

Designing and Manufacturing of Regenerated Cellulose/ Ti₃C₂T_x MXene Textile for Electrothermal and Antibacterial Applications

Available in: <http://jips.ippi.ac.ir>

Iran. J. Polym. Sci. Technol.

(Persian),

Vol. 38, No. 3, 191-203

August-September 2025

ISSN: 1016-3255

Online ISSN: 2008-0883

DOI: 10.22063/JIPST.2025.35719.2399

Mansoor Mandegari¹, Komeil Nasouri^{1*}, and Seyed Amir Hossein Jalali^{2,3}

1. Department of Textile Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, 8415683111, Iran

2. Department of Natural Resources, Isfahan University of Technology, Isfahan, 8415683111, Iran

3. Research Institute for Biotechnology and Bioengineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, 8415683111, Iran

Received: 12 June 2025, accepted: 23 December 2025

ABSTRACT

Hypothesis: The development of smart and multifunctional textiles with various thermal, mechanical, electrical, electromagnetic-absorbing, and antibacterial properties has attracted significant attention from researchers. Materials that impart such functionalities include metallic nanoparticles and metal oxides, conductive polymers, carbon nanotubes, graphene, and MXenes. Despite introducing multiple advanced properties, MXene coatings preserve the inherent characteristics of smart fabrics. The main focus of this study is to investigate the antibacterial and electrothermal properties of MXene-coated cellulosic fabrics, as well as to examine how this coating influences the fabric's intrinsic features, such as breathability.

Methods: Ti₃C₂T_x MXene was synthesized from the MAX-phase precursor Ti₃AlC₂ using a fluoride-containing salt etching method. Subsequently, an aqueous MXene suspension with a concentration of 7 mg/mL was coated onto the surface of a polymeric fabric pretreated with sodium hydroxide. The electrothermal performance, antibacterial activity, and air permeability of the resulting material were then evaluated.

Findings: The MXene-coated smart cellulosic textile exhibited electrothermal performance (80 °C at 6 V) and inherent antibacterial activity of 77.53 ± 2.21% against *E. coli* and 66.84 ± 1.74% against *S. aureus* without the addition of any extra antimicrobial agents. The air-permeability results for the multifunctional coated textile (27.97 ± 2.84 cm/s) compared to the raw fabric (38.61 ± 0.35 cm/s) demonstrated acceptable breathability. Due to the alkali treatment of the cellulosic fabric, MXene uptake during the dip-coating process increased, resulting in a uniform and effective coating. Moreover, MXene nanosheets contain abundant functional groups, enabling strong attachment to the modified cellulose surface through hydrogen bonding. This MXene-based smart textile, while maintaining the intrinsic properties of the fabric, shows strong potential for applications such as de-icing, electrothermal heating, and protective warming garments.

Keywords:

MXene nanosheets,
smart textile,
regenerated cellulose,,
antibacterial,
electrothermal

(*)To whom correspondence should be addressed.

E-mail: k.nasouri@iut.ac.ir

Please cite this article using:

Mandegari M., Nasouri K., and Jalali S.A.H., Designing and Manufacturing of Regenerated Cellulose/Ti₃C₂T_x MXene Textile for Electrothermal and Antibacterial Applications, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, **38**, 191-203, 2025.

طراحی و ساخت منسوج سلولوزی بازساختی/مکسین $Ti_3C_2T_x$ برای کاربردهای الکتروگرمایی و ضدباکتریایی

دسترسی پذیر در نشانی: <http://jips.ippi.ac.ir>

مجله علوم و تکنولوژی پلیمر،

سال سی و هشتم، شماره ۳،

صفحه ۲۰۳-۱۹۱، ۱۴۰۴

ISSN: 1016-3255

Online ISSN: 2008-0883

DOI: 10.22063/JIPST.2025.35719.2399

منصور ماندگاری^۱، کمیل نصوری^{۱*}، سید امیر حسین جلالی^{۲،۳}

۱- اصفهان، دانشگاه صنعتی اصفهان دانشکده مهندسی نساجی، کد پستی ۸۴۱۵۶۸۳۱۱۱

۲- اصفهان، دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مهندسی منابع طبیعی، کد پستی ۸۴۱۵۶۸۳۱۱۱

۳- اصفهان، دانشگاه صنعتی اصفهان، پژوهشکده زیست فناوری و مهندسی زیستی، کد پستی ۸۴۱۵۶۸۳۱۱۱

دریافت: ۱۴۰۴/۳/۲۲، پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۲

چکیده

فرضیه: توسعه منسوجات هوشمند و چندمنظوره با ویژگی‌های مختلف گرمایی، مکانیکی، الکتریکی، جذب امواج و ضدباکتری مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. موادی که این خواص را ایجاد می‌کنند، شامل نانوذرات فلزی و اکسیدهای فلزی، پلیمرهای رسانا، نانولوله‌های کربنی، گرافن و مکسین هستند. مکسین در پوشش‌دهی منسوجات با وجود ایجاد خواص چندگانه، خواص ذاتی پارچه هوشمند را حفظ می‌کند. تمرکز اصلی پژوهش بر این است که خواص ضدباکتریایی و الکتروگرمایی پارچه سلولوزی پوشش‌یافته با مکسین چگونه است و چه اثری بر خواص ذاتی پارچه مانند تنفس‌پذیری می‌گذارد.

روش‌ها: مکسین $Ti_3C_2T_x$ از پیش‌ماده فاز مکس $Ti_3C_2T_x$ با روش نمک دارای فلئور سنتز شد. سپس تعلیق آبی مکسین با غلظت ۷ mg/mL روی سطح پارچه پلیمری اصلاح‌شده با سدیم هیدروکسید پوشش‌دهی شده و خواص الکتروگرمایی، ضدباکتریایی و نفوذپذیری هوا ارزیابی شده است. **یافته‌ها:** منسوج سلولوزی هوشمند پوشش‌یافته با مکسین، خواص الکتروگرمایی ($80^\circ C$ در ۶V) و عملکرد ضدباکتریایی $77/53 \pm 2/21$ درصد در برابر باکتری *E. coli* و $66/84 \pm 1/74$ درصد در برابر باکتری *S. aureus* بدون افزودن مواد اضافی از خود نشان داد. نتایج تراوایی هوا برای منسوج چندمنظوره پوشش‌یافته ($2/84 \pm 27/97$ cm/s) نسبت به پارچه خام ($38/61 \pm 0/35$ cm/s) تنفس‌پذیری مناسبی را نشان داد. در پارچه سلولوز پوشش‌یافته به دلیل عمل‌آوری با سود، جذب مکسین روی پارچه حین غوطه‌وری افزایش یافته و پوشش‌دهی روی پارچه به خوبی انجام می‌شود. همچنین نانوصفحه‌های مکسین دارای گروه‌های عاملی فراوان هستند که از پیوندهای هیدروژنی بین مکسین و سلولوز اصلاح‌شده به راحتی به سطح الیاف متصل می‌شوند. این پارچه هوشمند مبتنی بر مکسین با حفظ خواص ذاتی پارچه، می‌تواند در کاربردهایی مانند یخ‌زدایی، گرمایش الکتریکی و لباس‌های محافظتی گرم‌کننده استفاده شود.

واژه‌های کلیدی

نانوصفحه‌های مکسین،
منسوج هوشمند،
سلولوز بازساختی،
ضدباکتریایی،
الکتروگرمایی

* مسئول مکاتبات، پیام‌نگار:

