani@semnan.ac.ir , s.alamdari@semnan.ac.ir

## How to Cite This Article:

Alamdari S, Ehsani A, Ehsani M H. Green-Synthesized PVP/ZnO Nanofibrous Composites Mediated by *Stachys lavandulifolia* Extract: Antibacterial Activity. Nanomeghyas. 2026;():e741154 (In Persian). doi: 10.22034/ns.2026.2105096.1448



This is an open access article under the CC-BY license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

# سنتز سبز الیاف نانوکامپوزیتی PVP/ZnO با عصاره چای کوهی و ارزیابی فعالیت ضد میکروبی آن‌ها

علیرضا احسانی<sup>۱</sup>، ساناز علمداری<sup>۲\*</sup>، محمد حسین احسانی<sup>۳\*</sup>

<sup>۱</sup>دانشکده پزشکی، دانشگاه علوم پزشکی سمنان، سمنان، ایران

<sup>۲</sup>دانشکده نانوفناوری، پردیس علوم و فناوری‌های نوین فناوری‌های، دانشگاه سمنان، ایران

<sup>۳</sup>دانشکده فیزیک، دانشگاه سمنان، صندوق پستی: ۳۵۱۹۵-۳۶۳، سمنان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۴/۲۶ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۵/۲۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۱۵

**چکیده:** در این پژوهش، نانوذرات اکسید روی (ZnO) با استفاده از عصاره گیاهی چای کوهی (*Stachys lavandulifolia*) به روشی دوستدار محیط زیست (سنتز سبز) تهیه شده و سپس روی الیاف پلی وینیل پیرولیدون (PVP) جهت کاربرد در زخم پوش‌های ضد میکروبی تثبیت گردیدند. آنالیز الگوی پراش پرتو ایکس (XRD) تشکیل فاز کریستالی وورترزیت نانوذرات ZnO و ساختار آمورف الیاف را تأیید کرد. بررسی‌های مورفولوژی با میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM) و آنالیز توزیع عناصری (EDS Mapping) نشان‌دهنده تثبیت موفقیت‌آمیز و توزیع یکنواخت نانوذرات روی بستر لیفی PVP بودند. ارزیابی‌های ضد میکروبی نشان داد که الیاف PVP/ZnO عملکرد فوق‌العاده‌ای در مهار رشد باکتری‌های گرم مثبت (*Staphylococcus aureus*) و گرم منفی (*Escherichia coli*) داشته و توانستند در مدت زمان ۶ ساعت، بار باکتریایی را به طور کامل از بین ببرند. همچنین ارزیابی سمیت سلولی نشان داد که زیست‌سازگاری الیاف به غلظت نانوذرات وابسته است و بهینه‌سازی بارگذاری ZnO برای دستیابی به پنجره دوز ایمن و هم‌زمان فعالیت ضد میکروبی مؤثر ضروری است این نتایج نشان می‌دهد که الیاف نانوکامپوزیتی PVP/ZnO سنتز شده به روش سبز، پتانسیل بالایی به عنوان زخم پوش‌های ضد میکروبی کارآمد و زیست‌سازگار دارند.

**واژگان کلیدی:** سنتز سبز، نانوذرات اکسید روی، الیاف PVP، زخم پوش ضد میکروبی

نویسندگان مسئول: Ehsani@semnan.ac.ir ، s.alamdari@semnan.ac.ir

**نحوه استناد به این مقاله:** علمداری ساناز، احسانی علیرضا، احسانی محمد حسین. سنتز سبز الیاف نانوکامپوزیتی PVP/ZnO با عصاره چای کوهی و ارزیابی فعالیت ضد میکروبی آن‌ها. Nanomeghyas. 1405;(0):e741154. doi: 10.22034/ns.2026.2105096.1448



