مطالعه مقایسه‌ای کارایی خواص ضدباکتری پارچه‌های پنبه‌ای پوشش‌دهی شده با نانوساختارهای اکسیدروی، گرافن‌اکسید و دی‌سولفید مولیبدن

محبوبه اسرافیلیان[۱]، حکیمه زارع*[۲]، محمد رضا سید میر[۱]، فاطمه استواری[۲]، محمد علی شیرغلامی[۱]

[۱]گروه مهندسی نساجی، واحد یزد،دانشگاه آزاد اسلامی، یزد، ایران

[۲]گروه حالت حالت جامد، دانشکده فیزیک، دانشگاه یزد. یزد. ایران

چکیده

با وجود مزایای پارچه‌های پنبه‌ای مانند جذب رطوبت بالا، زیست سازگاری و لطافت، رشد میکروارگانیسم‌ها در الیاف پنبه‌ای، باعث ایجاد بو و تکثیر عوامل بیماری زا می‌شود؛ لذا تولید منسوجات ضدباکتری، یک هدف پژوهشی مهم و راهبرید است. در پژوهش حاضر، از ساختارهای اکسیدروی، گرافن‌اکسید و دی‌سولفید مولیبدن به منظور پوشش دهی پارچه‌های پنبه‌ای استفاده شد. از دستگاهای مختلف مانند میکروسکوپ الکترونی‌عبوری، پراش اشعه ایکس، طیف سنج نوری برای بررسی ویژگی‌های فیزیکی و ساختاری نانومواد استفاده شد. یافته‌ها حاکی از آن است که نانوذرات اکسید روی دارای ساختار بلوری ورتزیت با میانگین اندازه ۲۰ نانومتر هستند. همچنین، گرافن اکسید و دی‌سولفید مولیبدن از صفحات با ابعاد میکرومتری و ۱۵۰ نانومتر تشکیل شده‌اند. بعد از پوشش‌دهی پارچه‌ها با نانوساختارها، ریز ساختار، ترشوندگی و خواص ضد باکتری آنها در برابر دو سویه باکتری استافیلوکوکوس اورئوس (گرم مثبت) و اشرشیاکلی (گرم منفی) بررسی شد. نتایج نشان داد پارچه‌های پوشش داده شده با دی سولفید مولیبدن و نانوذرات اکسید روی به ترتیب، دارای بزرگتری قطر هاله عدم رشد در مقابل باکتری‌های استافیلوکوکوس اورئوس و اشرشیاکلی هستند. پارچه‌های اصلاح شده با گرفن اکسید که دارای کمترین ترشوندگی هستند عملکرد ضد باکتری پایین تری داشتند. بررسی پایداری شستشوی پارچه‌ها نشان داد پارچه‌های اصلاح شده با دی سولفید مولیبدن عملکرد ضد باکتری بهتری داشت. پارچه‌های پوشش داده شده با گرافن اکسید دارای مقاومت سایشی بالاتری بودند. بر اساس نتایج، نانوساختار مولیبدن دی سولفید ،به عنوان یکی از پوشش‌های ضدباکتری پایدار در منسوجات پیشنهاد می‌شود.

واژه‌های کلیدی: *آنتی باکتریال، نانوساختار، اکسیدروی، گرافن‌اکسید، دی‌سولفید مولیبدن، پارچه پنبه‌ای*

ایمیل نویسنده مسئول: hzare@yazd.ac.ir

تاریخ دریافت : ۱۴۰۵/۰۶/۱۸ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۷/۱۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۸/۰۹

۱--مقدمه

در حال حاضر، منسوجات در حوزه بهداشت و سلامت نقش مهمی را در زندگی ایفا می‌کنند. پارچه‌ها به دلیل داشتن ویژگی‌هایی مانند سطح ویژه و جذب رطوبت بالا، شرایط را برای رشد و تکثیر عوامل بیماری‌زا فراهم می‌کنند [۳-۱]. عوامل بیماری‌زا، از طریق سطوح آلوده پارچه در محیط‌های بیمارستانی و عمومی به راحتی منتقل می‌شود که می‌تواند باعث شیوع بیماری و حتی مرگ و میر شود. لذا توسعه منسوجات با خاصیت ضدباکتری ضروری است [۵ و۴].

در دهه اخیر، استفاده بی‌رویه آنتی‌بیوتیک‌ها باعث افزایش مقاومت باکتری‌ها شده است [۹-۶]. این مسئله، یکی از چالش‌های مهم در حوزه سلامت و بهداشت عمومی در سطح بین‌المللی محسوب می‌شود که لزوم توسعه مواد خوداستریل‌کننده نوین و مؤثر را برجسته می‌سازد. اخیرا، با توسعه‌ی نانوفناوری، سازوکارهای جدیدی، برای توسعه‌ی منسوجات ضدباکتری گزارش شده است [۱۱و۱۰].

نانوساختارها به عنوان سدی فعال در برابر آلودگی‌های میکروبی، توجه بسیاری از محققان را به خود جلب کرده‌است. به بیان دیگر، برخورداری نانوساختارها از خواص فیزیکی و شیمیایی منحصر به فرد و نسبت سطح به حجم بالا، آن‌ها را به گزینه‌ای کارآمد برای حذف باکتری‌ها تبدیل کرده است [۱۵-۱۲]. در میان نانوساختارهای ضدباکتری، اکسید روی (از طریق آزادسازی یون‌ها وتولید گونه‌های فعال اکسیژن) [۱۷ و۱۶]، دی‌سولفید مولیبدن (به دلیل ساختار دوبعدی، خواص کاتالیزوری و ایجاد برش فیزیکی در غشا) [۱۸-۲۱] و گرافن اکسید (به واسطه برش فیزیکی و ایجاد استرس اکسیداتیو و تنش موضعی) [۲۲-۲۵] بیشترین توجه پژوهشگران را به خود جلب کرده‌اند.

بررسی سازوکار ضدباکتری نانوساختارها از اهمیت بسزایی برخوردار است. زمانی که از نانوساختارها به عنوان عامل پوششی در صنایع مختلف مانند شیشه، نساجی و فلز استفاده می‌شوند رفتارهای ترشوندگی متفاوتی را نشان می‌دهند. در این میان، علاوه بر نوع سازوکار ضدباکتری نانوساختارها، ویژگی‌های ترشوندگی بر میزان عملکرد ضدباکتری آنها دارای اهمیت است که در پژوهش‌ها کمتر به آن پرداخته شده است. لذا با وجود پژوهش‌های گسترده بر روی هر یک ازاین نانوساختارها، هنوز شکاف مطالعاتی قابل توجهی در زمینه مقایسه عملکرد هر یک از آنها بر روی یک زمینه و شرایط یکسان وجود دارد. لذا بررسی دقیق و نظام‌مند سازوکارهای ضدباکتری نانوساختارها و خواص سطحی پارچه‌های پوشش داده‌شده مانند آبدوستی، در مواجهه با باکتری‌های گرم منفی وگرم مثبت برای مهندسی منسوجات هوشمند دارای اهمیت بسزایی است.

در این پژوهش، بررسی مقایسه‌ای خواص ضدباکتری پارچه‌های پوشش‌دهی شده با گرافن‌اکسید، اکسیدروی و دی‌سولفیدمولیبدن هدف‌گذاری شده است. ابتدا پارچه‌ها به روش غوطه‌وری و پدینگ پوشش داده شدند و مورفولوژی نانوساختارها قبل و بعد از پوشش‌دهی پارچه بررسی شدند همچنین با استفاده از آزمون هاله عدم رشد و زاویه تماس، به بررسی عملکرد ضدباکتری آنها در مقابل باکتری‌های گرم منفی و مثبت پرداخته شد.

۲- بخش تجربی

۲-۱ مواد مصرفی

در این پژوهش از پارچه ۱۰۰ درصد پنبه‌ای با بافت تافته و تراکم ۳۰ تار و ۱۸ پود بر سانتی متر مربع تولید کارخانجات بافت و تکمیل یوکابد یزد، استفاده شده است. محلول‌های کلوئیدی اکسید روی، دی سولفید مولیبدن و گرافن اکسید از شرکت نانوسنجش یاران محیط تهیه شد.

۲-۲ آماده‌سازی پارچه‌های پنبه‌ای

به منظور شستشو، پارچه پنبه‌ای به مدت ۲ ساعت در آب بدون یون قرار داده شد. بعد از حذف آب اضافی، پارچه به مدت ۲ ساعت در خشک‌کن با دمای ۶۰ درجه سانتی گراد قرار گرفت.

نهایتا نمونه‌های پارچه به ابعاد ۵×۱۰ سانتی‌مترمربع برش داده شد.

۲-۲ تثبیت نانومواد بر روی پارچه‌های پنبه‌ای

محلول‌های کلوئیدی حاوی نانوساختارها، در حلال آب با غلظت وزنی ۳ درصد و pH برابر با ۴، تهیه شدند. جهت پوشش‌دهی نانو مواد روی پارچه، از روش غوطه‌وری استفاده شد. ابتدا پارچه در محلول نانوذرات اکسید روی به مدت ۱۵ دقیقه در دمای محیط، غوطه‌ور شد. پس از آن، جهت حذف حلال‌های اضافی از سطح پارچه، از دستگاه فولارد استفاده شد سرعت دستگاه در این مرحله ۱ متر بر دقیقه وبا فشار ۳ بار، تنظیم شد.در نهایت پارچه در در دمای ۶۰ درجه سانتی گراد به مدت ۲ ساعت توسط گرمکن خشک شد. پوشش‌دهی پارچه‌های پنبه‌ای با نانوساختارهای گرافن اکسید و دی سولفید مولیبدن به صورت مشابه انجام شد. مقدارپوشش‌دهی نانوساختار گرافن اکسید، اکسیدروی و دی‌سولفید مولیبدن به ترتیب ۰/۰۱۷، ۰/۰۱۰ و ۰/۰۱۴ گرم بر سانتی مربع است. طرحواره‌ای از پوشش‌دهی پارچه‌ها با نانوساختارها در شکل (۱) نشان داده شده است. به‌منظور بررسی دوام و پایداری خاصیت ضدباکتری پارچه‌های اصلاح شده در برابر شستشو، نمونه‌ها مطابق با استاندارد ISO 105-C01 در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد و به مدت ۲۰ دقیقه شستشو داده شدند. در این فرایند، از شوینده غیریونی با غلظت ۵ گرم در لیتر آب، استفاده شد. پس از شستشو، آبکشی و خشک شدن نمونه‌ها، خاصیت ضدباکتری آن‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت.