k.nasouri@iut.ac.ir

مقدمه

امروزه تمایل به توسعه منسوجات هوشمند و چندمنظوره با ویژگی‌های گرمایی، مکانیکی، الکتریکی، جذب امواج و ضدباکتری مورد توجه قرار گرفته است [۱]. پارچه‌های جدید فراتر از کاربردهای سنتی خود پیش رفته‌اند و امروزه در بخش‌های متنوعی مانند خودروسازی، هوافضا، الکترونیک، پزشکی و مواد پیشرفته به‌طور گسترده استفاده می‌شوند [۲]. پژوهشگران در تلاش هستند تا با ترکیب مواد مختلف، عملکرد و ارزش منسوجات را ارتقا دهند. پارچه‌ها به دلیل ویژگی‌های ذاتی نظیر سبکی، انعطاف‌پذیری، تخلخل و استحکام گزینه‌ای ایده‌آل برای ساخت مواد با کاربردهای گوناگون به‌شمار می‌آیند [۳]. برخلاف بسیاری از مواد، پارچه‌ها در صورت از دست‌دادن خواص خود، قابل بازیافت و احیا هستند [۴]. از این‌رو، پارچه‌ها بستر مناسبی برای ادغام ویژگی‌های متنوع مواد به‌شمار می‌روند. پارچه‌های پوشش‌دهی‌شده مزایای منحصربه‌فردی دارند؛ به‌عنوان مثال، پارچه‌هایی که با مواد کربنی پوشش یافته‌اند، می‌توانند خواص و کاربردهای گوناگونی در حوزه‌هایی متنوع مانند ذخیره‌سازی انرژی [۵]، الکترودها [۶]، حسگرها [۷]، اثرهای گرمانوری [۸]، الکتروگرمایی [۹] و ضدباکتری [۱۰] ارائه دهند. در میان منسوجات هوشمند چندمنظوره، الیاف سلولوزی ویسکوز نسبت به سایر الیاف به دلیل آب‌دوستی زیاد، گروه‌های عاملی فراوان، ویژگی‌های مکانیکی مطلوب و امکان مخلوط‌شدن با سایر الیاف از اهمیت زیادی برخوردارند [۱۱، ۱۲]. مطالعات متعددی توانسته‌اند منسوجات هوشمند با ویژگی‌های متنوعی مانند مقاومت در برابر شعله [۱۳]، فعالیت ضدباکتری [۱۴]، اثرهای گرمانوری/الکتروگرمایی [۱۵] و محافظت امواج الکترومغناطیس [۱۶] طراحی و تولید کنند. ترکیباتی که چندین عملکرد دارند و روی منسوجات پوشش‌دهی شده‌اند، شامل نانوذرات فلزی و اکسیدهای فلزی (Ni, Cu, Ag, ZnO, SiO_2) و پلی‌پیرول و پلی‌تیوفن [۱۷، ۱۸]، پلی‌استیلن، پلی‌آیلین، پلی‌پیرول و پلی‌تیوفن [۱۹]، نانولوله‌های کربنی، گرافن [۲۰] و سایر مواد هستند. چالش اصلی استفاده از این ترکیبات، نیاز به پوشش‌دهی چند ماده مختلف روی منسوجات برای دستیابی به عملکرد چندگانه و در نتیجه زیاده‌بودن هزینه نهایی پارچه و از دست‌دادن خواص ذاتی پارچه مانند سبکی، تنفس‌پذیری و انعطاف‌پذیری آن است و در برخی موارد، سازگاری با پوست نیز کاهش می‌یابد.

مکسین با فرمول عمومی $M_{n+1}X_nT_x$ ($n=1, 2, 3$) از راه زدایش گزینشی (etching) عنصر A از فاز مکس با استفاده از مواد متفاوت سنتز می‌شوند. در این ساختارها، M نمایانگر یک فلز واسطه (مانند Ta, Mo, Nb, Hf, Zr, Cr, V, Ti, Sc و W) و X نشان‌دهنده کربن

یا نیتروژن است و T_x به گروه‌های عاملی سطحی (F، -OH و -O) اشاره دارد [۲۱]. مشکل مکسین‌ها مانند همه نانومواد، داشتن حالت پودری است، یکی از روش‌هایی که بتوان مکسین‌ها را در شکل‌های به‌هم پیوسته کنار هم آورد، بارگذاری آن‌ها در سازه‌های الیافی است. روش‌های متعددی برای بارگذاری مکسین روی منسوجات وجود دارد که شامل پوشش‌دهی، ریسندگی و حبس مولکولی است. روش پوشش‌دهی به دلیل قابلیت تکرارپذیری، حفظ انعطاف‌پذیری، بازدهی زیاد و مناسب‌بودن برای استفاده در مقیاس صنعتی، ساده‌ترین، کارآمدترین و مقرون‌به‌صرفه‌ترین روش برای تولید منسوجات هوشمند به‌شمار می‌رود [۲۲].

نانوصفحه‌های مکسین از نوع $Ti_3C_2T_x$ به‌عنوان نانومواد دوجانبه‌ای، دارای مجموعه گسترده از ویژگی‌های چندمنظوره هستند که شامل خواص مختلف نوری، الکتریکی، مغناطیسی، مکانیکی، گرمایی، جذب امواج ریزموج (microwave)، حسگرهای گازی، تصفیه آب، ضدباکتری و بسیاری از کاربردهای دیگر می‌شود [۲۳]. تاکنون گستره وسیعی از الیاف طبیعی شامل پنبه [۲۴]، کتان [۲۵]، بامبو [۲۶] و الیاف مصنوعی شامل نایلون [۲۶]، پلی‌استر [۲۷] و کربن [۲۸] با مکسین پوشش‌دهی شده‌اند و کاربرد ضدباکتری و الکتروگرمایی منسوجات پوشش‌یافته با مکسین به‌طور هم‌زمان کمتر بررسی شده است. الکتروگرمایی به تولید گرما از راه عبور جریان الکتریکی از یک رسانا گفته می‌شود. برای منسوجات گرمایشی، ویژگی‌هایی مانند سبکی و انعطاف‌پذیری ضروری هستند [۲۹]. براساس مطالعات، مواد رسانای فعال مورد استفاده در این نوع پارچه‌های گرم‌کننده به‌طور عمده شامل نانوسیم‌های فلزی [۳۰]، پلیمرهای رسانا [۳۱]، نانولوله‌های کربنی [۳۰]، گرافن [۳۲] و نانوکامپوزیت‌های ترکیبی آن‌ها [۳۳] هستند. در این پژوهش، از مکسین برای مدیریت گرمای شخصی استفاده شده است. در سال‌های اخیر، سازه‌های الیافی با قابلیت زیاد الکتروگرمایی توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند [۳۴، ۳۵]. Su همکاران [۹] پارچه‌ای هوشمند و انعطاف‌پذیر را با ترکیب نمک آمونیوم چهارظرفیتی کیتوسان و مکسین روی پارچه پلی‌استری طراحی کردند. این پارچه رسانایی الکتریکی مطلوب، تبدیل الکتروگرمایی سریع، کارایی ضدباکتری ۹۹٪ در برابر باکتری *E. coli* و مقاومت زیاد در برابر شعله از خود نشان داد. Zhang و همکاران [۳۶] با استفاده از پوشش‌دهی مکسین روی پارچه پنبه‌ای، پارچه‌ای هوشمند با رسانندگی زیاد، قابلیت گرمایش ژولی، محافظت امواج با حفظ انعطاف‌پذیری و تنفس‌پذیری، تنها با ۶٪ وزنی مکسین طراحی و تولید کردند. تاکنون در هیچ پژوهشی پارچه سلولوزی ویسکوز/مکسین بررسی نشده و بنابراین در این پژوهش برای

اولین بار منسوج هوشمند از جنس ویسکوز به وسیله نانوصفحه‌های مکسین پوشش‌دهی شده است. به همین منظور، ابتدا نانوصفحه‌های مکسین $Ti_3C_2T_x$ با روش نمک دارای فلئور از فاز مکس Ti_3AlC_2 سنتز شد و سپس روی پارچه سلولوز اصلاح‌شده با روش غوطه‌وری پوشش‌دهی شد و در نهایت خواص چندگانه ضدباکتریایی و الکتروگرمایی منسوج ویسکوز/مکسین ارزیابی شد.

تجربی

مواد

پارچه ویسکوز تجاری تاری بودی با تراکم 30 cm^{-1} ، تراکم پودر 25 cm^{-1} و وزن 135 g/m^2 ، از شرکت یزدباف خریداری شد. پودر فاز مکس (Ti_3AlC_2)، خلوص ۹۹٪، از شرکت American elements تهیه شد. لیتیم فلئورید (LiF)، خلوص ۹۹/۹۹٪ و هیدروکلریک اسید غلیظ (HCl)، خلوص ۳۷٪، از شرکت Merck آلمان تهیه شد. پودر سدیم هیدروکسید ($NaOH$)، خلوص ۹۹٪، نیز از شرکت Merck خریداری شد.