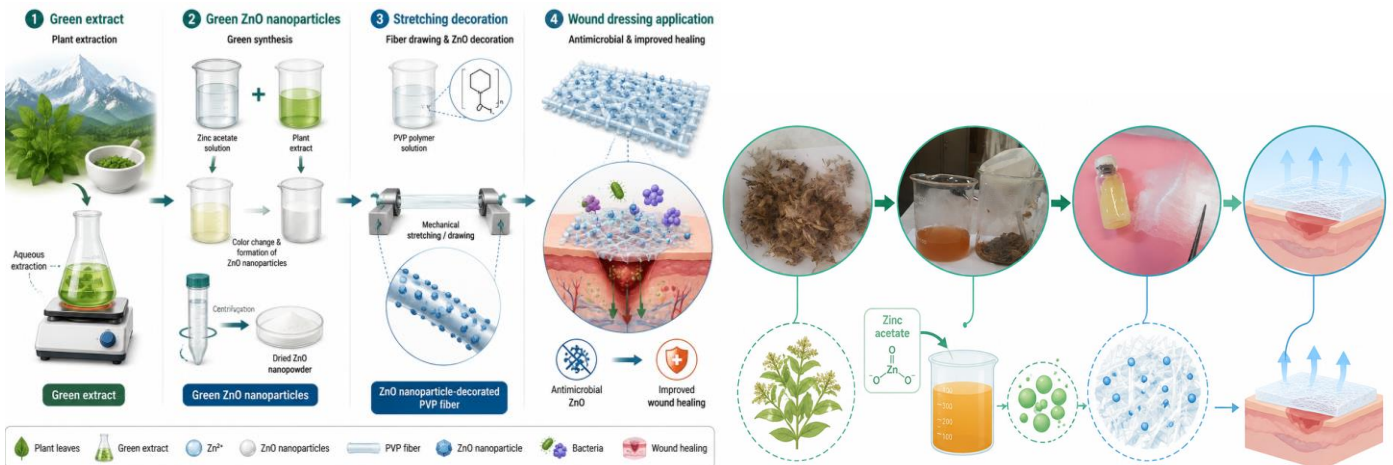
حضور روغن کرچک نیز در کنار ZnO، به تقویت ویژگی‌های ترمیم‌کنندگی و عملکرد زیستی سامانه کمک کرد [۱].

همچنین، یک هیدروژل تزریقی و خودترمیم‌شونده بر پایه پکتین و فیبروئین ابریشم تهیه شد که در آن نانوذرات ZnO پوشش داده شده با اسید گالیک جای‌گذاری شده بود [۲]. اتصال عرضی آنزیمی این هیدروژل، بهبود خواص مکانیکی، قابلیت تزریق و خودترمیمی را فراهم کرد. نتایج این مطالعه نشان داد که حضور نانوذرات ZnO@GA موجب افزایش فعالیت ضدباکتریایی، به‌ویژه علیه *Staphylococcus aureus*، و بهبود بسته‌شدن زخم در مدل حیوانی شد [۲]. در مطالعه‌ای دیگر، فیلم هیدروژلی کربوکسی‌متیل سلولز/پلی‌وینیل‌الکل حاوی نانوذرات ZnO دوپ شده با نقره برای کاربردهای زخم‌پوشی توسعه داده شد [۳]. دوپ کردن ZnO با نقره با هدف ارتقای فعالیت ضد میکروبی و بهبود عملکرد محافظتی فیلم انجام گرفت. استفاده از ماتریس‌های پلیمری آب‌دوست در این پژوهش، ضمن کمک به حفظ رطوبت محیط زخم، بستری مناسب برای توزیع یکنواخت نانوذرات و رهایش عوامل فعال فراهم کرد [۳].

از سوی دیگر، الیاف پلی‌کاپرولاکتون حاوی نانوذرات ZnO با استفاده از یک لایه پلیمری کربوکسیله اصلاح شدند و کلرگزیدین بر سطح آن‌ها تثبیت شد [۴]. این طراحی، ترکیبی از ساختار الیافی مناسب برای تقلید ماتریس خارج سلولی، اثر ضدباکتریایی ZnO و عملکرد ضد عفونی‌کنندگی کلرگزیدین را فراهم ساخت. نتایج این پژوهش اهمیت اصلاح سطح الیاف و تثبیت عوامل ضد میکروبی را برای افزایش کارایی زخم‌پوش‌های نانوالیافی نشان می‌دهد [۴]. در پژوهش حاضر، نانوذرات اکسید روی با استفاده از عصاره چای کوهی و از طریق مسیر سنتز سبز تهیه شدند. سپس، این نانوذرات بر سطح الیاف PVP حاصل از فرآیند کشش تثبیت و تزئین گردیدند. در ادامه، ویژگی‌های ساختاری، فازی، شیمیایی و مورفولوژیکی نانوذرات و پوشش نانوالیافی حاصل بررسی شد و عملکرد ضد میکروبی آن‌ها در برابر باکتری‌های منتخب مورد ارزیابی قرار گرفت. هدف اصلی این مطالعه، بررسی اثر حضور و توزیع نانوذرات ZnO بر ویژگی‌های ساختاری الیاف PVP و تعیین ظرفیت سامانه هیبریدی حاصل برای استفاده به‌عنوان پوشش زخم است. انتظار می‌رود تلفیق مزایای سنتز سبز، فعالیت ضد میکروبی اکسید روی و ویژگی‌های منحصربه‌فرد شبکه‌های الکتروسی‌شده، به تولید پوششی منجر شود که از نظر ساختاری پایدار، از نظر زیستی فعال و برای توسعه نسل جدید زخم‌پوش‌های نانوساختار مناسب باشد.