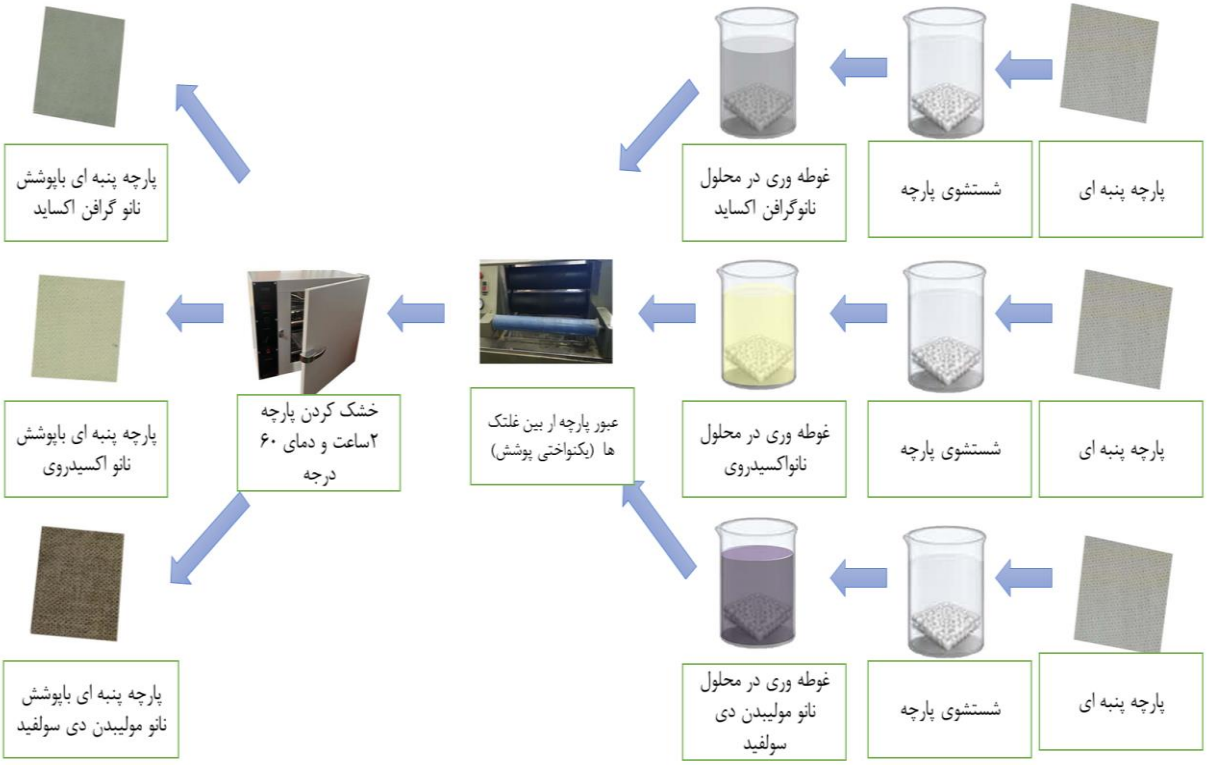
۲-۳ آزمون ضد باکتری

فعالیت ضدباکتری پارچه‌های اصلاح شده با نانوساختارها وهمچنین نمونه شاهد (پارچه پنبه ای خام)، به روش انتشار آگار (تست هاله) با استفاده از استاندارد AATCC 147 مورد بررسی قرار گرفتند.هر نمونه پارچه اصلاح شده در برابر دو نوع باکتری گرم مثبت (استافیلوکوکوس‌اورئوس ATCC6538) و گرم‌منفی (اشرشیاکلی ATCC7839) تهیه شده از سازمان پژوهشهای علمی و صنعتی ایران، ارزیابی شدند. این آزمون سه بار تکرار شد.

سطح آگارپلیت‌ها با محلول حاوی باکتری گرم‌مثبت یا گرم‌منفی به صورت خطی تلقیح شدند و پارچه های اصلاح شده به ابعاد ۲۵×۵۰ میلی‌مترمربع، روی سطح پلیت حاوی آگار استریل، قرار داده شدند. پس از انکوباسیون به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۳۷ درجه سانتی‌گراد، نمونه‌ها از نظر رشد باکتری و تشکیل ناحیه مهار با فرمول:

$$W = \frac{T - D}{2}$$

محاسبه شدند که W میانگین عرض ناحیه مهار در امتداد یک رگه در هر دو طرف پارچه مورد آزمایش، D قطر نمونه پارچه (میلی‌متر) وT قطر نمونه همراه با ناحیه شفاف وعاری از باکتری (میلی‌متر) است [۲۸-۲۶].



شکل ۱. طرحواره‌ای از پوشش دهی پارچه ها با نانوساختارها

۲-٤. تجهیزات و دستگاه‌های مورد استفاده

در این پژوهش، به‌منظور بررسی ساختار شیمیایی، ویژگی‌های نوری، خواص رنگی، ریزساختار و ساختار بلوری نمونه‌ها، از تجهیزات و دستگاه‌های مختلفی استفاده شد.به این ترتیب که، برای بررسی ویژگی‌های نوری نانوساختارها در نواحی فرابنفش و مرئی، از دستگاه UV-Vis مدل Shimadzu 160A ساخت کشور ژاپن استفاده شد. به‌منظور بررسی ساختار بلوری و شناسایی فازهای بلوری نانوساختارها، از دستگاه پراش پرتو ایکس Philips X'Pert PW1730 MPD استفاده شد. برای بررسی ریزساختار، اندازه شکل ویژگی‌های مورفولوژی نانوساختارها، از میکروسکوپ الکترونی عبوری Philips EM208S استفاده شد. به‌منظور شناسایی گروه‌های عاملی و بررسی تغییرات ساختاری و شیمیایی نمونه‌ها، از دستگاه طیف‌سنج مادون قرمز تبدیل فوریه Spectrum TWO LITA، مدل L1600300 ساخت شرکت LIantrisantT، انگلستان استفاده شد.

به‌منظور مطالعه شکل، مورفولوژی و ویژگی‌های سطحی پارچه-های پوشش داده شده با نانوساختارها، از میکروسکوپ الکترونی روبشی Vega 3 Tescan ساخت جمهوری چک استفاده شد. اندازه‌گیری و ارزیابی ویژگی‌های رنگی پارچه‌های اصلاح شده با استفاده از اسپکتروفتومتر انعکاسی Color Eye 7000A ساخت شرکت X-Rite انجام شد. این دستگاه به‌منظور تعیین مشخصه‌های رنگی نمونه‌ها و بررسی تغییرات رنگ حاصل از فرآیندهای اعمال‌شده مورد استفاده قرار گرفت.

برای ارزیابی میزان ثبات رنگ نمونه‌ها در برابر فرآیند شستشو، از دستگاه ثبات‌رنگ مالشی مدل M238B ساخت شرکت SHIRLEY، انگلستان استفاده شد. آزمون‌های مربوط، تحت شرایط کنترل‌شده انجام گرفت و تغییرات رنگ نمونه‌ها پس از فرآیند شستشو ارزیابی شد.

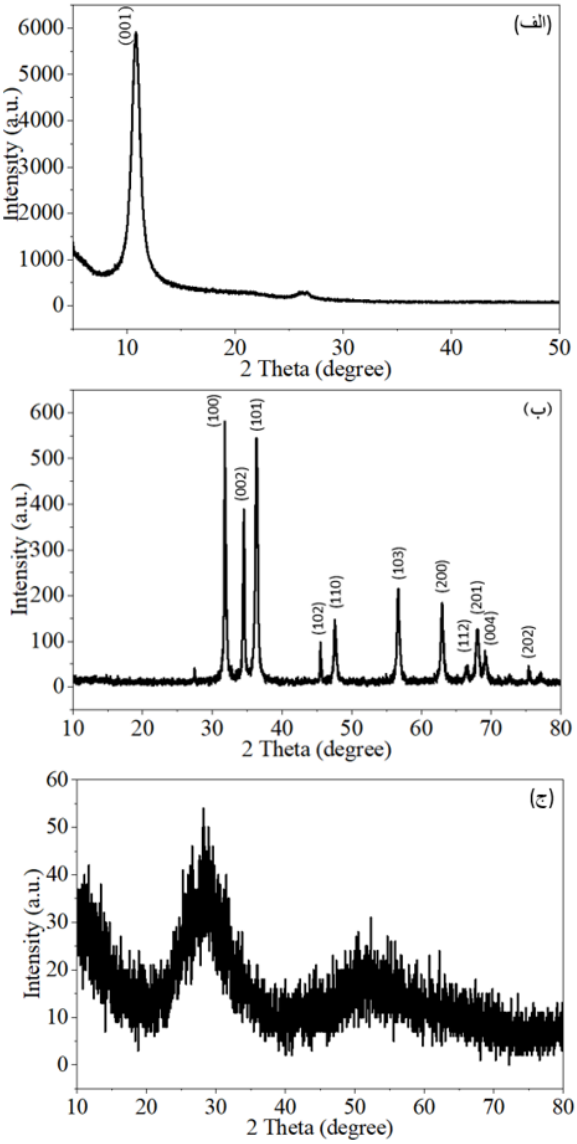
۳. نتایج و بحث

از پراش اشعه‌ایکس برای بررسی ساختار بلوری و خلوص فازی نانوساختارهای گرافن‌اکسید، اکسید روی و دی‌سولفید مولیبدن استفاده شد. الگوی پراش اشعه‌ایکس گرافن‌اکسید در (شکل۲) نشان داده شده است. قله‌ی بلندی در زاویه‌ی $2\theta=10/8^{\circ}$ قرار دارد که این قله مشخصه‌ی گرافن‌اکسید است که از بازتاب صفحات (۰۰۱) ناشی می‌شود که به فاصله‌ی بین لایه‌ای صفحات گرافن‌اکسید مربوط می‌شود. با استفاده از قانون براگ می‌توان فاصله‌ی بین لایه‌ها را محاسبه کرد[۲۹]:

$$2d\sin(\theta)=n\lambda$$

که دراینجا λ، طول موج پرتوایکس (۱/۵۴ Å) و θ زاویه پراش و n=1 است. فاصله‌ی بین لایه‌ای محاسبه شده ۰/۸۲ nm است این مقدار نسبت به فاصله‌ی بین لایه‌ای گرافیت (۰/۳۳۵ nm) به طور قابل توجهی بیشتر شده است. این افزایش بین صفحات به حضور گروه‌های عاملی مانند هیدروکسی، اپوکسی و کربوکسیل در بین صفحات که در طی فرایند اکسیداسیون ایجاد شده‌اند نسبت داده می‌شود. علاوه بر قله مذکور، یک قله ضعیف در حدود $2\theta=27^{\circ}$ قابل مشاهده است که مربوط به بازتاب از صفحات (۰۰۲) ساختار گرافیت است. شدت پایین این بازتاب، موید مقدار کم گرافیت در ساختار گرافن اکسید است..بنابراین الگوی پراش اشعه‌ایکس، ساخت موفقیت آمیز گرافن‌اکسید را تایید می‌کند.