دستگاه‌ها

برای بررسی شکل‌شناسی فاز مکس، نانوصفحه‌های مکسین، پارچه ویسکوز خام و پارچه پوشش‌دهی‌شده از میکروسکوپ الکترونی پوششی گسیل میدانی (FE-SEM) مدل FEG-250 ساخت ژاپن با بزرگ‌نمایی ۱۰ تا ۱۰۰۰۰۰ برابر استفاده شد. برای انجام این آزمون، ذرات و پارچه پوشش‌دهی‌شده در ابعاد مناسبی بریده شده و سپس با دستگاه لایه‌نشان طلا، به کمک لایه نازکی از طلا با قطر 10 nm به مدت ۵ min پوشش‌دهی شده و پس از قرارگیری در داخل میکروسکوپ، تصاویری با بزرگ‌نمایی‌های مختلف، تهیه شدند. به منظور بررسی نیمه کمی عناصر و توزیع آن‌ها در ذرات، پارچه‌های خام و پوشش‌دهی‌شده، از سامانه طیف‌سنجی پاشنده انرژی پرتو X (EDS) استفاده شد. به منظور بررسی ریزساختار مکسین و پارچه خام و پوشش‌دهی‌شده، پراش‌سنجی پرتو X انجام شد. برای دستیابی به الگوهای پراش نمونه‌ها از دستگاه پراش پرتو X (XRD) مدل PW1730 ساخت آلمان استفاده شد. دستگاه XRD استفاده‌شده، دارای هدف مسی و صافی نیکلی است که آزمون با طول موج $1.541 \text{ \AA}$ ، تحت ولتاژ 40 kV و شدت جریان 30 mA انجام شد. اندازه گام 0.05° ، زمان گام 1 s و محدوده زاویه $5-90^\circ$ در نظر گرفته شد. سپس، الگوهای پراش پرتو X با نرم‌افزار

روش‌ها

تهیه نانوصفحه‌های مکسین $Ti_3C_2T_x$

از پودر $Ti_3C_2T_x$ به عنوان پیش‌ماده برای تولید نانوصفحه‌های مکسین $Ti_3C_2T_x$ با روش زدایش با نمک دارای فلئور استفاده شد و شرایط سنتز مکسین براساس مطالعات پیشین انتخاب شد [۳۸، ۳۹]. بنابراین، $2/5 \text{ g}$ پودر LiF در هیدروکلریک اسید (9 mol/L) درون ظرف تفلونی حل شد. سپس، $2/5 \text{ g}$ از $Ti_3C_2T_x$ به تدریج به محلول اضافه شد و در دمای $2 \pm 35^\circ \text{C}$ به مدت 48 h هم‌زده شد. تعلیق نهایی با آب بدون یون شسته شد و عملیات مرکزگریزی تا زمانی که pH محلول به حدود ۶ برسد، تکرار شد. $Ti_3C_2T_x$ باقی‌مانده حاصل دوباره در آب بدون یون پراکنده شد و با فراصوت‌دهی به مدت 30 min دیگر فرایند لایه‌لایه‌شدن انجام شد تا مکسین $Ti_3C_2T_x$ با لایه‌های کمتر به دست آید. در نهایت، مکسین $Ti_3C_2T_x$ به دست آمده به مدت 40 min در 3500 cycle/min در عملیات مرکزگریزی قرار گرفت و سپس درون آون به مدت 24 h خشک شد.

تهیه پارچه سلولوزی/مکسین

در این پژوهش، از پارچه سلولوزی ویسکوز به عنوان بستر ایده‌آل برای تولید منسوجات هوشمند پوشش‌پذیر چندمنظوره استفاده شده است. پیش از پوشش‌دهی، پارچه ویسکوز خام با استفاده از صابون غیریونی (1 g/L) در دمای $55 \pm 5^\circ \text{C}$ به مدت 30 min شسته شد، سپس با آب مقطر شست‌وشو داده شد تا ناخالصی‌های باقی‌مانده از بین برود و سپس در دمای محیط خشک شد. به منظور اصلاح سطح پارچه ویسکوز خام با سدیم هیدروکسید، پارچه ویسکوز با محلول $NaOH$ (3 mol/L) در دمای جوش به مدت 1 h عمل‌آوری شد، سپس، با محلول استیک اسید (۲٪) به مدت 40 min در دمای اتاق خنثی‌سازی و شسته شد تا سطوح الیاف فعال شده و در نهایت در دمای اتاق خشک شد. پس از آن پارچه ویسکوز اصلاح‌شده در تعلیق آبی مکسین با غلظت 7 mg/mL در مدت زمان مشخصی

رفتار الکتروگرمایی چرخه‌ای نمونه بهینه طی ۶ چرخه پیوسته در ولتاژ ۶ V است. آزمایش الکتروگرمایی با اعمال ولتاژ ثابت ۶ V و به مدت ۲۴۰ s انجام شد. بدین صورت که با گذشت زمان و اعمال ولتاژ، تغییرات دما ثبت شد و پس از مدت ۲۴۰ s ولتاژ قطع شده و تغییرات دمای پارچه پوشش‌دهی شده مجدداً ثبت شد و این عملیات برای ۶ چرخه انجام شد.

نتایج و بحث

بررسی شکل‌شناسی فاز مکس و مکسین

همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، نانوصفحه‌های مکسین $Ti_3C_2T_x$ با زدایش گزینشی اتم‌های Al از فاز مکس Ti_3AlC_2 در محلول LiF/HCl به‌عنوان جداکننده سنتز شدند و با استفاده از امواج فراصوت به صفحات لایه‌لایه شده تبدیل شدند. شکل ۱ (a) و (b) به ترتیب تصاویر FE-SEM فاز مکس Ti_3AlC_2 و نانوصفحه‌های مکسین $Ti_3C_2T_x$ سنتز شده را نشان می‌دهد. نتایج نشان داد، پیش‌ماده $Ti_3C_2T_x$ دارای ساختار توده‌ای متراکم چندوجهی با صفحه‌های روی هم انباشته شده است که ناشی از وجود نیروی بین‌اتمی قوی میان لایه‌هاست. پس از زدایش فاز مکس با روش نمک دارای فلوئور این صفحه‌ها از یکدیگر جدا شده و به شکل‌شناسی آکاردئونی شکل تبدیل می‌شود و مکسین $Ti_3C_2T_x$ سنتز می‌شود که با مطالعات قبلی مطابقت دارد [۴۳، ۴۴]. بنابراین، وجود صفحه‌های لایه‌ای (شکل ۱ (a))، حذف اتم‌های Al، لایه‌برداری $Ti_3C_2T_x$ و سنتز موفق آمیز نانوصفحه‌های مکسین را نشان می‌دهد.

بررسی ساختار سطحی پارچه ویسکوز خام و پوشش‌یافته

پس از سنتز موفق مکسین از فاز مکس، فرایند پوشش‌دهی روی پارچه ویسکوز انجام شد. به منظور ساخت منسوج هوشمند، پارچه ویسکوز خام بافته شده به عنوان بستر انتخاب شد و عملیات اصلاح سطح پارچه ویسکوز با سدیم هیدروکسید انجام شد. مکسین $Ti_3C_2T_x$ به دلیل پراکنش خوب در آب و رسانایی الکتریکی مناسب آن در بین انواع مکسین، به عنوان ماده رسانا برای پوشش‌دهی انتخاب شد که به تولید منسوجات هوشمند ویسکوز منجر شد. فرایند پوشش‌دهی پارچه ویسکوز به کمک مکسین با غلظت ۷ mg/mL در روش غوطه‌وری انجام و عملیات برای ۶ چرخه پوشش‌دهی صورت گرفت. در نهایت، درون آون با دمای ۱۰۰ °C تثبیت شدند و خواص ضدباکتری و الکتروگرمایی پارچه حاصل با پارچه خام سنجش شدند. تصاویر

غوطه‌ور شد. سپس، در دمای ۲ ± ۳۵ °C خشک شدند. این عملیات به مدت ۶ چرخه تکرار شد و در نهایت پارچه ویسکوز پوشش‌یافته با مکسین درون آون با دمای ۱۰۰ °C به مدت ۳۰ min تثبیت شد.