فیزیکی متداول ممکن است به مصرف انرژی بالا، استفاده از مواد احیاکننده و پایدارکننده خطرناک و تولید محصولات جانبی نامطلوب منجر شوند. به همین دلیل، سنتز سبز نانوذرات با استفاده از منابع گیاهی به‌عنوان رویکردی ساده‌تر، کم‌هزینه‌تر و سازگارتر با محیط‌زیست مورد توجه قرار گرفته است. عصاره‌های گیاهی حاوی ترکیبات زیست‌فعالی مانند فنول‌ها، فلاونوئیدها، ترپنوئیدها، آلکالوئیدها و سایر مولکول‌های دارای گروه‌های فعال هستند. این ترکیبات می‌توانند در کاهش گونه‌های روی، تشکیل هسته‌های اولیه، کنترل رشد ذرات و پایدارسازی سطح نانوذرات ZnO نقش ایفا کنند. چای کوهی به‌عنوان منبعی گیاهی از ترکیبات فعال زیستی، ظرفیت مناسبی برای استفاده در سنتز سبز نانوذرات اکسید روی دارد. ترکیبات موجود در عصاره این گیاه می‌توانند از طریق برهم‌کنش با گونه‌های روی، بر جوانه‌زنی، رشد، اندازه، شکل و ویژگی‌های سطحی نانوذرات ZnO اثرگذار باشند. همچنین، حضور گروه‌های عاملی گیاهی بر سطح نانوذرات ممکن است موجب بهبود پایداری آن‌ها و ایجاد برهم‌کنش‌های مطلوب با زنجیره‌های پلیمری شود. باین‌حال، ترکیب شیمیایی عصاره‌های گیاهی به عواملی مانند شرایط رشد، زمان برداشت، بخش مورد استفاده گیاه، روش استخراج، دما و زمان فرآیند وابسته است؛ بنابراین، بررسی دقیق ویژگی‌های ساختاری و شیمیایی نانوذرات سنتز شده با این روش، برای تبیین سازوکار تشکیل و عملکردین سازوکار تشکیل و عملکرد آن‌ها ضرورت دارد. تلفیق نده به روش سبز با الیاف PVP می‌تواند به تولید یک سامانه نانوساختار هیبریدی با عملکرد چندگانه منجر شود. با وجود مطالعات متعدد درباره نانوذرات اکسید روی و ساختارهای الکتروسی‌شده، هنوز چالش‌هایی در زمینه کنترل هم‌زمان اندازه و پراکندگی نانوذرات، حفظ پیوستگی الیاف، بهینه‌سازی برهم‌کنش میان اجزای سامانه و دستیابی به فعالیت ضد میکروبی مؤثر وجود دارد. افزون بر این، استفاده از روش‌های سنتز سبز و منابع گیاهی می‌تواند مسیر توسعه مواد زیستی پایدار و کم‌خطر را هموار کند. از این رو، طراحی پوشش‌های الیافی بر پایه PVP و نانوذرات ZnO سنتز شده با عصاره چای کوهی، رویکردی ارزشمند برای دستیابی به مواد فعال و چندمنظوره در کاربردهای مرتبط با زخم محسوب می‌شود.

ر سال‌های اخیر، توسعه زخم‌پوش‌های پلیمری حاوی نانوذرات اکسید روی به دلیل برخورداری هم‌زمان از فعالیت ضد میکروبی، زیست‌سازگاری و توانایی تسریع فرایند ترمیم زخم، مورد توجه گسترده قرار گرفته است [۱]. در این زمینه، یک نانوکامپوزیت بر پایه کیتوسان کواترنایز شده، روغن کرچک و ZnO طراحی شد. این سامانه با ایجاد رهایش کنترل شده اجزای فعال، اثرات ضدباکتریایی، ضدقارچی و ضدیوفیلیم مناسبی نشان داد و به‌عنوان گزینه‌ای امیدوارکننده برای زخم‌پوش‌های پیشرفته معرفی شد.