قله‌های پراش اشعه‌ایکس واقع در زوایای ۳۱/۸، ۳۴/۵، ۳۶/۳، ۴۵/۵، ۴۷/۶، ۵۶/۷، ۶۳/۰، ۶۶/۶ درجه مربوط به صفحات بلوری (۱۰۰)، (۰۰۲)، (۱۰۱)، (۱۰۲)، (۱۱۰)، (۱۰۳) و (۲۰۰) ساختار ورتزیت شش ضلعی اکسید روی است که با کارت استاندارد JCPDS شماره ۱۴۵۱-۳۶ انطباق دارند. در الگوی پراش، هیچ قله‌ی اضافه



شکل ۲: الگوهای پراش اشعه ایکس الف) نانوصفحات گرافن‌اکسید، ب) نانوذرات اکسیدروی و ج) نانوساختار دی‌سولفید مولیبدن.

مربوط به ناخالصی‌ها یا پیش ماده‌های واکنش داده نشده مشاهده نشد که این خلوص بالای نمونه را تایید می‌کند. همچنین فازهای جانبی مانند $Zn(OH)_2$ و ترکیبات دیگری تشکیل نشده است. اندازه بلورک نانوذرات اکسید روی با استفاده از رابطه دبای–شرر محاسبه شد [۳۰و۳۱]:

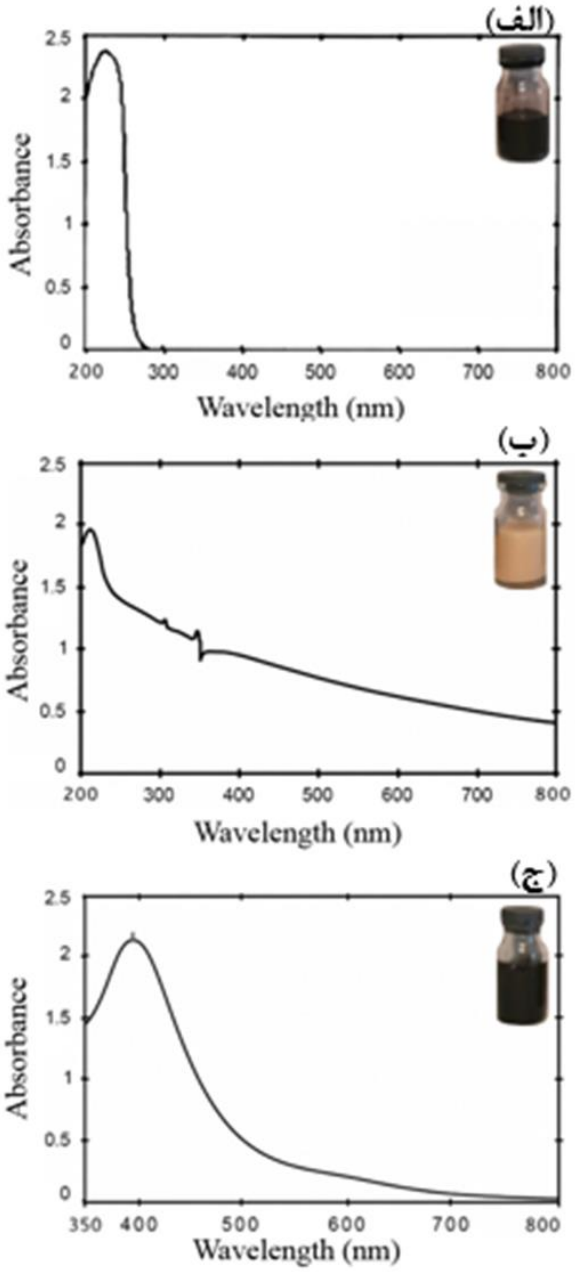
$$D=\frac{k\lambda}{\beta\cos(\alpha)}$$

که در آن D اندازه بلورک، K ضریب شکل بلورک، λ طول موج تابش پرتو ایکس، β پهنای قله در نصف بیشینه برحسب رادیان و α زاویه براگ است. اندازه متوسط بلورک بر اساس بزرگترین قله پراش اکسیدروی ۲۰ نانومتر محاسبه شد.

ویژگی‌های ساختاری دی‌سولفید مولیبدن ساخته شده توسط پراش اشعه‌ایکس بررسی شد، همانطور که در شکل (۲ج) نشان داده شده‌است. دو قله پراش بسیار پهن با بیشینه‌های واقع در محدوده

۲θ= ۳۳-۲۵ و ۲θ= ۵۰-۵۵ درجه نشان‌دهنده ماهیت نانومتری و درجه بلورینگی پایین نانوصفحات دی‌سولفید مولیبدن، منطبق با فاز هگزاگونال (JCPDS No. 37-1492) است. پهن‌شدگی قله و جابه‌جایی بیشینه‌ها به دلیل ضخامت و قطر بسیار کم نانوورقه‌ها، از بین رفتن نظم بلندبرد عمودی و برهم‌نهی بازتاب‌های مجاور است.

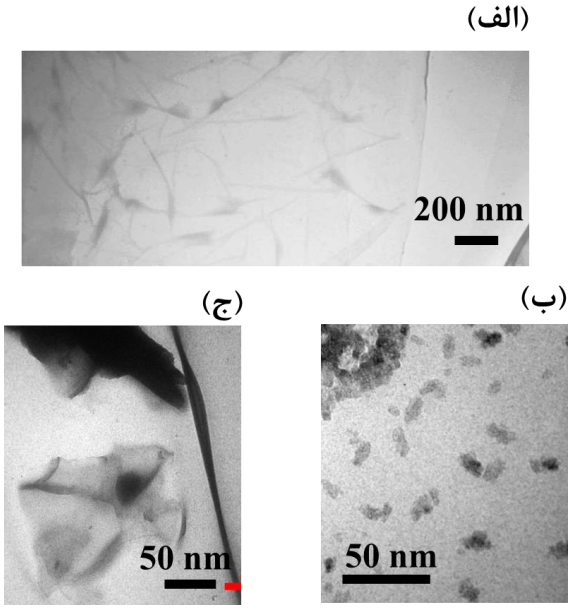
ویژگی‌های نوری نانوساختارهای اکسیدروی، دی‌سولفید مولیبدن و گرافن‌اکسید با استفاده از طیف‌سنجی جذب فرابنفش‌مرئی در محدوده طول موج ۲۰۰ تا ۸۰۰ نانومتر مورد ارزیابی قرار گرفت. یک قله مشخص در طول موج ۲۲۶ نانومتر در طیف جذب محلول گرافن‌اکسید (شکل ۳) نشان داده‌شده‌است. این قله مربوط به گذارهای الکترونی $\pi \rightarrow \pi^*$ در ساختار گرافن است که تاییدی بر ساخت موفقیت آمیز گرافن‌اکسید است. قله‌ی جذب شاخص در حدود ۲۰۰ نانومتر در طیف جذب فرابنفش-مرئی محلول کلوئیدی نانوذرات اکسید روی قابل مشاهده است که ناشی از انتقال‌های الکترونی از ترازهای عمیق نوار ظرفیت به نوار رسانش است. لبه جذب اکسید روی توده ۳۷۰ نانومتر است این جابه‌جایی آبی قابل توجه، مربوط به اثرات محدودیت کوانتومی در نانوذرات با قطر کم است. در طیف جذب دی‌سولفید مولیبدن، یک قله و یک شانه به ترتیب در محدوده طول موج-های ۴۰۰ نانومتر و یک شانه نسبتا پهن در ۶۰۰ نانومتر قرار دارد قله‌ی جذب در محدوده‌ی ۴۰۰نانومتر به انتقال‌های مستقیم از ترازهای عمیق نوار ظرفیت به نوار رسانش است و قله ی پهن واقع در ۶۰۰ نانومتر به نقطه K منطقه بریلوئن مربوط می‌شود [۳۲و۳۳].



شکل ۳: طیف‌های جذب الف) نانوصفحات گرافن‌اکسید، ب) نانوذرات اکسیدروی و ج) نانوساختار دی‌سولفید مولیبدن. تصویر داخل طیف‌های جذب، تصویر محلول نانوساختارها قبل از پوشش‌دهی است.

شانه‌ی واقع در محدوده ی ۲۲۸ نانومتر می‌تواند مربوط به اثرات کوانتومی نشات گرفته از کاهش ابعاد لایه‌ها باشد. داخل طیف‌ها، تصویر محلول هر یک از نانوساختارها دیده می شود. تمام محلول‌ها پایدار و بدون ته‌نشینی هستند .