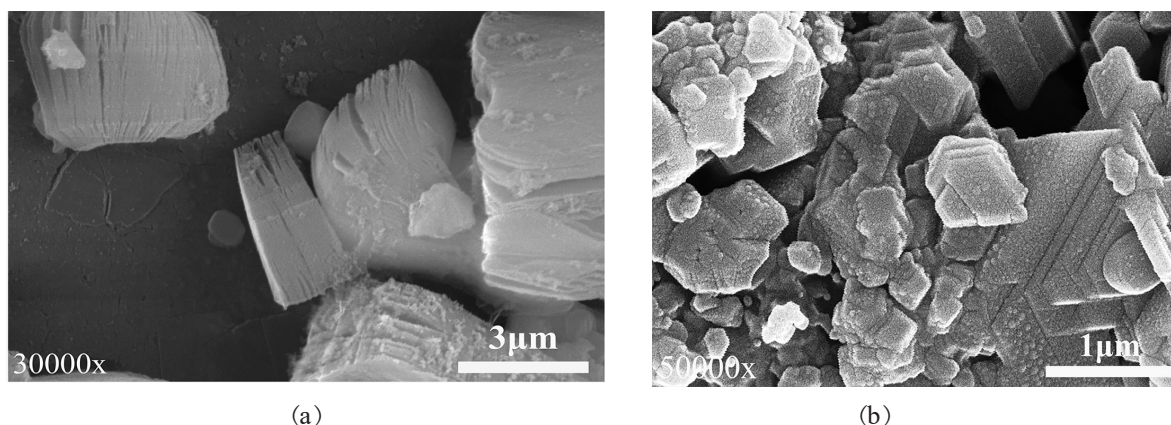
بررسی خواص ضدباکتریایی و الکتروگرمایی

به منظور ارزیابی فعالیت ضدباکتریایی از روش انتشار در محیط کشت مایع استفاده شد [۴۰]. خواص ضدباکتریایی نمونه‌های ویسکوز خام و پوشش‌یافته با مکسین در برابر باکتری گرم منفی *E. coli* و باکتری گرم مثبت *S. aureus* بررسی شد. تعلیق‌های به دست آمده از باکتری‌های *S. aureus* و *E. coli* با تکان دادن ۱۷۰ rpm در دمای ۳۷ °C به مدت ۲۴ h در محیط کشت آبگوشت لوریا برتانی (Luria-Bertani Broth, LB) کشت داده شدند و پس از رساندن غلظت باکتری به ۵ × ۱۰^۵ CFU/mL تا غلظت پوشش‌یافته با مکسین در ابعاد مناسب بریده و درون اتوکلاو استرون سازی شدند. پس از آن، پارچه‌ها در ۵ mL از تعلیق باکتریایی رقیق شده در ویال‌های جداگانه قرار گرفتند و گرم‌خانه‌گذاری شدند. در نهایت، ۱ mL از تعلیق‌های باکتریایی به دست آمده به ظرف کشت میکروبی دارای LB آگار منتقل شد و به مدت یک شبانه‌روز داخل گرم‌خانه در دمای ۳۷ °C قرار گرفت. پس از این مدت تعداد کلنی‌های روی ظرف کشت شمارش شد. سپس، درصد کاهش باکتریایی نمونه‌ها مطابق معادله (۱) اندازه‌گیری شد [۱۶، ۴۲]:

$$R = (A-B)/A \times 100 \quad (1)$$

در این معادله، A و B به ترتیب تعداد واحدهای تشکیل دهنده کلنی (CFU) نمونه‌های شاهد و پوشش‌یافته را نشان می‌دهد.

به منظور سنجش خاصیت الکتروگرمایی پارچه ویسکوز پوشش‌یافته با نانوصفحه‌های مکسین، پاسخ گرمایی نمونه به کمک آزمایش الکتروگرمایی با استفاده از منبع تغذیه DC ساخت چین ارزیابی شد. نمونه پارچه با ابعاد تقریبی ۲ × ۲ cm^۲ روی یک زیرلایه چوبی عایق قرار داده شد. پس از آن، هر دو لبه پارچه به کمک گیره‌های فلزی به منبع تغذیه متصل شدند. اندازه‌گیری دما در فواصل زمانی مختلف با استفاده از یک مولتی‌متر و سیم‌های اتصال انجام شد. به منظور سنجش، سیمی از مولتی‌متر به مرکز پارچه هدف به کمک گیره کوچک متصل شد و در فواصل زمانی مختلف، دما ثبت شد و هر آزمایش سه مرتبه تکرار و میانگین نتایج گزارش شد. این بررسی از دو چیدمان اصلی تشکیل شده که شامل، ارزیابی عملکرد الکتروگرمایی پارچه پوششی در ولتاژهای اعمالی مختلف و ارزیابی

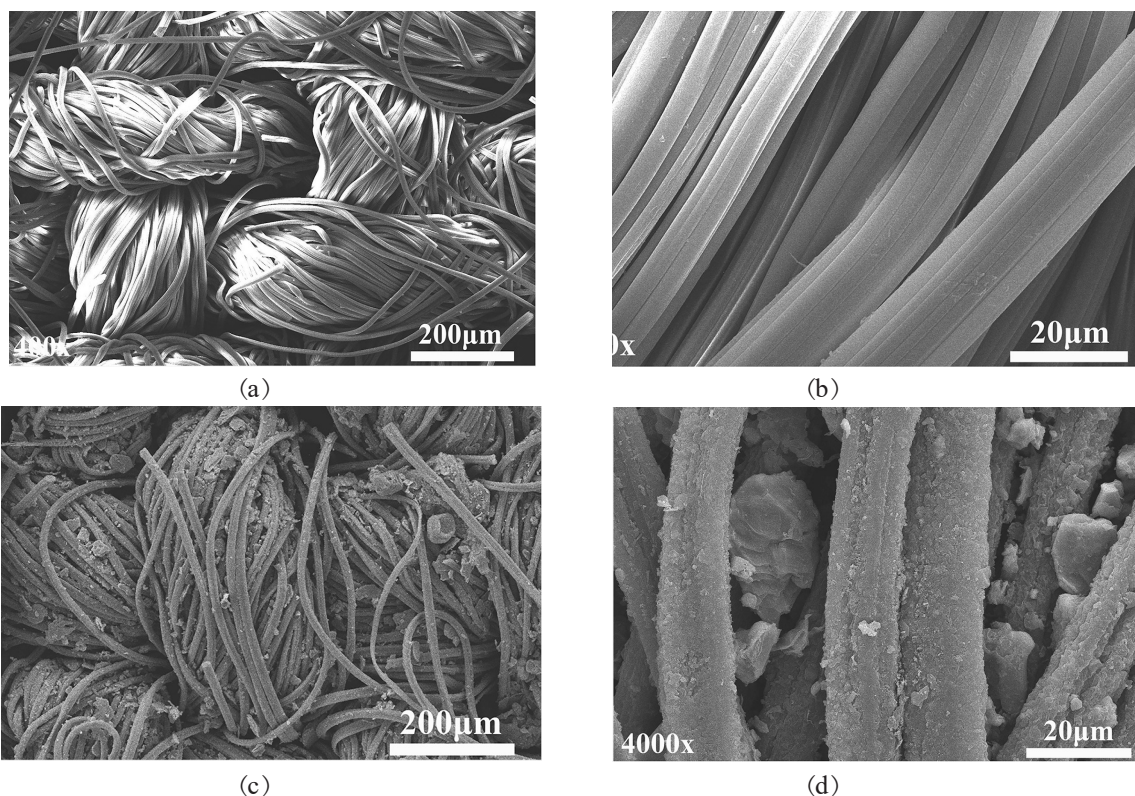


شکل ۱- تصاویر FE-SEM از نمونه‌ها: (a) فاز مکس و (b) مکسین سنتز شده.

Fig. 1. FE-SEM images of the samples: (a) MAX phase, and (b) synthesized MXene.

می‌دهد که پس از پوشش‌دهی پارچه با مکسین، سطح تک‌تک الیاف و یسکوز با نانوصفحه‌های مکسین پوشش یافته است. به دلیل اینکه تعداد چرخه‌های پوشش‌دهی زیاد است، همه سطح الیاف ناهموار و زبر شده و نانوصفحه‌های بیشتری روی یکدیگر پوشش‌دهی شده‌اند و با وجود تعداد چرخه پوشش‌دهی، همچنان ساختار لیفی و متخلخل پارچه پلی‌استری خام حفظ شده است.