شکل ۱: نمایش شماتیک از روش سنتز نانوذرات و ساخت الیاف

۳۶ درجه (مربع) مؤید قرارگیری موفق نانوذرات ZnO روی ساختار الیاف است.

## ۲- روش تجربی

برگ‌های خشک‌شده چای کوهی آسیاب و به نسبت ۱۰ گرم در ۱۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر، به مدت ۲ ساعت در دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد استخراج شدند. عصاره پس از صاف کردن با کاغذ واتمن شماره ۱، در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد نگهداری شد.

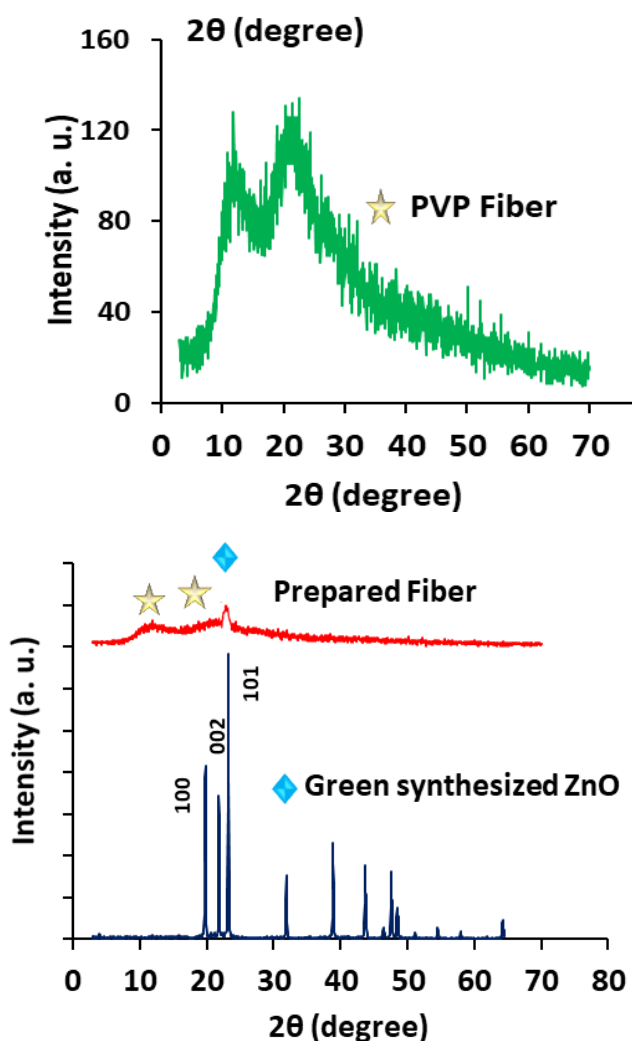
مقدار ۲/۲ گرم روی استات دوآبه در آب مقطر حل و به مدت ۳۰ دقیقه هم زده شد. سپس ۵ میلی‌لیتر عصاره گیاهی در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد افزوده و مخلوط به مدت ۲ ساعت هم زده شد. رسوب تشکیل شده با سانتریفیوژ جدا، شست‌وشو و در آون خشک شد. در ادامه، نمونه خشک‌شده در دمای ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲ ساعت کلسینه گردید [۱].

مقدار مشخصی از نانوذرات ZnO سبز سنتز شده در محلول PVP پراکنده شد. محلول حاصل با روش کشش مکانیکی به الیاف تبدیل گردید. این فرایند موجب تشکیل الیاف PVP و توزیع نانوذرات ZnO روی سطح و درون ساختار الیاف شد.

فعالیت ضدباکتریایی الیاف PVP/ZnO علیه *Staphylococcus aureus* و *Escherichia coli* با روش انتشار در آگار و شمارش کلونی بررسی شد.