مورفولوژی نانوساختارهای گرافن‌اکسید، اکسیدروی و دی‌سولفید مولیبدن با استفاده از میکروسکوپ الکترونی‌عبوری بررسی شد. وجود ساختار ورقه‌ای نانوصفحات گرافن‌اکسید، نشان دهنده‌ی لایه‌برداری موفقیت‌آمیز گرافیت به گرافن‌اکسید چندلایه است (شکل ۴ الف). بررسی ریزساختار نانوذرات اکسید روی نشان داد ذرات از شکل و اندازه نسبتاً یکنواختی برخوردار هستند. همان‌طور که در شکل (۴ب) مشاهده می‌شود، نانوذرات عمدتاً دارای مورفولوژی دوکی‌شکل بوده و اندازه متوسط آن‌ها ۲۰ نانومتر محاسبه شد. همچنین، توزیع اندازه ذرات نسبتاً باریک بوده و تجمع و کلوخه‌شدگی قابل‌توجهی در نمونه مشاهده نشد. این ویژگی می‌تواند نشان‌دهنده کنترل مناسب فرایند سنتز و تشکیل ذرات با ابعاد نانومتری

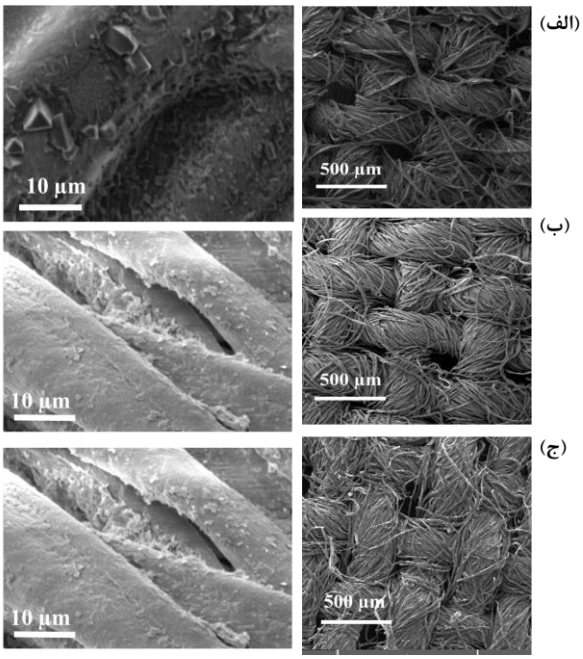


شکل ٤: تصویرهای میکروسکوپ الکترونی عبوری جذب الف) نانوصفحات گرافن‌اکسید، ب) نانوذرات اکسیدروی و ج) نانوساختار دی‌سولفید مولیبدن

یکنواخت باشد. از سوی دیگر، نانوذرات پراکندگی مطلوبی در حلال نشان دادند و ذرات به‌صورت نسبتاً یکنواخت در محیط پخش شده‌اند. (شکل ۴ ب) اندازه ۱۵۰ نانومتری ذرات دی‌سولفید مولیبدن، در تصویر میکروسکوپ الکترونی، ساختار صفحه‌ای بودن این ماده را تایید می‌کند. (شکل۴ ج)

شکل (۵)، تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از پارچه‌های پنبه‌ای پوشش‌دهی‌شده با گرافن اکسید، اکسید روی و دی‌سولفید مولیبدن در دو بزرگنمایی مختلف را نشان می‌دهند. همان‌گونه که در تصاویر مشاهده می‌شود، ساختار متخلخل، شبکه‌ای و مورفولوژی ذاتی الیاف پنبه پس از اعمال پوشش‌ها تا حد زیادی حفظ شده است و شواهدی از تخریب محسوس ساختار الیاف مشاهده نمی‌شود. همچنین، پراکنش نسبتاً یکنواخت نانوساختارها بر روی سطح الیاف و پوشش‌دهی مناسب بستر سلولزی قابل مشاهده است. نانوساختارهای اعمال‌شده ضمن حفظ ویژگی‌های ریز ساختار اولیه خود، به‌صورت مناسب بر سطح و نواحی بین‌الیافی، تثبیت شده‌اند که نشان‌دهنده برهم‌کنش مطلوب میان نانوساختارها و بسترسلولزی است. این تثبیت و توزیع مناسب نانومواد بر سطح الیاف از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است؛ زیرا افزایش سطح تماس و ممانعت از جداشدن یا تجمع نانوساختارها می‌تواند نقش مؤثری در کارایی عملکرد ضدباکتری پارچه ایفا کند.

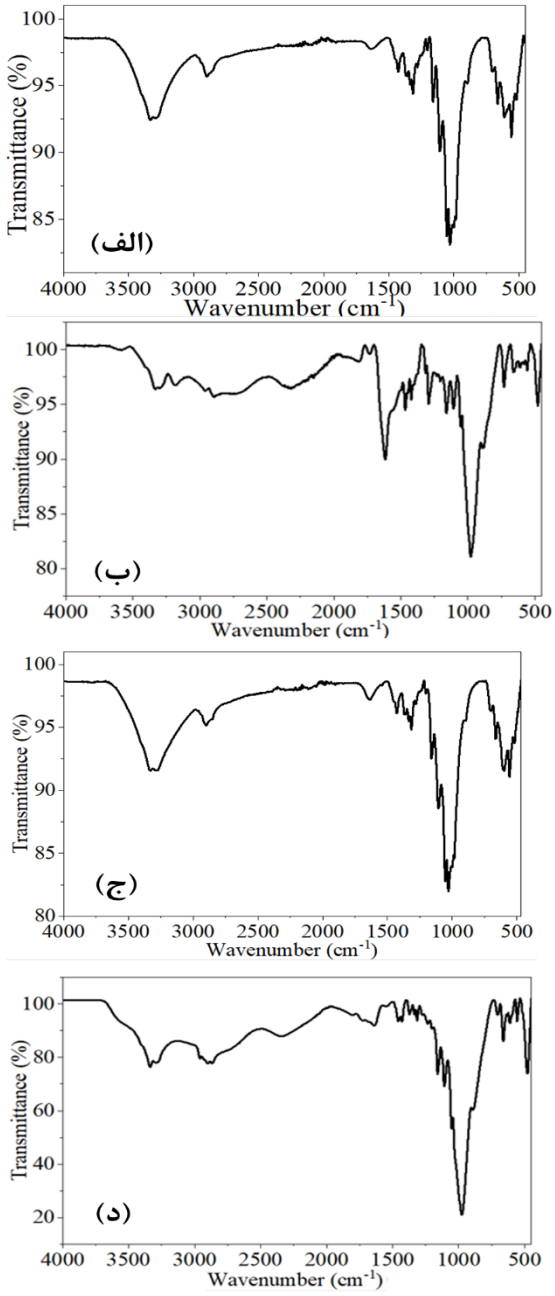
شکل (۶) طیف‌های تبدیل فوریه مادون‌قرمز پارچه پنبه‌ای خام و نمونه‌های پنبه‌ای اصلاح‌شده با نانوساختارهای اکسید روی، گرافن اکسید و دی‌سولفید مولیبدن را نشان می‌دهد. به‌منظور شناسایی گروه‌های عاملی و بررسی تغییرات ایجادشده در ساختار شیمیایی پارچه پس از فرآیند پوشش‌دهی، موقعیت و شدت نوارهای جذبی مورد



شکل ۵: تصویرهای میکروسکوپ الکترونی روبشی پارچه‌های پنبه‌ای پوشش داده شده با الف) نانوصفحات گرافن‌اکسید، ب) نانوذرات اکسیدروی و ج) نانوساختار دی‌سولفید مولیبدن در دو بزرگنمایی.

بررسی قرار گرفت. همان‌طور که در جدول (۱) و شکل (۶-الف) ارائه شده است، طیف تبدیل فوریه مادون‌قرمز پارچه پنبه‌ای خام، شامل نوارهای جذبی مشخصه مربوط به گروه‌های عاملی ساختار سلولزی است. پس از تثبیت نانوساختارها بر سطح الیاف پنبه، تغییراتی در موقعیت، شدت و تعداد نوارهای جذبی مشاهده شد که می‌تواند بیانگر ایجاد برهم‌کنش میان گروه‌های عاملی بستر سلولزی و نانوساختارهای مورد استفاده باشد. این تغییرات همچنین مؤید فرآیند پوشش‌دهی و حضور نانومواد بر سطح الیاف پنبه است. در نمونه پوشش‌داده‌شده با گرافن اکسید، علاوه بر نوارهای جذبی مشخصه مربوط به ساختار شیمیایی سلولز، نوارهای مرتبط با گروه‌های عاملی مرتبط با ساختار گرافن اکسید نیز قابل مشاهده است (شکل ۶-ب). مقایسه طیف تبدیل فوریه مادون‌قرمز پارچه پنبه‌ای خالص و نمونه پوشش‌داده‌شده با گرافن اکسید نشان می‌دهد که ناحیه ارتعاش کششی گروه‌های هیدروکسیل

(-OH) در نمونه اصلاح شده، علاوه بر حفظ موقعیت مشخصه، از پهن‌شدگی بیشتری برخوردار است. این افزایش پهنای نوار جذبی را می‌توان به برهم‌کنش‌های بین‌مولکولی و ایجاد پیوندهای هیدروژنی بین گروه‌های عاملی اکسیژن‌دار موجود در ساختار گرافن اکسید و گروه‌های هیدروکسیل زنجیره‌های سلولزی نسبت داد.



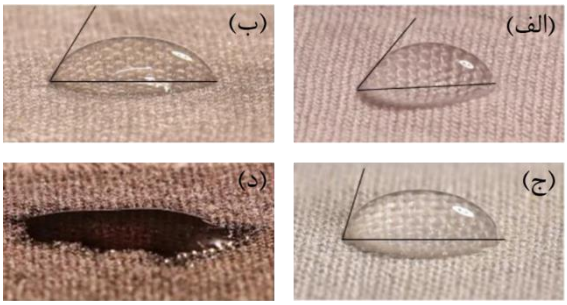
شکل ٦: نمودارهای تبدیل فوریه مادون قرمز الف) پارچه‌ی پنبه‌ای و پارچه‌ی پوشش داده شده با ب) نانوصفحات گرافن‌اکسید، ج) نانوذرات اکسیدروی و د) نانوساختار دی‌سولفید مولیبدن