از FE-SEM از پارچه ویسکوز خام و پارچه ویسکوز با پوشش مکسین با بزرگ‌نمایی مختلف در شکل ۲ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۲ (a) و (b) نشان داده شده است، شکل‌شناسی سطح پارچه ویسکوز خام، سطحی صاف و بدون ناخالصی است که متشکل از نخ‌های تار و پود با فضای خالی زیاد بین الیاف را نشان می‌دهد. شکل ۲ (c) و (d) پارچه ویسکوز پوشش‌یافته با مکسین را نشان



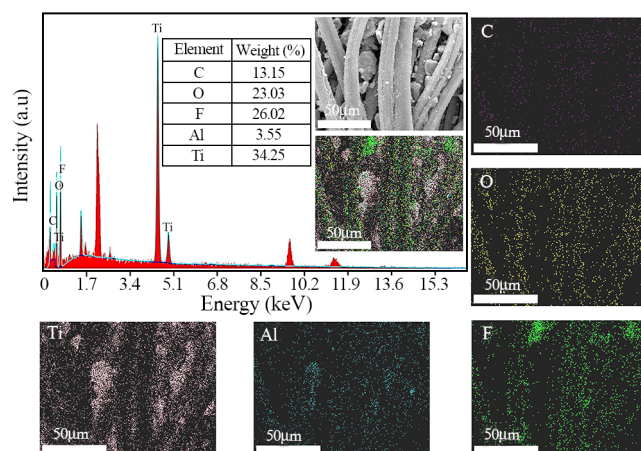
شکل ۲- تصاویر FE-SEM از پارچه‌های (a)، (b) ویسکوز خام و (c)، (d) پوشش‌دهی شده با مکسین در بزرگ‌نمایی مختلف.

Fig. 2. FE-SEM images of (a), (b) raw viscose fabrics, and (c), (d) MXene-coated fabrics at different magnifications.

یکنواخت و همگن روی سطح پارچه پوشش یافته با مکسین توزیع شده است. ساختارهای مختلف مکسین با جداکننده‌های متفاوت سنتز شده‌اند که گروه‌های عاملی سطحی مانند $-O$ ، $-F$ ، یا $-OH$ را به ساختار متصل می‌کنند، که با T_x در فرمول $M_{n+1}X_nT_x$ مکسین تعریف شده است [۴۳]. بنابراین عناصر F و O در تجزیه عنصری پارچه پوششی با مکسین نیز ناشی از گروه‌های عاملی مکسین سنتز شده (T_x) است. شایان ذکر است مقادیر ناچیز Al نیز می‌تواند از وجود اندک فاز مکس زدایش نشده روی پارچه باشد و سنتز موفقیت‌آمیز مکسین را نیز گواهی می‌دهد. پوشش‌دهی خوب پارچه و یسکوز با نانوصفحه‌های مکسین، به برهم‌کنش مناسب بین لایه‌های مکسین و الیاف و یسکوز مربوط می‌شود. به منظور افزایش فعالیت سطحی پارچه، و یسکوز با محلول $NaOH$ عمل‌آوری شد که در اثر این عملیات، ساختار سلولوز ۱ به سلولوز ۲ تبدیل شده و جذب مکسین روی پارچه و یسکوز در حین غوطه‌وری افزایش یافته است و پوشش‌دهی روی پارچه به‌خوبی انجام می‌شود. همچنین نانوصفحه‌های مکسین دارای گروه‌های عاملی فراوان $(-O)$ ، $-F$ و $(-OH)$ هستند که از پیوندهای هیدروژنی بین مکسین و پارچه و یسکوز به‌راحتی به سطح الیاف متصل می‌شوند.

بررسی ریزساختار پارچه خام و پوشش یافته

به منظور بررسی ریزساختار پارچه‌های و یسکوز خام و پوشش‌دهی شده و اطمینان از وجود مکسین سنتز شده روی پارچه و یسکوز آزمون XRD انجام شد. الگوهای XRD پارچه‌های و یسکوز پیش و پس



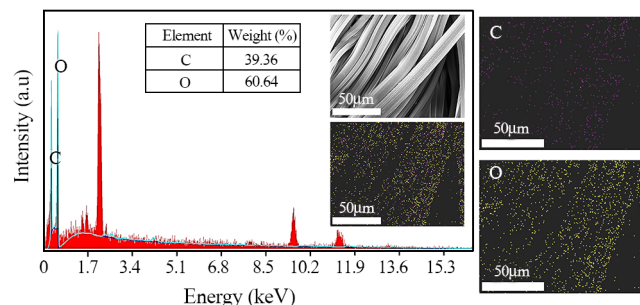
شکل ۴- نتایج MAP و طیف تجزیه عنصری EDS به‌دست آمده از سطح پارچه و یسکوز پوشش یافته با مکسین.

Fig. 4. MAP results and EDS elemental analysis spectrum obtained from the surface of MXene-coated viscose fabric.

پس از پوشش‌دهی، مقدار تراوایی هوای پارچه و یسکوز خام و پوشش‌یافته با مکسین محاسبه شد. میانگین نتایج تراوایی هوا برای پارچه‌های و یسکوز خام و پوششی با مکسین به ترتیب $38/61 \pm 0/35$ cm/s و $27/97 \pm 2/84$ cm/s است که نسبت به هم تفاوت معنی‌داری را نشان می‌دهند و می‌تواند ناشی از قرارگرفتن تجمع‌ی از صفحه‌های مکسین روی پارچه پوشش یافته باشد. شایان است، با توجه به مرجع [۴۵]، این مقدار تغییرات تراوایی هوا برای پارچه خام و پوشش‌یافته با مکسین مناسب ارزیابی می‌شود. بنابراین، پارچه‌های هوشمند و یسکوز با پوشش مکسین می‌توانند تا حدی راحتی پوشش داشته باشند و خواص ذاتی نظیر تنفس‌پذیری را حفظ کنند.

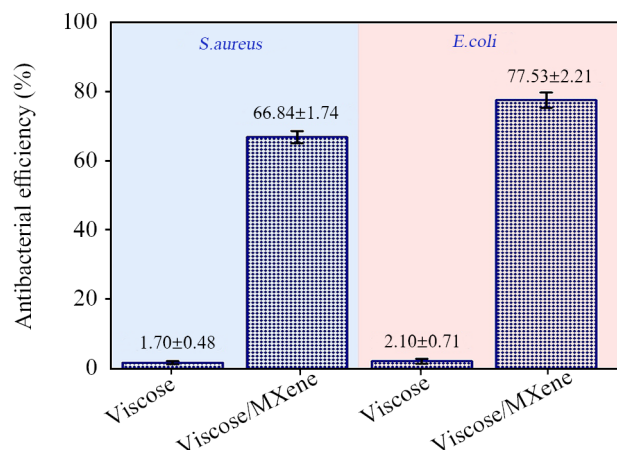
تجزیه عنصری پارچه خام و پوشش یافته با MAP

به منظور بررسی عناصر تشکیل دهنده پارچه خام و پوشش‌دهی شده با مکسین، تجزیه عنصری انجام شد. شکل ۳ و ۴ به ترتیب طیف EDS، MAP و درصد وزنی عناصر موجود در پارچه‌های و یسکوز خام و پوشش‌یافته با مکسین را نشان می‌دهد. در تصاویر MAP عناصر کربن با رنگ بنفش، اکسیژن با رنگ زرد، فلئوئور به رنگ سبز، آلومینیم به رنگ آبی و تیتانیوم با رنگ صورتی مشخص شده‌اند. همان‌طور که نمایان است، پارچه و یسکوز خام فقط دارای عناصر کربن و اکسیژن به ترتیب با مقادیر حدود ۴۰٪ و ۶۰٪ است (شکل ۳) که پس از پوشش‌دهی پارچه با مکسین سنتز شده، افزون بر O و C ، عناصر Al ، Ti و F نیز روی سطح پارچه وجود دارند. از سوی دیگر، سطح پارچه پوشش‌یافته با مکسین (شکل ۴) شامل مقادیر زیاد عناصر O ، F ، Ti و C و مقدار کم Al بود که نشان می‌دهد، نانوصفحه‌های مکسین روی سطح پارچه و یسکوز پوشش‌دهی شده است و از تصاویر MAP مشاهده می‌شود، عناصر نام‌برده به‌طور



شکل ۳- نتایج MAP و طیف تجزیه عنصری EDS به‌دست آمده از سطح پارچه و یسکوز خام.

Fig. 3. MAP results and EDS elemental analysis spectrum obtained from the surface of raw viscose fabric.

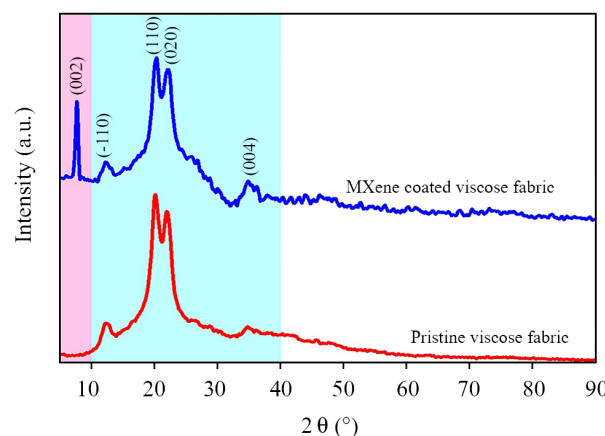


شکل ۶- بازده ضدباکتریایی پارچه ویسکوز خام و پوشش یافته با مکسین در برابر باکتری *S. aureus* و *E. coli*.