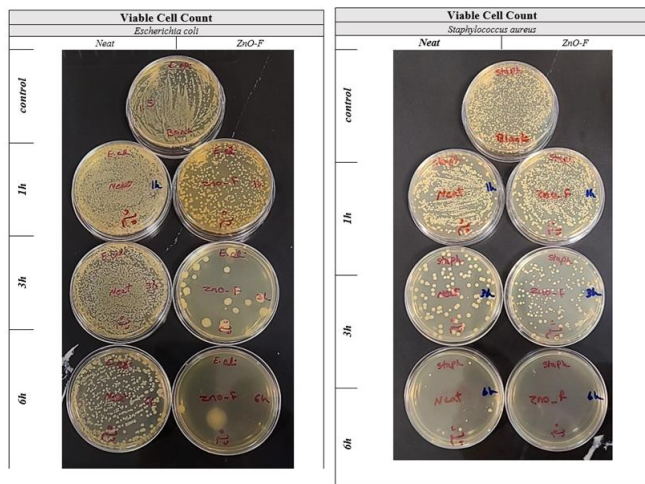
## ۳- نتایج و بحث

شکل ۲، الگوهای پراش پرتو ایکس (XRD) الیاف خالص PVP (سمت بالا)، نانوذرات ZnO سبز سنتز شده و الیاف آماده شده (سمت پایین) را نشان می‌دهد. در سمت پایین، دو پیک پهن در زوایای حدود ۱۳ و ۲۲ درجه مربوط به ساختار نیمه بلوری و ماهیت آمورف پلیمر PVP است. در سمت راست، پیک‌های تیز و شدید نانوذرات ZnO در زوایای ۲ برابر ۳۱/۱، ۳۴/۴ و ۳۶/۲ درجه به ترتیب منطبق بر صفحات بلوری (۱۰۰)، (۰۰۲) و (۱۰۱) بوده و حاکی از فاز بلوری وورتزیت ZnO با خلوص بالا است [۴۵]. در الگوی XRD آمورف PVP (ستاره‌ها)، ظهور پیک ضعیف در حدود



شکل ۲. الگوهای پراش پرتو ایکس (XRD) مربوط به الیاف PVP خالص، الیاف تهیه شده و نانوذرات ZnO سنتز شده به روش سبز.

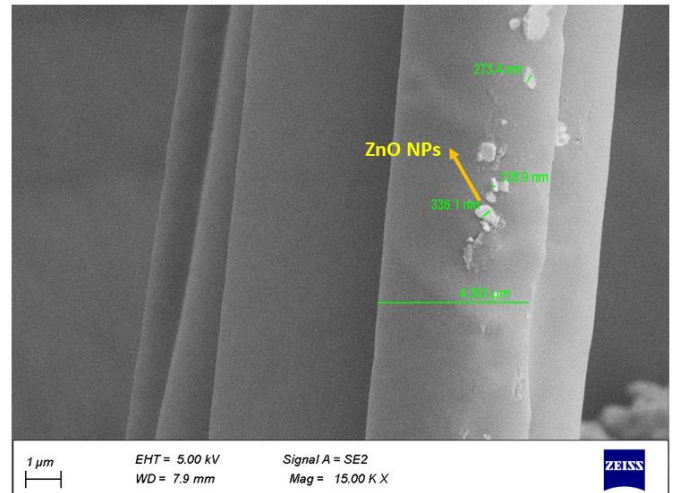
کردند (کاهش لگاریتمی بیش از ۴)؛ با این حال، رفتار دو نمونه در برابر باکتری گرم منفی *E. coli* کاملاً متفاوت بود، به گونه‌ای که الیاف-ZnO-F با کاهش ۹۹ درصدی در ۳ ساعت (کاهش لگاریتمی ۲) و حذف کامل جمعیت باکتریایی در ۶ ساعت بیش از ۹۹/۹۹٪ عملکرد چشمگیری داشت، در حالی که الیاف خالص (Neat) در همان مدت تنها ۵۰٪ کاهش رشد نشان داد. این برتری به آزادسازی یون‌های  $Zn^{2+}$  و تولید گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) توسط نانوذرات ZnO نسبت داده می‌شود که با تخریب غشای سلولی و اختلال در متابولیسم باکتری منجر به مرگ سلولی می‌شود. تصاویر شمارش کلنی در شکل ۵ نیز روند کاهش تدریجی کلنی‌ها با افزایش زمان تماس، به‌ویژه در نمونه ZnO-F، را به‌وضوح تأیید می‌کند.



شکل ۵. تصاویر پلیت‌های آگار مربوط به شمارش سلول‌های زنده نمونه‌های Neat و ZnO-F در تماس با *E. coli* سمت چپ و *S. aureus* سمت راست پس از ۱، ۳ و ۶ ساعت