به عبارتی گرافن‌اکسید به دلیل داشتن گروه‌های عاملی مختلف مانند کربوکسیل، هیدروکسیل و اپوکسی، قابلیت پیوند مؤثر با گروه‌های هیدروکسیل فراوان موجود در ساختار سلولز را دارد. در این میان، تشکیل پیوندهای هیدروژنی میان گروه‌های –OH و سایر گروه‌های اکسیژن‌دار گرافن اکسید و گروه‌های هیدروکسیل سلولز می‌تواند موجب تغییر محیط شیمیایی پیوندهای O–H و در نتیجه افزایش پهنای نوار ارتعاش کششی این گروه در طیف تبدیل فوریه مادون قرمز شود. بنابراین، افزایش پهن‌شدگی نوار –OH را می‌توان به‌عنوان یکی از شواهد طیف‌سنجی مؤید برهم‌کنش مؤثر بین گرافن اکسید با ماتریس سلولزی پارچه پنبه‌ای در نظر گرفت [۳۴]. قله‌ی واقع در cm^{-1} ۱۷۳۱ مربوط به ارتعاشات کششی گروه عاملی کربونیل (C=O) ویژه گرافن‌اکسید است که پوشش‌دهی موفق پارچه توسط گرافن اکسید را تایید می‌کند. قله‌ی پهن و ضعیفی در محدوده عدد موج cm^{-1} ۱۶۴۰ مشاهده می‌شود که با پوشش‌دهی پارچه پنبه‌ای با گرافن‌اکسید قله‌ی تیز و شدیدی در cm^{-1} ۱۶۲۰ ظاهر شده‌است که مربوط به ارتعاشات کششی C=C گرافن‌اکسید است. این جابجایی قله و افزایش شدت نشان‌دهنده‌ی پوشش‌دهی خوب الیاف پنبه با گرافن‌اکسید است. طیف تبدیل فوریه مادون‌قرمز پارچه پنبه‌ای پوشش‌دهی شده با اکسیدروی شبیه پارچه پنبه‌ای خالص است و نوارهای جذبی مشخصه‌ی سلولز نیز در این طیف مشاهده می‌شوند(شکل ۶ ج). تعداد قله‌ها و شکل قله‌ها تقریبا حفظ شده‌است. اما در نوارهای جذب مربوط به ارتعاشات کششی گروه عاملی OH (cm^{-1} ۳۳۰۸) و ارتعاشات کششی نامتقارن $-CH_2$ (cm^{-1} ۲۸۹۶) جابجایی کمی نسبت به پارچه پنبه‌ای خام نشان داده‌است. جابجایی قله‌ها به سمت عددموج‌های پایین‌تر، نشان‌دهنده‌ی اتصال و تعامل خوب بین نانوذرات اکسیدروی با گروه‌های عاملی بر روی سطح پارچه پنبه‌ای است که این اتصال می‌تواند از طریق پیوندهای هیدروژنی یا الکتروستاتیک صورت گرفته باشد. طیف تبدیل فوریه مادون‌قرمز پارچه‌ی پنبه‌ای پوشش داده‌شده با نانوساختار دی‌سولفید مولیبدن در شکل (۶ د) نشان داده شده‌است. حضور نوار پهن در ناحیه cm^{-1} ۳۰۰۰–۳۵۰۰ در طیف به‌وضوح نشان‌دهنده فراوانی گروه‌های عاملی هیدروکسیل (-OH) روی سطح دی سولفید مولیبدن و بستر سلولزی است. بر طبق شکل، نوار جذب واقع در محدوده cm^{-1} ۴۸۸ و cm^{-1} ۶۵۵ به ترتیب مربوط به ارتعاشات کششی Mo-S و ارتعاشات پیوند Mo-O-S/Mo-O ناشی از اکسیداسیون سطحی جزئی در لبه‌های نانوورقه است وحضور نانوساختار دی‌سولفید مولیبدن را بر روی پارچه تایید می‌کنند [۳۵و۳۶] .

سطوحی با ترکیب شیمیایی یکسان اما زبری متفاوت، زوایای تماس متغیری از خود نشان می‌دهند. هنگامی که زاویه تماس کمتر از ۹۰ درجه باشد، سطح جامد در دسته آب‌دوست طبقه‌بندی می‌شود که نشان‌دهنده ترشوندگی بالا است. در مقابل، زمانی که زاویه تماس آب از ۹۰ درجه فراتر رود، سطح جامد آب‌گریز محسوب می‌شود که بیانگر ترشوندگی پایین است. [۳۷–۳۹].

جدول ۱: مشخصات قله های طیف تبدیل فوریه مادون قرمز پارچه پنبه‌ای خام

ردیف	محل قله ها (cm^{-1})	مشخصات قله ها
1	3312	ارتعاشات کششی گروه هیدروکسیل (-OH)
2	2900	ارتعاشات کششی نامتقارن $-CH_2$
3	1640	آب جذب شده بر روی سطح
4	1427	ارتعاشات خمشی درون صفحه -CH
5	1315	ارتعاشات خمشی جنبانه ای -CH
6	1161	ارتعاشات کششی نامتقارن پیوند C-OC
7	1107	ارتعاشات کششی نامتقارن پیوند C-OC
8	1031	ارتعاشات کششی C-O



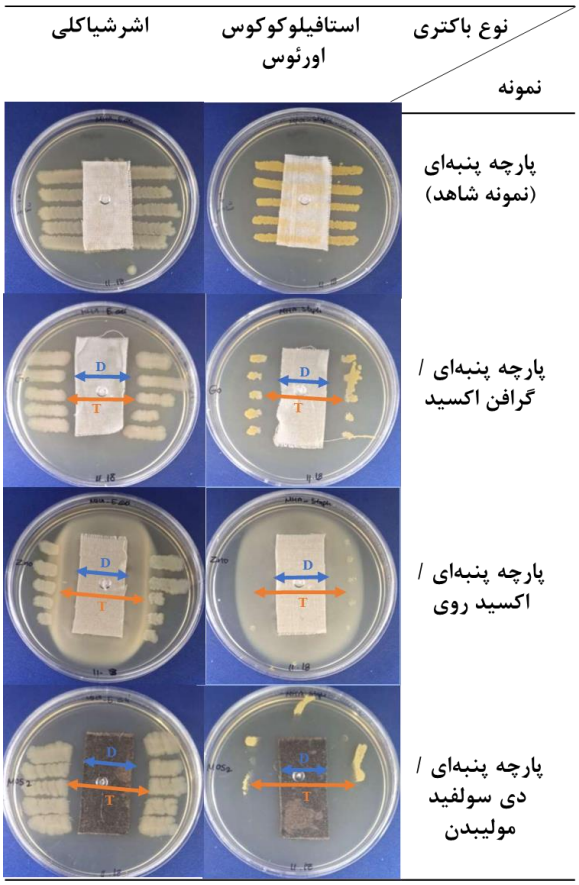
شکل ۷: تصویر قطره بر روی سطح الف) پارچه‌های خام و پارچه‌ی پوشش داده شده با ب) گرافن‌اکسید، ج) اکسیدروی و د) دی‌سولفید مولیبدن.

با پوشش پارچه‌ها توسط نانوساختارها میزان ترشوندگی پارچه‌ها تغییر کرد. در شکل ۷ تصاویر قطره بر روی سطح چند نمونه پارچه قبل و بعد از پوشش را نشان می‌دهد. زاویه تماس ظاهری قطره بر روی پارچه خام ۴۸ درجه اندازه گیری شد. که نشاندهنده‌ی آبدوستی سطح و وجود گروه‌های عاملی هیدورکسیل بر روی الیاف سلولز است. زاویه تماس ظاهری پارچه‌های پوشش داده شده با گرافن‌اکسید واکسیدروی به ترتیب ۵۷ و ۷۳ درجه اندازه گیری شد و قطره در پارچه پوشش دهی شده با دی‌سولفید مولیبدن نفوذ کرد. لذا اندازه گیری زاویه تماس امکان پذیر نبود. بنابراین نتایج نشان می دهد پوشش پارچه ها با اکسیدروی و گرافن اکسید باعث افزایش زاویه تماس نسبت به پارچه خام شد، اما اصلاح سطح پارچه با دی‌سولفید مولیبدن ، باعث افزایش ترشوندگی و نفوذ موئینگی محلول در بافت پارچه می شود.

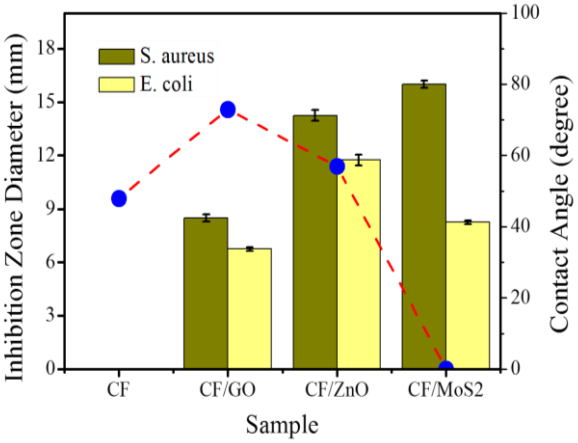
زاویه تماس ظاهری قطره بر روی یک پارچه که دارای ساختار متخلخل است به عوامل مختلفی مانند ترکیب شیمیایی ماده‌ی پوشش دهنده، مقدار پوشش، نحوه توزیع ماده روی الیاف، زبری الیاف، اندازه و پیوستگی منافذ و خاصیت مویینگی بستگی دارد. بنابراین، جذب کامل قطره در نمونه پارچه پوشش‌دهی شده با دی‌سولفید مولیبدن را نمی‌توان فقط به آب‌دوستی ذاتی ترکیب نسبت داد.

روش‌های آزمون کیفی و کمی برای ارزیابی خواص ضدباکتری منسوجات توسعه یافته‌اند. روش آزمون AATCC 147- اندازه‌گیری کیفی از اثرات ضدباکتری یک منسوج را ارائه می‌دهد. .

عملکرد خواص ضدباکتری پارچه‌ها قبل و بعد از پوشش‌دهی با نانوساختارها در برابر باکتری‌های استافیلوکوکوس اورئوس (باکتری گرم‌مثبت) و اشرشیاکلی (باکتری گرم‌منفی) مورد ارزیابی قرار گرفت. درشکل (۸) تصویر انواع پارچه‌ها در مقابل دو نوع باکتری نشان داده شده‌است بر اساس تصاویر، قطر هاله‌ی عدم رشد هر کدام از نمونه‌ها اندازه‌گیری شد (شکل ۹). بر طبق نتایج، پارچه پوشش داده شده با نانوساختار دی‌سولفید مولیبدن در مقابل باکتری استافیلوکوس‌اورئوس بیشترین قطر هاله‌ی عدم رشد (۱۶ mm) را دارد. ولی برای



شکل ۸: مقایسه هاله عدم رشد باکتری حاصل از پارچه‌های پنبه‌ای و پارچه‌های پنبه‌ای پوشش داده شده با گرافن‌اکسید، اکسیدروی و دی‌سولفید مولیبدن در برابر باکتری استافیلوکوکوس‌اورئوس و اشرشیاکلی (عرض پارچه (D): ۲۵ میلی متر)



شکل ۹: ارزیابی هم‌زمان فعالیت ضدباکتری (قطر هاله عدم رشد)، در برابر باکتری‌های استافیلوکوکوس اورئوس (باکتری گرم‌مثبت) و اشرشیاکلی (باکتری گرم‌منفی) و زاویه تماس ظاهری آب بر روی پارچه‌های اصلاح‌شده با در مقایسه با پارچه پنبه ای خام.