Fig. 6. Antibacterial efficiency of raw and MXene-coated viscose fabrics against *S. aureus* and *E. coli*.

ساختار آکاردئونی شکل، آب دوستی زیاد سطح آن ها و رسانندگی الکتریکی مناسب آن ها، می توانند برای غیرفعال کردن باکتری ها استفاده شوند. کارایی ضدباکتریایی پارچه ویسکوز پوشش یافته با مکسین به طور میانگین به حدود ۷۵٪ رسیده است. بدین معنی که وجود نانوصفحه های مکسین $Ti_3C_2T_x$ روی سطح پارچه ویسکوز باعث کاهش قابلیت زنده ماندن باکتری ها می شود. همان طور که از شکل ۶ مشاهده می شود، در نمونه پارچه پوشش یافته با مکسین، کارایی ضدباکتریایی نمونه در برابر باکتری گرم منفی *E. coli* به طور میانگین به ۷۷/۵۳ ± ۲/۲۱ درصد و در برابر باکتری گرم مثبت *S. aureus* به ۶۶/۸۴ ± ۱/۷۴ درصد رسیده است.

به عبارت دیگر، بازده ضدباکتریایی برای پارچه ویسکوز پوشش یافته با مکسین $Ti_3C_2T_x$ در برابر *E. coli* نسبت به *S. aureus*، بیشتر به دست آمده است. علت این موضوع را می توان به ضخیم تر بودن دیواره یاخته ای باکتری گرم مثبت *S. aureus* نسبت به *E. coli* دانست که در نتیجه نفوذ نانوصفحه های مکسین به غشای یاخته ای باکتری *S. aureus* را کندتر و سخت تر می کند و تخریب دیواره یاخته ای به مراتب کاهش می یابد و احتمالاً در برابر اثرهای ضدباکتریایی مکسین سنتزی، مقاومت بیشتری می کنند و با گزارش های قبلی تطابق دارد [۴۵، ۴۷]، در نتیجه کارایی ضدباکتریایی نمونه در برابر باکتری گرم مثبت نسبت به باکتری گرم منفی کاهش می یابد. پس می توان گفت، پارچه هوشمند ویسکوز/مکسین پوشش یافته با مکسین می تواند در منسوجات پزشکی استفاده شود.

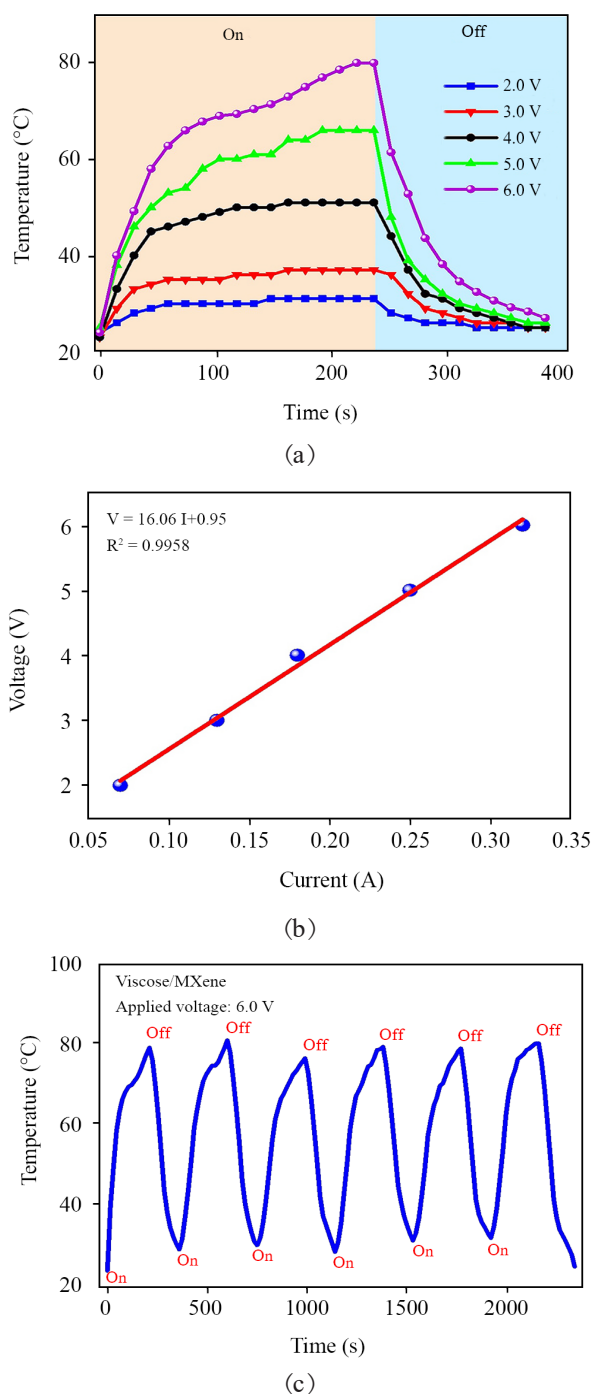


شکل ۵- الگوی پراش پرتو X پارچه ویسکوز خام و پوشش یافته با مکسین.
Fig. 5. XRD patterns of raw and MXene-coated viscose fabrics.

از پوشش دهی مکسین $Ti_3C_2T_x$ در شکل ۵ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود، پارچه ویسکوز خام دارای چهار پیک پراش اصلی در زاویه های 2θ ۱۲/۲، ۲۰/۳، ۲۲/۱ و ۳۵/۱ است که به ترتیب مربوط به صفحه های Miller (۱۱۰)، (۱۱۰)، (-۱۱۰) و (۰۰۴) و منطبق با گزارش های قبلی است [۴۶]. پس از پوشش دهی مکسین روی پارچه ویسکوز، پیک مشخصه مکسین $Ti_3C_2T_x$ در 2θ ۷/۷° [۲۱] در الگوی XRD پارچه ویسکوز پوشش یافته با مکسین ظاهر شد که به صفحه بلوری (۰۰۲) $Ti_3C_2T_x$ مربوط می شود. بنابراین، نتایج XRD وجود مکسین $Ti_3C_2T_x$ را روی پارچه ویسکوز هوشمند پوشش یافته نشان می دهند که با نتایج MAP مطابقت دارد.

بررسی خواص ضدباکتریایی پارچه

به منظور سنجش خواص ضدباکتریایی پارچه هوشمند ویسکوز خام و پوشش یافته با نانوصفحه های مکسین، بازده ضدباکتریایی پارچه ها پیش و پس از پوشش دهی با مکسین در برابر باکتری های گرم مثبت *S. aureus* و گرم منفی *E. coli* ارزیابی شد. شکل ۶ بازده ضدباکتریایی پارچه های خام و پوشش یافته با مکسین را در برابر باکتری گرم مثبت *S. aureus* و گرم منفی *E. coli* نشان می دهد. همان طور که از شکل ۶ مشاهده می شود، در پارچه ویسکوز خام، کارایی ضدباکتری در برابر باکتری گرم مثبت *S. aureus* و گرم منفی *E. coli* به ترتیب ۱/۷۰ ± ۰/۴۸ و ۲/۱۰ ± ۰/۷۱ درصد به دست آمد و نشان دهنده این است که پارچه ویسکوز خام خاصیت ضدباکتریایی ندارد و تحت بارگذاری مکسین روی پارچه، اثر ضدباکتریایی ایجاد می شود. به دلیل اینکه مکسین ها با داشتن گوشه های تیز به همراه سطح ویژه زیاد،



شکل ۷- عملکرد الکتروگرمایی پارچه ویسکوز پوشش یافته با مکسین: (a) منحنی تغییرات دمایی وابسته به زمان تحت ولتاژهای مختلف، (b) منحنی ولتاژ-جریان و (c) منحنی دما-زمان چرخه‌ای نمونه پارچه پوششی در ولتاژ ۶ V.

Fig. 7. Electrothermal performance of MXene-coated viscose fabric: (a) temperature-time curves under different applied voltages, (b) current-voltage curve, and (c) cyclic temperature-time response of the coated fabric at 6 V.