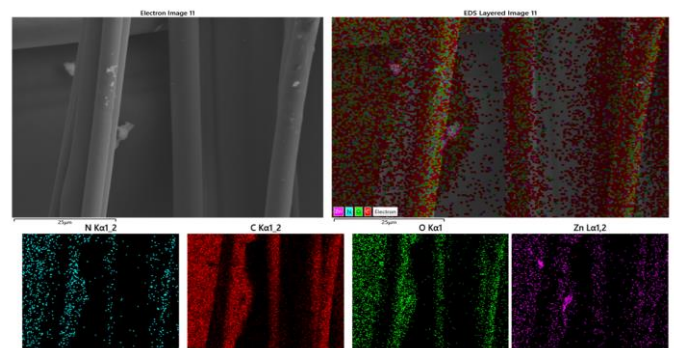
به‌منظور بررسی پیش‌مقدماتی زیست‌سازگاری، اثر عصاره الیاف PVP/ZnO بر زنده‌مانی سلول‌های فیبروبلاست پوستی با رنگ‌آمیزی بنفش کریستال پس از ۴۸ ساعت مواجهه ارزیابی شد (شکل ۶). در نمونه شاهد، تراکم سلولی هم‌رفتاری با زنده‌مانی حداکثری مشاهده شد، در حالی که در مواجهه با الیاف حاوی نانوذرات ZnO، کاهش محسوسی در تعداد سلول‌های رنگ‌گیری‌شده و تکثیر سلولی مشاهده گردید. این رفتار را می‌توان به آزادسازی یون‌های روی و گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) در محیط کشت نسبت داد که در غلظت‌های بالا فراتر از آستانه تحمل سلولی عمل می‌کنند.

شکل ۳، تصاویر FESEM الیاف تهیه‌شده را نشان می‌دهد. بر اساس تصاویر، الیاف دارای ساختار پیوسته و نسبتاً یکنواخت با قطر متوسط حدود ۳/۴ میکرومتر هستند که به روش کشش مکانیکی شکل گرفته‌اند. نانوذرات کروی ZnO (فلش نارنجی) با اندازه‌ای در حدود ۱۸۰ نانومتر و برخی خوشه‌های درشت‌تر (حدود ۳۸۰ نانومتر) به‌طور موفقیت‌آمیزی بر سطح الیاف تثبیت شده‌اند.



شکل ۳. تصاویر FESEM الیاف PVP/ZnO تهیه‌شده به روش کشش

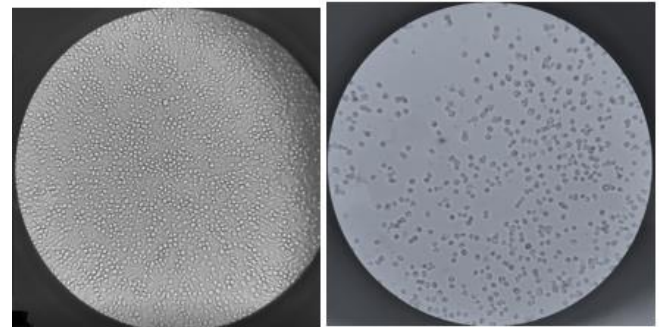
شکل ۴، نقشه‌های نگاشت عنصری (EDS mapping) الیاف تهیه‌شده را نشان می‌دهد. توزیع یکنواخت عناصر کربن، نیتروژن و اکسیژن در کل ساختار، مؤید تشکیل بستر پلیمری PVP است. نقشه مربوط به روی نیز حضور نقطه‌ای و پراکنده نانوذرات ZnO را بر سطح الیاف نشان می‌دهد که با تصاویر FESEM انطباق خوبی دارد. هم‌پوشانی سیگنال Zn با نواحی اکسیژن‌دار، تثبیت موفق نانوذرات ZnO روی بستر PVP را تأیید می‌کند. به‌دلیل درصد اتمی پایین نانوذرات نسبت به ماتریس پلی‌ماتریس پلیمری، شدت سیگنال‌تر از عناصر سازنده PVP است.



شکل ۴. تصویر الکترونی و نگاشت عنصری EDS الیاف PVP/ZnO

نتایج فعالیت ضد میکروبی نمونه‌ها در شکل ۵ ارائه شده است. هر دو نمونه، رشد باکتری گرم مثبت *S. aureus* را پس از ۶ ساعت به‌طور کامل مهار