باکتری اشرشیاکلی، بیشترین قطر هاله‌ی عدم رشد (mm ۱۱/۷۵) مربوط به پارچه پوشش داده‌شده با نانوذرات اکسیدروی است. پارچه با پوشش نانوصفحات گرافن‌اکسید در مقابل هر دو باکتری، کمترین قطر هاله‌ی رشد را از خود نشان داده‌است.

در آزمون ضدباکتری برای باکتری استافیلوکوس اورئوس، ترتیب قطر هاله عدم رشد به صورت پارچه پوشش داده شده با دی‌سولفید مولیبدن > اکسید روی> گرافن اکسید است. جذب کامل قطره در نمونه دی‌سولفید مولیبدن نشان می‌دهد که محیط آبی می‌تواند تماس گسترده‌تری با الیاف پوشش‌داده‌شده برقرار کند. این ویژگی احتمالاً دسترسی باکتری به نواحی فعال پوشش و انتقال عوامل فعال در فصل مشترک پارچه و محیط را تسهیل کرده و می‌تواند یکی از دلایل بزرگ‌تر بودن هاله عدم رشد دی سولفید مولیبدن در برابر باکتری گرم‌مثبت باشد.عملکرد بهتر پارچه پوشش داده‌شده با دی‌سولفید مولیبدن در مقابل این باکتری، می‌توان به آبدوستی زیاد و جذب کامل قطره نسبت داد. ترشوندگی می‌تواند باعث تسهیل نفوذ گونه‌های باکتری و افزایش تماس بیشتر باکتری به نواحی فعال سطح نانوساختارها شود. سازو کار اصلی تخریب باکتری‌ها توسط نانوصفحات دی سولفید مولیبدن از طریق فرآیندهایی مانند تخریب مکانیکی غشا توسط لبه‌های تیز نانوورقه‌ها (اثر نانوچاقو)، اختلال در پتانسیل غشا از طریق انتقال بار سطحی بین نانوصفحه و باکتری و القای تنش اکسیداتیو ناشی از تولید گونه‌های فعال اکسیژن و آسیب به DNA و پروتئین‌ها که در نهایت باعث مرگ باکتری می‌شود صورت می گیرد [۴۰] . باکتری‌های گرم‌مثبت، دارای پوشش سلولی ضخیم متخلخل از لایه پپتید دوگلیکان است بنابراین آبدوستی بالای سطح پارچه پوشش داده‌شده و تماس مستقیم باکتری ها با نانوساختارها باعث افزایش خواص ضد باکتری پارچه‌ی پوشش داده‌شده با دی‌سولفید مولیبدن در مقابل باکتری گرم‌مثبت شده‌است.

برای باکتری اشرشیاکلی (گرم منفی)، ترتیب قطر هاله عدم رشد به‌صورت پارچه پوشش داده شده با اکسید روی> دی سولفید مولیبدن > و گرافن اکسید است. با وجود ترشوندگی بالای پارچه پوشش داده شده با دی‌سولفید مولیبدن ، عملکرد پارچه اصلاح شده با اکسید روی نسبت به دی‌سولفید مولیبدن در مقابل این باکتری بهتر می باشد. بنابراین، رابطه مستقیمی میان ترشوندگی و قطر هاله عدم رشد وجود ندارد. مکانیسم شیمیایی ماده، نوع ساختار سلولی باکتری و قابلیت انتشار گونه‌های فعال در آگار نیز در تعیین اندازه هاله نقش دارند. پارچه پوشش داده‌شده با اکسید روی، معمولا از طریق سازوکارهای مختلفی مانند آزاد سازی یون فلزی روی، گونه های فعال اکسیژن باعث اختلال در عملکرد باکتری اشرشیاکلی (گرم‌منفی) شده‌است. به دلیل نوع ساختار غشای باکتری گرم‌منفی و نوع سازوکار ضدباکتری نانوذرات اکسیدروی، حتی با زاویه تماس بیشتر نیز دارای خواص ضدباکتری بیشتری در مقابل باکتری گرم‌منفی است. به عبارتی در این حالت، ترشوندگی سطح نسبت به انتشار یون و انتقال جرم اهمیت کمتری دارد.

برای هر دوسویه باکتری، پارچه های پوشش داده شده با گرافن اکسید کمترین قطر هاله عدم رشد را ایجاد نمود. از طرفی، این نمونه با زاویه تماس ۷۳ درجه، کمترین میزان ترشوندگی را در مقابل دیگر نمونه ها دارد. لذا ترشوندگی کمتر، می‌تواند باعث محدود شدن سطح تماس اولیه محیط آبی باکتری با سطح فعال گرافن اکسید شود. فعالیت ضدباکتریای نانوصفحات گرافن اکسید عمدتاً به تماس مستقیم لبه‌های فعال و سطح ورقه‌ها با غشای

باکتری استوار است. تجمع و کلوخه شدن نانوصفحات بر سطح الیاف باعث کاهش نواحی فعال قابل دسترس خواهد شد. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان دهنده‌ی پوشش یکنواخت دی‌سولفید مولیبدن بر روی الیاف پارچه است، در حالی که در پارچه های پوشش داده شده با گرافن اکسید، پوشش غیر یکنواخت و تجمع موضعی نانوصفحات قابل مشاده است (شکل ۵). این تفاوت می‌تواند مسیرهای نفوذ مایع و سطح فعال در دسترس را تغییر دهد. افزون بر این، تثبیت نانوصفحات بر روی سطح الیاف، تحرک و انتشار آن‌ها را در محیط آگار محدود خواهد کرد. بنابراین، عملکرد ضعیف‌تر پارچه های حاوی گرافن اکسید را به عواملی مانند نحوه ی آرایش و کلوخه شدن نانوصفحات، ترشوندگی کمتر، کاهش دسترسی باکتری ها به لبه‌ها و نواحی فعال و انتشار کمتر در آگار است. لذا این عوامل، لزوما بیانگر فعالیت ضدباکتری ذاتی گرافن اکسید نیست. داده‌ها نشان می‌دهند نمونه‌های دارای ترشوندگی بالاتر، هاله عدم رشد بزرگ‌تری در مقابل باکتری گرم مثبت ایجاد کرده‌اند؛ در حالی که برای باکتری گرم‌منفی چنین تطابقی مشاهده نمی‌شود (شکل ۹). این امر بیانگر این است که خواص ضدباکتری به موفولوژی سطح، عملکرد ضدباکتری نانوساختارها، خصوصیات ذاتی باکتری‌ها و میزان ترشوندگی سطح وابسته است.

پایداری فعالیت ضدباکتری پارچه های اصلاح شده پس از شستشو با استفاده از آزمون انتشار در آگار بررسی شد (جدول ۲). پس از شستشو، پارچه‌های پوشش داده شده با دی‌سولفید مولیبدن، در برابر هر دو سویه باکتری خاصیت ضدباکتری نشان دادند. قطر هاله عدم رشد برای باکتری استافیلوکوکوس‌اورئوس و اشرشیاکلی ، به‌ترتیب، به ۶/۵ و۱/۵ میلی متر کاهش یافت. در پارچه پوشش‌داده‌شده با گرافن اکسید، قطر هاله عدم رشد در برابر باکتری استافیلوکوکوس‌اورئوس به ۱/۵ میلی متر رسید، درحالی‌که در برابر باکتری اشرشیاکلی هاله قابل‌اندازه‌گیری مشاهده نشد و همچنین پارچه پوشش داده شده با اکسید روی، فعالیت ضد باکتری از خود نشان نداد. در مجموع، شستشو موجب کاهش فعالیت ضدباکتری پوشش‌ها شد، اما شدت این کاهش به نوع پوشش و باکتری بستگی دارد. پارچه های پوشش داده شده با دی‌سولفید مولیبدن بالاترین پایداری نسبی را نشان داد و حتی پس از شستشو فعالیت ضدباکتری خود را حفظ کرد. برای دستیابی به پایداری شستشوی بالاتر این نانوساختارها، استفاده از اتصال‌دهنده مناسب یا اصلاح فرایند تثبیت پوشش ضروری است.

جدول۲. ارزیابی فعالیت ضدباکتری (قطر هاله عدم رشد)، در برابر باکتری‌های استافیلوکوکوس اورئوس و اشرشیاکلی

نمونه ها	قطر هاله عدم رشد (mm)			
	قبل از شستشو		بعد از شستشو	
	استافیلوکوکوس اورئوس	اشرشیاکلی	استافیلوکوکوس اورئوس	اشرشیاکلی
CF	۰	۰	۰	۰
CF/ZnO	۱۴٫۲۵±۰٫۳۰	۱۱٫۷۵±۰٫۳	۰	۰
CF/MoS_2	۱۶±۰٫۲۰	۸٫۲۵±۰٫۱۵	۶٫۵۰±۰٫۲	۱٫۵±۰٫۱۵
CF/GO	۸/۵±۰٫۲۰	۶٫۷۵±۰٫۱۰	۰٫۱۵±۰٫۱۰	۰

برای بررسی مقاومت سایش و پایداری پارچه‌های پوشش داده شده با نانوساختارها، مشخصه‌های رنگ‌سنجی پارچه‌ها در فضای رنگی CIE L*a*b* قبل و بعد از آزمون سایش اندازه‌گیری شد. مقادیر مؤلفه‌های L* روشنایی ، a* موقعیت رنگ درمحور قرمز–سبز، b* موقعیت رنگ در محور زرد–آبی و همچنین مقدار اختلاف کلی رنگ (ΔE) برای سه نمونه پوشش‌داده‌شده با گرافن اکسید، نانوذرات اکسید روی و نانوصفحات دی سولفید مولیبدن در **جدول (۳)** قابل مشاهده است. بر طبق نتایج، مقادیر عددی مختصات رنگی در هر سه نمونه پس از سایش تغییر کرده‌اند.از این تغییرات می توان به میزان برهمکنش فیزیکی–مکانیکی بین سطح ساینده و پوشش پی برد. ΔE معیاری برای بیان میزان تغییر رنگ ایجادشده در اثر آزمون سایش است که طبق رابطه زیر محاسبه شد:

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L*)^2 + (\Delta a*)^2 + (\Delta b*)^2}$$

که در آن ΔL*، Δa* و Δb* تغییرات مولفه های رنگ قبل و بعد از سایش است. [۴۲و۴۱]

بر اساس نتایج، مقادیر ΔE برای پارچه های پوشش‌داده‌شده با با گرافن اکسید، دی‌سولفید مولیبدن و اکسید روی به ترتیب برابر با **۲/۰۷، ۷/۷۵ و ۸/٦۸** به‌دست آمد.