بررسی خواص الکتروگرمایی پارچه

افزون بر ویژگی ضدباکتری ذکرشده، پارچه‌های انعطاف‌پذیر و رسانای الکتریکی با قابلیت تنفس‌پذیری، به‌طور فزاینده‌ای به‌عنوان گرمکن‌های پوشیدنی برای لباس‌های خودگرم‌شونده و گرمادرمانی به‌کار گرفته می‌شوند که به‌دلیل عملکرد بسیار خوب آن‌ها در کاربرد الکتروگرمایی است [۴۸]. یکی از اهداف کاربردی در این نوع مواد گرمایشی، ایجاد دمای بیش از 60°C با استفاده از ولتاژهای کم است. عملکرد الکتروگرمایی نمونه پارچه ویسکوز پوششی با مکسین از طریق پایش تغییرات دما در ناحیه مرکزی پارچه پوشش‌یافته با استفاده از مولتی‌متر، در شرایط محیطی دما 27°C و رطوبت ۳۳٪ ارزیابی شده است. شکل ۷(a) نمودارهای دما-زمان پارچه ویسکوز پوششی در ولتاژهای مختلف را نشان می‌دهد. ولتاژ از زمان ۰ تا ۲۴۰ s به نمونه اعمال شده و سپس از زمان ۲۴۰ s تا ۳۹۰ s قطع شده است. همان‌طور که از نتایج مشخص است، این آزمون به‌وضوح سه ناحیه مشخص شامل ناحیه افزایش دما، ناحیه تعادل و ناحیه سردشدن طبیعی را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، میانگین دمای اشباع پارچه هوشمند در ولتاژ ۲، ۳، ۴، ۵ و ۶ V به‌طور میانگین به حدود ۳۱، ۳۷، ۵۱، ۶۶ و 80°C رسیده است. به‌عبارت دیگر با افزایش اعمال ولتاژ به پارچه ویسکوز پوششی با مکسین، دمای سطح پارچه به‌طور مستقیم افزایش یافته است و در ولتاژ ۶ V به حداکثر مقدار خود در این آزمون رسیده است. انتظار می‌رود، پارچه ویسکوز تولیدشده نیز دارای ویژگی‌های متمایز تبدیل انرژی الکتریکی به گرما باشند، زیرا مکسین‌ها رسانندگی الکتریکی زیادی دارند. هرچقدر ولتاژ اعمال‌شده به نمونه پارچه بیشتر باشد، گرمای تولیدشده نیز بیشتر خواهد بود و در نتیجه دمای نمونه افزایش می‌یابد. بنابراین پارچه ویسکوز/مکسین طراحی‌شده می‌تواند در این ولتاژ به‌عنوان گرم‌کننده مؤثر عمل کند. شکل ۷(b) منحنی ولتاژ در برابر جریان الکتریکی برای پارچه ویسکوز پوشش‌یافته با مکسین را نشان می‌دهد. منحنی تقریباً خطی ولتاژ-جریان (I-V) نشان می‌دهد، مقاومت این پارچه کم است. موضوعی که باعث می‌شود بتوان با ولتاژ نسبتاً کم، گرمایش ایجاد کرد و نیز بیانگر پایداری ولتاژ و جریان حین کار است که این موضوع، ایمنی این گرم‌کننده‌های پوشیدنی را در استفاده‌های عملی تضمین می‌کند. شکل ۷(c) ویژگی‌های گرمایش ژول چرخه نمونه پارچه ویسکوز پوششی را نشان می‌دهد. این آزمایش الکتروگرمایی طی ۶ چرخه پیوسته بدون وقفه و در ولتاژ ۶ V انجام شده است. میانگین دمای بیشینه نمونه در این ولتاژ به حدود 79°C می‌رسد. دامنه دمای بیشینه در طول این ۶ چرخه تغییر چشم‌گیری ندارد که نشان‌دهنده تکرارپذیری و دوام بسیار خوب

جدول ۱- مقایسه خواص ضدباکتری و الکتروگرمایی نمونه پوشش یافته با مکسین با مراجع.

Table 1. Comparison of antibacterial and electrothermal properties of the MXene-coated sample with the literature.

Substrate	Additive	Loading MXene (mg/mL)	Coating method	Electrothermal	Application	Air permability	Ref.
PET	MXene/PPy	5	Dip-coating	79 °C-4 V	EMI shielding	Good	[45]
Cotton	PEDOT: PSS/PDMS	-	Dip-coating	52 °C-20 V	Photothermal	Poor	[48]
Cellulose nanofiber	MXene	5	Vacuum filtration	100 °C-6 V	EMI shielding	-	[49]
Cotton	MXene/PEI/ APP	1.5	Dip-coating	64 °C-4 V	EMI shielding-Flame retardant	Poor	[49]
Cotton	MXene/CCS	10	Dip-coating	78 °C-4.5 V	Fire-warning, piezoresistivity	Moderate	[51]
Silk	MXene	5	Dip-coating	60 °C-10 V	Photothermal, Antibacterial	Good	[50]
Cellulose nanofiber	MXene/Silicone	-	Dip-coating	75 °C-9 V	EMI shielding, Photothermal	Moderate	[51]
Regenerated cellulose	MXene	7	Dip-coating	80 °C-6 V	Antibacterial	Excellent	This work

است. برای اولین بار پارچه ویسکوز با نانوصفحه‌های مکسین $Ti_3C_2T_x$ پوشش دهی شد و خواص ذاتی پارچه مانند تراوایی هوا حفظ شد. تصاویر SEM پارچه ویسکوز پس از پوشش دهی، وجود مکسین روی سطح الیاف را تأیید کرد و آزمون EDS نیز نشان داد، روی پارچه پوششی افزون بر عناصر C و O، عناصر Ti و F نیز وجود دارند که بیانگر گروه‌های عاملی موجود در مکسین هستند. آزمون پراش پرتو X نشان داد، پیک مشخصه مکسین در 7.7° در الگوی XRD پارچه ویسکوز پوشش یافته با مکسین ظاهر شده است که بیانگر وجود نانوصفحه‌های مکسین روی منسوج هوشمند است. نتایج آزمون ضدباکتری پارچه ویسکوز خام و پوشش یافته نشان داد، پارچه خام اثر ضدباکتری ندارد و بازده ضدباکتری پارچه چندمنظوره پوشش یافته با مکسین در برابر هر دو باکتری *S. aureus* و *E. coli* به ترتیب به طور میانگین به $77/53 \pm 2/21$ و $66/84 \pm 1/74$ درصد رسید. نتایج آزمون الکتروگرمایی پارچه هوشمند، رسیدن به دمای 80°C در ولتاژ ۶ V را نشان داد و تکرارپذیری و دوام بسیار خوب عملکرد الکتروگرمایی پارچه ویسکوز پوشش یافته با مکسین را طی ۶ چرخه به اثبات رساند. این پارچه هوشمند پوشش یافته با مکسین سنتز شده با حفظ خواص ذاتی پارچه، می‌تواند کاربردهایی چندمنظوره شامل یخ‌زدایی و لباس‌های محافظتی گرم‌کننده را داشته باشد.

عملکرد الکتروگرمایی نمونه پارچه ویسکوز پوشش یافته با مکسین است. دامنه وسیع دماهای مشاهده شده در این مطالعه نشان‌دهنده گرمایش گسترده است که می‌تواند در کاربردهایی مانند یخ‌زدایی، گرمایش الکتریکی و لباس‌های گرم‌کننده مورد استفاده قرار گیرد. پس می‌توان نتیجه گرفت، با سنتز مکسین $Ti_3C_2T_x$ و پوشش دهی آن روی پارچه‌های ویسکوز اصلاح شده، می‌توان به خواص ضدباکتری مناسب و الکتروگرمایی زیاد دست یافت و منسوجات هوشمند تنفس‌پذیر با حفظ خواص ذاتی پارچه را تولید کرد.

در نهایت، خواص ضدباکتری و الکتروگرمایی نمونه پوشش یافته با مکسین با مطالعات قبلی مقایسه شده و در جدول ۱ آمده است. خواص الکتروگرمایی نمونه پارچه سلولوزی پوشش یافته با مکسین، بیشتر از مقادیر گزارش شده در برخی منابع [۴۸، ۴۹] است. اضافه کردن مکسین افزون بر افزایش خواص الکتروگرمایی، خواص ضدباکتری مناسب با قابلیت تنفس‌پذیری عالی را در منسوج هوشمند سلولوزی بازساختی/مکسین ایجاد می‌کند و می‌تواند به عنوان منسوج پلیمری چندمنظوره استفاده شود که در هیچ پژوهشی بحث نشده است.