کامپوزیتی تأیید نمود. الیاف PVP/ZnO در مقایسه با الیاف خالص، فعالیت ضد میکروبی قابل توجهی علیه باکتری‌های *Staphylococcus aureus* و *Escherichia coli* نشان دادند. این عملکرد را می‌توان به آزادسازی یون‌های  $Zn^{2+}$ ، تولید گونه‌های فعال اکسیژن و برهم‌کنش نانوذرات با غشای سلولی نسبت داد. در مجموع، نتایج نشان می‌دهند که الیاف PVP/ZnO سبزشسته، به دلیل ترکیب ساختار لیفی، زیست‌سازگاری پلیمر و خاصیت ضد میکروبی ZnO، ظرفیت مناسبی برای استفاده در زخم‌پوش‌های ضد میکروبی دارند. بالین‌حال، انجام آزمون‌های زیست‌سازگاری سلولی، سمیت، جذب ترشحات و ارزیابی عملکرد در شرایط *in vivo* برای تأیید کاربرد بالینی این زخم‌پوش ضروری است. ساختار الیافی PVP/ZnO در این تحقیق با وجود استفاده از روشی کاملاً سبز و بدون نیاز به مواد شیمیایی حواسط یا فلزات گران‌بها (نظیر نقره)، بازدهی ضد میکروبی مشابه و حتی در سرعت کشندگی باکتری‌های گرم منفی (*E. coli*) عملکرد بالاتری نشان داده است. علاوه بر این، در مقایسه با الیاف PCL حاوی ZnO که توسط Makarets و همکاران (۲۰۲۶) اصلاح سطحی شده بودند، بستر PVP به دلیل زیست‌سازگاری بالا و قابلیت رهایش سریع تر یون‌های روی در محیط مرطوب، پتانسیل بالاتری برای ایجاد پاسخ ضد میکروبی سریع در ساعات اولیه آسیب‌دیدگی فراهم می‌کند. این امر بر مزیت تلفیق سنتز سبز پایه گیاهی با بستر نانوالیافی PVP در دستیابی به زخم‌پوش‌های ضد میکروبی کارآمد و کم‌خطر تأکید دارد.”



Control

Prepared Fiber  
48 hour

شکل ۶. تصاویر مربوط به بررسی سمیت سلولی

#### ۴- نتایج و بحث

در این پژوهش، نانوذرات ZnO با استفاده از عصاره چای کوهی به روش سبز سنتز و سپس روی الیاف PVP به روش کشش تثبیت شدند. نتایج XRD تشکیل ساختار بلوری وورتزیت ZnO و حضور هم‌زمان فاز پلیمری PVP را تأیید کرد. تصاویر FESEM نشان دادند که نانوذرات ZnO با توزیع نسبتاً مناسب روی سطح الیاف قرار گرفته‌اند؛ همچنین، نقشه‌برداری EDS حضور و توزیع عناصر C, N, O و Zn را در ساختار

Macromolecules, 357, 151610.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2026.151610>

[2] Mashhadi, R., Nourmohammadi, J., & Tavakol, M. (2026). Enzymatically crosslinked pectin–silk fibroin hydrogel with embedded ZnO@gallic acid nanoparticles: An injectable, self-healing, and antibacterial wound dressing. *International Journal of Biological Macromolecules*, 349, 150823. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2026.150823>

[3] Sachin, K. S., Koshy, J. T., & Sangeetha, D. (2025). Development of Ag doped ZnO nanoparticle loaded carboxymethyl cellulose/polyvinyl alcohol hydrogel film for enhanced wound dressing. *Inorganic Chemistry Communications*, 178(Part 2), 114606. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2025.114606>

[4] Makarets, Y. A., Kotyakova, K. Y., Permyakova, E. S., Ivankova, Y. I., Narzullov, U. U., Karshieva, S. S., Ignatov, S. G., Slukin, P. V., & Shtansky, D. V. (2026). Chlorhexidine surface-immobilized via a carboxylated polymer layer on

#### تقدیر و تشکر

نویسندگان بدین‌وسیله مراتب تشکر صمیمانه خود را از دکتر امید ترخانه بابت راهنمایی‌های ارزشمندشان در طول انجام این پژوهش اعلام می‌دارند.

#### عدم تعارض منافع

نویسندگان این مقاله بدین‌وسیله اعلام می‌دارند که در ارتباط با انجام، تحلیل، نگارش و انتشار این پژوهش، هیچ‌گونه تعارض منافع مالی، شخصی، علمی یا سازمانی وجود ندارد.

#### مراجع

[1] Nabil, Y., Atta, A. H., Abd Elwahab, N. H., et al. (2026). Castor oil/ZnO-loaded quaternized chitosan nanocomposite with multiple antimicrobial, anti-biofilm and pro-healing functions for advanced wound dressings. *International Journal of Biological*

ZnO nanoparticle-containing polycaprolactone fibers for wound dressings. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 18(24), 34375–34401. <https://doi.org/10.1021/acsami.6c10639>

[5] Nasiri jahroudi F, Mirzaee O, Alamdari S, Majlesara M H. Green Synthesis of ZnO Nanocomposites Using Wild Mentha pulegium Extract for Packaging Appilication. *Nanomeghyas*. 2022;9(1):146-152 (In Persian).