کمترین میزان ΔE، مربوط به پارچه پوشش‌داده‌شده با گرافن اکسید است. از نظر استانداردهای رنگ‌سنجی، مقدار ΔE نشان‌دهنده تغییر رنگ جزئی و پایداری بالا است. این عملکرد می تواند ناشی از ماهیت ذاتی ورقه ای نانوصفحات دوبعدی و اتصال خوب صفحات، از طریق گروه‌های عاملی مانند هیدروکسیل و کربوکسیل به سطح الیاف پارچه است. در نمونه پارچه پوشش داده شده با دی سولفید مولیبدن نسبت به پارچه اصلاح شده با اکسید روی، پایداری سایشی بهتری مشاهده شد. دلیل این امر، می‌تواند به دلیل خاصیت روان‌کاری ذاتی نانوصفحات لایه‌ای دی سولفید مولیبدن و حرکت آسان صفحات روی یکدیگر باشد. این ویژگی سبب کاهش ضریب اصطکاک بین سطح ساینده و پوشش می شود. پارچه‌ی پوشش داده شده با اکسید روی، دارای بیشترین مقدارΔE است. نانوذرات اکسیدروی نسبت به نانوساختارهای دوبعدی به دلیل ماهیت ذره‌ای بودن نانوذرات اکسید روی و نداشتن مساحت تماس پیوسته با سطح الیاف، در برابر نیروهای برشی مداوم دستگاه سایش آسیب‌پذیرتر می‌باشند. در مقابل، نانوساختارهای دوبعدی مانند گرافن اکسید و دی سولفید مولیبدن به دلیل برخورداری از صفحات گسترده، با نسبت ابعادی بالا و قابلیت ایجاد سطح تماس بیشتر با بستر الیاف، می‌توانند ناحیه تماس وسیع‌تری با سطح پارچه ایجاد کنند. این ویژگی، در صورت وجود برهم‌کنش‌های مناسب میان گروه‌های عاملی سطح الیاف و نانوساختار، می‌تواند به افزایش چسبندگی مکانیکی و کاهش جداشدگی پوشش در اثر سایش منجر شود. بنابراین، تفاوت در مورفولوژی، ابعاد، سطح ویژه، نحوه استقرار و میزان برهم‌کنش نانوساختارها با الیاف، می‌تواند یکی از عوامل مؤثر در تفاوت پایداری سایشی پوشش‌های اکسید روی، گرافن اکسید و دی سولفید باشد.

جدول ۳. مقادیر مختصات رنگی و اختلاف رنگ پارچه‌های پوشش‌داده‌شده قبل و بعد از آزمون سایش.

نمونه‌ها / خواص رنگ	CF/GO		CF/ZnO		CF/MoS_2	
	قبل سایش	بعد سایش	قبل سایش	بعد سایش	قبل سایش	بعد سایش
L*	۷۲/۲۳	۷۴/۲۸	۸۹/۶۰	۹۱/۶۸	۳۷/۵۴	۴۴/۷۵
a*	۰/۵۸	۰/۷۳	۱/۸۸	۰/۶۸	۴/۹۸	۳/۰۹
b*	-۳/۲۲	-۳/۵۱	۸/۶۴	۰/۳۰	۱۰/۱۳	۱۲/۲۶
ΔL*	۲/۰۵		۲/۰۸		۷/۲۱	
Δa*	۰/۱۵		-۱/۲۰		-۱/۸۹	
Δb*	۰/۲۹		-۸/۳۴		۲/۱۳	
ΔE	۲/۰۷		۸/۶۸		۷/۷۵	

٤. نتیجه گیری

پارچه‌های پنبه‌ای از پرمصرف ترین الیاف طبیعی جهان است که از پوشاک تا تجهیزات پزشکی کاربرد دارد. لذا ساخت پارچه‌های پنبه‌ای ضدباکتری در حوزه ی بهداشت از اهمیت بسزایی برخوردار است. در این پژوهش، ابتدا پارچه پنبه‌ای با نانوساختارهای مختلف مانند اکسید روی ، گرافن‌اکسید و دی‌سولفید مولیبدن پوشش داده شدند. ساختار بلوری و ریزساختار نانوساختارها با استفاده از پراش اشعه ایکس و میکروسکوپ الکترونی عبوری مورد ارزیابی قرار گرفت. سپس پارچه‌های پوشش داده شده با نانوساختارها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی و طیف سنج تبدیل فوریه مادون قرمز بررسی شدند. نتایج نشان می دهد نانوساختار ها با حفظ ساختار خود بر روی پارچه‌ها به خوبی پوشش داده شده‌اند. سپس با بررسی خواص آبدوستی/آبگریزی پارچه‌های پوشش داده شده، عملکرد ضدباکتری هر کدام از این پارچه‌ها در برابر باکتری‌های گرم منفی و گرم مثبت بررسی شدند. نتایج نشان داد، نوع باکتری، میزان آبدوستی و آبگریزی و همچنین نوع سازوکار ضدباکتری نانوساختارها بر میزان خواص ضد باکتری پارچه‌های پوشش داده شده موثر است.

۵. تعارض منافع

نویسندگان متعهد می گردند که نتایج حاصل از پژوهش مذکور را در مجله ی دیگری ارسال نکرده و در این راستا منافع جاری وجود نداشته و در قبال ارائه اثر خود وجهی دریافت ننموده اند.

٦. منابع

[1] Karim N, Afroj S, Lloyd K, Oaten LC, Andreeva DV, Carr C, et al. Sustainable personal protective clothing for healthcare applications: a review. ACS Nano. 2020;14(10):12313-12340.

doi: 10.1021/acsnano.0c05537

[2] Zhou H, Li Q, Zhang Z, Wang X, Niu H. Recent advances in superhydrophobic and antibacterial cellulose-based fibers and fabrics: bio-inspiration, strategies, and applications. Adv Fiber Mater. 2023;5(5):1555-1591.

https://doi.org/10.1007/s42765-023-00297-1

[3] Varshney S, Pandey P, Gupta D, Sharma S. Role of fabric properties, moisture and friction in transfer of bacteria from fabric to fabric. Text Res J. 2020;90(3-4):478-485.

https://doi.org/10.1177/0040517519866956

[4] Das P, Ganguly S, Marvi PK, Muthalali M, Parniani F, Hassan S, et al. Thermo-fluorescent bactericidal quantum dots based smart multifunctional textiles via molecular surface engineering and 3D-printed interlocked architectures. Adv Healthc Mater. 2026;15(19):e05618. https://doi.org/10.1002/adhm.202505618

[5] Maurya P, Majumdar A, Butola BS, Goswami P, Bhattacharyya R. A scoping review of materials and approaches for developing antibacterial textiles. J Text Inst. 2026;117(4):686-718.

https://doi.org/10.1080/00405000.2025.2518342

[6] Osumanu HA, Deberu ON, Abdul-Karim A, Alhassan A, Addae EK, Afriyie SO, et al. Impact of COVID-19 pandemic on antibiotic resistance patterns of common bacterial pathogens to antibiotics in Northern Ghana. J Clin Lab Anal. 2026;40(7):e70191. https://doi.org/10.1002/jcla.70191

[7] Osiyemi EO, Okoh OA, Raufu TT. Molecular identification and antibiotic susceptibility of bacteria from cow and goat meat in a Nigerian market. Fed Polytech Ilaro J Pure Appl Sci. 2026;8(1.1).

[8] Nassimbwa Kabanda D. (2026). Antimicrobial Resistance in Diarrhea Treatment: Addressing Future Challenges in Africa. Idosr Journal Of Biochemisr, Biotechnology And Allied Fields 11(1):102-106. https://doi.org/10.59298/IDOSR/JBBAF/2026/102101106

[9] Ibanga IA, Ekong US, Akan OD, Akpabio U, Christopher M. Antibiotic resistance in chicken gut bacteria: a study on bacterial diversity and drug sensitivity in some Nigerian poultry farms. BMC Microbiol. 2026;26(1):491.

https://doi.org/10.1186/s12866-026-04972-2

[10] Pakdel E. Antibacterial cotton fabric with fluorine-free superhydrophobicity and UV protection via 3D flower-like TiO_2 microparticles/PDMS coating. Fibers Polym. 2026:1-13. https://doi.org/10.1007/s12221-026-01448-y

[11] Kumeleh SM, Hashemi A, Pouyakian M, Rashidi MA, Falahi S, Zendehdel R. Effective antibacterial medical mask based on the novel biosynthesized copper nanoparticles (CuNPs). Int J Microbiol.

https://doi.org/10.1155/ijm/3774572

[12] Ihsan T, Ananda A, Naswa D. Advanced adsorption materials for pathogen control: a critical review on virus and bacteria elimination in water treatment. Larhyss J. 2026;(65):105-141.