[6] Gupta, V., Yadav, R., Tanwar, R., & Gaikwad, K. K. (2023).  $\kappa$ -Carrageenan-based bio-nanocomposite film reinforced with cellulose nanocrystals derived from amla pomace for food packaging. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 13(18) 16899–16908.

<https://doi.org/10.1007/s13399-022-02700-4>

[7] Shahbazi, M., Rajabzadeh, G., Ettelaie, R., & Rafe, A. (2016). Kinetic study of  $\kappa$ -carrageenan degradation and its impact on mechanical and structural properties of chitosan/ $\kappa$ -carrageenan film. *Carbohydrate Polymers*, 142, 167–176.

<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.01.037>

[8] Lin, Y., Qiao, C., Zhao, Z., Xia, Y., Zhao, G., & Xue, Z. (2023). Fabrication and characterization of carrageenan/ZnO/chitosan composite films. *Langmuir*, 39(22) 7930–7938.

<https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.3c00697>

[8] Arifin, H. R., Djali, M., Nurhadi, B., Azlin-Hasim, S., Masruchin, N., Vania, P. A., & Hilmi, A. (2022). Corn starch-based

bionanocomposite film reinforced with ZnO nanoparticles and different types of plasticizers. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 6.

<https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.968079>

[10] Jayakumar, A., V, H. K., S, S. T., Joseph, M., Mathew, S., G, P., Nair, I. C., & K, R. E. (2019). Starch-PVA composite films with zinc-oxide nanoparticles and phytochemicals as intelligent pH sensing wraps for food packaging application.

*International Journal of Biological Macromolecules*, 136, 395–403.

<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.06.089>



# Green-Synthesized PVP/ZnO Nanofibrous Composites Mediated by *Stachys lavandulifolia* Extract: Antibacterial Activity

Alireza Ehsani<sup>1</sup>, Sanaz Alamdari<sup>2\*,3</sup>, Mohammad Hossein Ehsani<sup>3,\*</sup>

<sup>1</sup>School of Medicine, Semnan University of Medical Sciences, Semnan, Iran

<sup>2</sup>Department of Nanotechnology, Faculty of New Sciences and Technologies, Semnan University, Semnan, Iran

<sup>3</sup>Faculty of Physics, Semnan University, PO Box: 35195-363, Semnan, Iran

Received: 2026-07-17

Revised: 2026-08-11

Accepted: 2026-09-06

**Abstract:** In this study, zinc oxide nanoparticles (ZnO NPs) were successfully synthesized via a green and eco-friendly route using *Stachys lavandulifolia* tea extract and subsequently incorporated onto polyvinylpyrrolidone (PVP) fibers for antimicrobial wound dressing applications. X-ray diffraction (XRD) analysis confirmed the formation of the wurtzite crystalline structure of ZnO NPs alongside the amorphous PVP matrix. Field-emission scanning electron microscopy (FESEM) and energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS) mapping demonstrated the successful immobilization and uniform distribution of ZnO nanoparticles on the fiber surfaces. Antimicrobial evaluation revealed exceptional antibacterial efficacy of the green-synthesized PVP/ZnO fibers against both Gram-positive (*Staphylococcus aureus*) and Gram-negative (*Escherichia coli*) bacteria, achieving complete bacterial elimination within 6 hours. Furthermore, cytocompatibility evaluations highlighted a dose-dependent effect on fibroblast viability, emphasizing the need for optimizing ZnO loading to ensure a safe therapeutic window alongside effective antimicrobial activity. These findings demonstrate that green-synthesized PVP/ZnO composite fibers hold strong potential for application as highly effective, eco-friendly antimicrobial wound dressings.

**Keywords:** Green synthesis, Zinc oxide nanoparticles (ZnO NPs), PVP fibers, Antimicrobial wound dressing

Corresponding Authors. Emails: Ehsani@semnan.ac.ir , s.alamdari@semnan.ac.ir

## How to Cite This Article:

Alamdari S, Ehsani A, Ehsani M H. Green-Synthesized PVP/ZnO Nanofibrous Composites Mediated by *Stachys lavandulifolia* Extract: Antibacterial Activity. Nanomeghyas. 2026;():e741154 (In Persian). doi: 10.22034/ns.2026.2105096.1448



This is an open access article under the CC-BY license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4/>)