[13] Zhang L, Li Y, Zhao Y, Chen S, Ke J, Zarei I, et al. Hollow micro-/nanostructures for enhanced pathogen theranostics. Chem Soc Rev. 2026;55(10):5908-5948. https://doi.org/10.1039/d5cs00509d

[14] Malook MB, Ijaz M, Ijaz R, Shang J, Lv L, Ahmed T, et al. Nanotechnology-based strategies for sustainable management of bacterial plant diseases: mechanisms, applications, and future directions. Environ Sci Nano. 2026;13(2):723-747. https://doi.org/10.1039/d5en00936g

[15] Aslam H, Ali A, Umar A, Khan MU, Azam MZ, Ullah H, et al. Smart nanomaterials for clean water and a comprehensive exploration of the potentials of metal oxide nanoparticles in environmental remediation. Z Phys Chem. 2025. https://doi.org/10.1515/zpch-2025-0096

[16] Oheix E, Daou TJ, Pieuchot L. Antimicrobial zeolites and metal-organic frameworks. Mater Horiz. 2024;11(24):6222-6256. https://doi.org/10.1039/d4mh00259h

[17] Shaikh R, Pathan A, Anis M, Mardikar SP, Baig MI, Farooqui M, et al. Tuning the traits of nickel oxide nanoparticles employing green synthesis using *Brassica oleracea* L. var. *capitata* for exploring the antimicrobial, anticancer and supercapacitor applications. Nat Environ Pollut Technol. 2025;24(3).

https://doi.org/10.46488/NEPT.2025.v24i03.B4261

[18] Venkataraman S, Atchudan R, Arya S, Mahadevegowda SH, Sundramoorthy AK. Antimicrobial efficacy and mechanistic insights of 0D, 1D, 2D, and 3D nanoparticles: a review. Mini Rev Med Chem. 2026. https://doi.org/10.2174/0113895575428691260122055445

[19] Wang W, Wei X, Xu B, Gui H, Yan Y, Liu H, et al. Copper single-atoms loaded on molybdenum disulphide drive bacterial cuproptosis-like death and interrupt drug-resistance compensation pathways. Nano Micro Lett. 2026;18(1):111. https://doi.org/10.1007/s40820-025-01955-2

[20] Zhang YS, Ke S, Zhang J, Luo M, Li BH, Liu XX, et al. Phase-engineered MoS_2 nanosheets/probiotic vesicles hydrogel for diabetic wound healing via dynamic ROS modulation. J Nanobiotechnol. 2026. https://doi.org/10.1186/s12951-026-04488-x

[21] Zhang W, Yang Z, Zhang Y, Wang L, Zhang X, Mao J, et al. Multi-enzyme mimetic molybdenum nitride nanozymes reshape subgingival microenvironment for synergistic periodontitis therapy via ROS

mordanted with aloe vera. Ann Univ Oradea Fasc Text Leatherw. 2026;27(1):5.

[27] Demiray DS. Design of an antibacterial medical face mask with oleuropein additive. Ind Text. 2026;77(2):222-229. https://doi.org/10.35530/IT.077.02.202528.

[28] Varesano, A., Vineis, C., Aluigi, A., & Rombaldoni, F. (2011). Antimicrobial polymers for textile products. *Science against microbial pathogens: communicating current research and technological advances*, *3*, 99-110.

[29] Humphreys, C. J. (2013). The significance of Bragg's law in electron diffraction and microscopy, and Bragg's second law. *Foundations of Crystallography*, *69*(1), 45-50.

https://doi.org/10.1107/S0108767312047587

[30] Basak, M., Rahman, M. L., Ahmed, M. F., Biswas, B., & Sharmin, N. (2022). The use of X-ray diffraction peak profile analysis to determine the structural parameters of cobalt ferrite nanoparticles using Debye-Scherrer, Williamson-Hall, Halder-Wagner and Size-strain plot: Different precipitating agent approach. *Journal of Alloys and Compounds*, *895*, 162694.

https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.162694

[31] Humphreys, C. J. (2013). The significance of Bragg's law in electron diffraction and microscopy, and Bragg's regulation and microbiome remodeling. Adv Sci (Weinh). 2026:e17770.

https://doi.org/10.1002/advs.202517770

[22] Romero-Vargas Castrillón, S., Perreault, F., De Faria, A. F., & Elimelech, M. (2015). Interaction of graphene oxide with bacterial cell membranes: insights from force spectroscopy. *Environmental Science & Technology Letters*, *2*(4), 112-117.

https://doi.org/10.1021/acs.estlett.5b00066

[23] Nanda, S. S., Yi, D. K., & Kim, K. (2016). Study of antibacterial mechanism of graphene oxide using Raman spectroscopy. *Scientific reports*, *6*(1), 28443.

https://doi.org/10.1038/srep28443

[24] Li S, Xia S, Ma X, Du L, Li Y, Tang Z, et al. Graphene-based two-dimensional nanomaterials: from scalable synthesis, interfacial mechanism to emerging biomedical applications. Carbon Neutralization. 2026;5(1):e70121.

https://doi.org/10.1002/cnl2.70121

[25] Amrahov N, Hasanova U, Gunel A, Goncha A, Rzayev F, Gasimov E, et al. Influence of a new nanoensemble of graphene oxide and indole-3-acetic acid on the morphophysiological, biochemical, and ultrastructural characteristics of upland cotton (*Gossypium hirsutum* L.). Turk J Bot. 2026;50(4):318-340. https://doi.org/10.55730/1300-008X.2908

[26] Bridget A, Dorcas S, Josphat M. Evaluation of the functional finishing of cotton using pokeweed berry dye

[37] Magdy, M. (2024). A concise look into contact angle measurements in heritage characterization. *Advanced Research in Conservation Science*, *5*(2), 54-69.

https://doi.org/10.21608/arcs.2024.336172.1054

[38] Drelich, J., & Chibowski, E. (2010). Superhydrophilic and superwetting surfaces: definition and mechanisms of control. *Langmuir*, *26*(24), 18621-18623.

[39] Toffoli, C. M., Milatz, M., Moosmann, J. P., Jentschke, T., Williams-Riquer, F., Beckmann, F., & Grabe, J. (2026). Wetting via water condensation of hydrophobic grain surfaces as viewed by synchrotron-radiation computed tomography. *Acta Geotechnica*, 1-16.

https://doi.org/10.1007/s11440-026-02972-0

[40] Kaushik, R., Nandi, S., Mandal, M., & Gupta, A. N. (2024). Biocompatible l-cysteine-capped MoS2 nanoflowers for antibacterial applications: mechanistic insights. *ACS Applied Nano Materials*, *7*(7), 7753-7765.

https://doi.org/10.1021/acsanm.4c00260

[41] del Mar Pérez, M., Saleh, A., Yebra, A., & Pulgar, R. (2007). Study of the variation between CIELAB ΔE* and CIEDE2000 color-differences of resin composites. *Dental Materials Journal*, *26*(1), 21-28.

https://doi.org/10.4012/dmj.26.21

[42] Lee, Y. K. (2005). Comparison of CIELAB ΔE* and CIEDE2000 color-second law. *Foundations of Crystallography*, *69*(1), 45-50.

https://doi.org/10.1107/S0108767312047587

[32] Mondal, K. G., Jana, P. C., & Saha, S. (2023). Optical and structural properties of 2D transition metal dichalcogenides semiconductor MoS2. *Bulletin of Materials Science*, *46*(1), 15.

https://doi.org/10.1007/s12034-022-02852-9

[33] Mahdavi, M., Kimiagar, S., & Abrinaei, F. (2020). Preparation of few-layered wide bandgap MoS2 with nanometer lateral dimensions by applying laser irradiation. *Crystals*, *10*(3), 164.

https://doi.org/10.3390/cryst10030164

[34] Krishnamoorthy, K., et al. (2012). "Graphene oxide nanostructures modified multifunctional cotton fabrics." Applied Nanoscience, 2(2), 119–126.

[35] Guo, B., et al. (2015). "Synthesis of molybdenum disulfide/graphene oxide nanocomposites and their enhanced electrochemical performance." ACS Applied Materials & Interfaces, 7(5), 3292–3300

[36] Mallya, D. S., Yang, G., Lei, W., Muthukumaran, S., & Baskaran, K. (2022). Functionalized MoS2 nanosheets enabled nanofiltration membrane with enhanced permeance and fouling resistance. *Environmental Technology & Innovation*, *27*, 102719.

https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102719

differences after polymerization and thermocycling of resin composites. *Dental Materials*, *21*(7), 678-682.

A Comparative Study of the Antibacterial Performance of Cotton Fabrics Coated with Zinc Oxide, Graphene Oxide, and Molybdenum Disulfide Nanostructures

Mahboobe Esrafilian[1], Hakimeh Zare*[2], Mohammad Reza Sayed Mir[1], Fatemeh Ostovari[2], Mohammadali Shirgholami[1]

[1]Department of Textile Engineering, Ya. C., Islamic Azad University, Yazd, Iran

[2]Department of Physics, Yazd University P. O. Box 8915818411, Yazd, Iran

Abstract: Despite the inherent advantages of cotton fabrics, such as high moisture absorption, biocompatibility, and softness, their susceptibility to microbial growth often leads to unpleasant odors and the proliferation of pathogens. Consequently, the development of antibacterial textiles has emerged as a strategic research priority. In the present study, cotton fabrics were functionalized using zinc oxide (ZnO), graphene oxide (GO), and molybdenum disulfide (MoS_2) nanostructures. The physical and structural properties of the synthesized nanomaterials were characterized via transmission electron microscopy, X-ray diffraction, and UV-Vis spectroscopy. The results revealed that ZnO nanoparticles possess a wurtzite crystal structure with an average particle size of 20 nm, while GO and MoS_2 exhibited plate-like morphologies with dimensions in the micrometer and 150 nm ranges, respectively. Following the coating process, the microstructure, wettability, and antibacterial efficacy against Staphylococcus aureus (Gram-positive) and Escherichia coli (Gram-negative) were evaluated. The findings demonstrated that fabrics coated with MoS_2 and ZnO exhibited the largest zones of inhibition against both bacterial strains. Notably, GO-modified fabrics showed reduced antibacterial performance, which correlated with their decreased wettability. Furthermore, washing stability tests indicated that MoS_2 -coated fabrics maintained superior antibacterial activity, whereas GO-coated fabrics displayed enhanced abrasion resistance. Based on these findings, MoS_2 nanostructures are recommended as a highly stable and effective antibacterial coating for textile applications.

Keywords: Antibacterial, Nanostructure, Zinc oxide, Graphene oxide, Molybdenum disulfide, Cotton fabric.

Corresponding Author. Email: hzare@yazd.ac.ir

Received: 2026-09-09 Revised: 2026-10-06 Accepted: 2026-10-31