نتیجه گیری

در این پژوهش تهیه نانوصفحه‌های مکسین $Ti_3C_2T_x$ از پیش ماده فاز مکس $Ti_3C_2T_x$ با موفقیت انجام شد و تصاویر میکروسکوپ الکترونی پوششی نشان داد، مکسین سنتز شده دارای شکل شناسی آکاردئونی شکل

تضاد منافع

نویسندگان مقاله اذعان دارند، هیچ نوع تضاد منفعی با شخص، شرکت یا سازمانی برای این پژوهش ندارند.

مراجع

1. Bao W., Liu Y., and Zhao X., Multiple Birds with One Stone: A New Type of PPy/Fe₃O₄/rGO Multifunctional Composite Fabric for Wave Absorption, UV Resistance, Anti-static and Thermal Insulation, *Prog. Org. Coat.*, **192**, 108465, 2024.
2. Panda A., Maiti S., and Adivarekar R.V., Natural Fibers in Smart Textiles for Advanced Applications, In *Advances in Renewable Natural Materials for Textile Sustainability*, CRC, **1**, 136-152, 2025.
3. Ding Y., Jiang J., Wu Y., Zhang Y., Zhou J., Zhang Y., Huang Q., and Zheng Z., Porous Conductive Textiles for Wearable Electronics, *Chem. Rev.*, **124**, 1535-1648, 2024.
4. Mustata F.S., Condurache B.-C., Curteza A., Ciofu C., and Grigorean S., Magnetic Composites from Recycled Materials, *Int. J. Mod. Man. Technol.*, **15**, 127-136, 2023.
5. Wang Y., Yang C., Zhou X., Zuo Y., Zhao Z., and Chen H., Graphene Oxide and Carbon Black Synergistic Coated Cotton Fabric for Enhancing Energy Harvesting from Water Droplets, *Carbon*, **223**, 119008, 2024.
6. Cheng W., Dong J., and Sun R., Self-Powered Sensors Made with Fabric-Based Electrodes and a Conductive Coating, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **16**, 35516-35524, 2024.
7. Zhou Z., Zhang W., Zhang J., Zhang Y., Yin X., and He B., Flexible and Self-adhesive Strain Sensor Based on GNSs/MW-CNTs Coated Stretchable Fabric for Gesture Monitoring and Recognition, *Sens. Actuators, A*, **349**, 114004, 2023.
8. Hoomani K.K., Nasouri K., and Mandegari M., Jalali S.A.H., In Situ Synthesis of Fe₃O₄/Carboxylated Multi-walled Carbon Nanotubes Nanostructures on Nylon Fabric with Efficient Flame Retardant and Antibacterial Properties, *Colloids Surf., A*, **706**, 135797, 2025.
9. Su X., Sha Q., Gao X., Li J., Wu Y., Li W., Wu W., Han N., and Zhang X., Lightweight, Multifunctional Smart MXene@PET Non-woven with Electric/Photothermal Conversion, Antibacterial and Flame Retardant Properties, *Appl. Surf. Sci.*, **639**, 158205, 2023.
10. Baranowska-Korczyn A., Kowalczyk D., and Cieślak M., Electroconductive, Antibacterial, and Heat-Protective Properties of Silk/Polydopamine/Graphene Composite, *Surf. Interfaces*, **60**, 106042, 2025.
11. Hearle J., *Textile Fibers: A Comparative Overview, Encyclopedia of Materials: Science and Technology*, 9100-9116, 2001.
12. Houck M.M., *Identification of Textile Fibers*, Woodhead Boston, **84**, 396, 2009.
13. Liu L., Gu L., Zhang X., Xu Y.-M., Xie W., Cheng X.-W., and Guan J.-P., Construction of Thermally Resistant and Flame-Retardant Multifunctional Polyester Composite Fabrics, *Polym. Degrad. Stab.*, **225**, 110769, 2024.
14. Li Y., Liu X., Xiang S., Zhao S., Fu F., Diao H., and Liu X., Fabrication of Perm-inspired Janus Polyester Fabric via Unilateral Surface Engineering for Unidirectional Water Transport and Antibacterial Properties, *Chem. Eng. J.*, **503**, 158456, 2025.
15. Xie H., Li X., Hu J., Pazuki M.-M., Salimi M., Li H., Zhang L., Amidpour M., and Chen Z., Honeycomb-inspired Design of Double-layer Photothermal/Electrothermal Fabric for All-Weather Steam Generation, *Desalination*, **601**, 118579, 2025.
16. Khajeh E., Nasouri K., Askari G., and Mandegari M., Flexible and Lightweight Metalized Polyamide Nonwoven for Electromagnetic Interference Shielding, Electrothermal, Photothermal, and Antibacterial Applications, *Chem. Eng. J.*, **502**, 158203, 2024.
17. Ibrahim N.A., Eid B.M., Abd El-Aziz E., Abou Elmaaty T.M., and Ramadan S.M., Loading of Chitosan-Nano Metal Oxide Hybrids onto Cotton/Polyester Fabrics to Impart Permanent and Effective Multifunctions, *Int. J. Biol. Macromol.*, **105**, 769-776, 2017.
18. Gholipour-Kanani A., Asefnejad A., and Azadbakht K., Fabrication and Characterization of Nanofibrous Scaffold Based on Chitosan Containing Cerium Oxide Nanoparticles for Wound Healing Application, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, **35**, 565-580, 2023.
19. Ghazal H., Allam L., Maraae A., Beltagy Z., Nasser A., Abd-Elaal L., and Elshamy M., Conductive Polymer Coated Textile and their Applications, *J. Text. Color. Polym. Sci.*, **21**, 313-331, 2024.
20. Zhang P., Wang W., Luo X., Meng X., Teng M., Han S., Ma C., Feng J., and Wang X., Enhancing Thermal Insulating and Flame Retardancy of Electromagnetic Shielding Polyester-Based Nonwoven Fabric, *ACS Appl. Polym. Mater.*, **6**, 10284-10297, 2024.
21. Yadav M., Kumar M., and Sharma A., Review of Ti₃C₂T_x MXene Nanosheets and Their Applications, *ACS Appl. Nano Mater.*, **7**, 9847-9867, 2024.
22. Qin S., Usman K.A.S., Hegh D., Seyedin S., Gogotsi Y., Zhang J., and Razal J.M., Development and Applications of MXene-

- Based Functional Fibers, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **13**, 36655-36669, 2021.
23. De S., Acharya S., Sahoo S., and Nayak G.C., Current Trends in MXene Research: Properties and Applications, *Mater. Chem. Front.*, **5**, 7134-7169, 2021.
 24. Li T., Chen L., Yang X., Chen X., Zhang Z., Zhao T., Li X., and Zhang J., A Flexible Pressure Sensor Based on an MXene-Textile Network Structure, *J. Mater. Chem. C*, **7**, 1022-1027, 2019.
 25. Uzun S., Seyedin S., Stoltzfus A.L., Levitt A.S., Alhabeib M., Anayee M., Strobel C.J., Razal J.M., Dion G., and Gogotsi Y., Knittable and Washable Multifunctional MXene-Coated Cellulose Yarns, *Adv. Funct. Mater.*, **29**, 1905015, 2019.
 26. Levitt A., Hegh D., Phillips P., Uzun S., Anayee M., Razal J.M., Gogotsi Y., and Dion G., 3D Knitted Energy Storage Textiles Using MXene-Coated Yarns, *Mater. Today*, **34**, 17-29, 2020.
 27. Park T.H., Yu S., Koo M., Kim H., Kim E.H., Park J.-E., Ok B., Kim B., Noh S.H., and Park C., Shape-Adaptable 2D Titanium Carbide (MXene) Heater, *ACS Nano*, **13**, 6835-6844, 2019.
 28. Zhang J., Seyedin S., Gu Z., Yang W., Wang X., and Razal J.M., MXene: A Potential Candidate for Yarn Supercapacitors, *Nanoscale*, **9**, 18604-18608, 2017.
 29. Fang S., Wang R., Ni H., Liu H., and Liu L., A Review of Flexible Electric Heating Element and Electric Heating Garments, *J. Ind. Text.*, **51**, 101-136, 2022.
 30. Hsu P.-C., Liu X., Liu C., Xie X., Lee H.R., Welch A.J., Zhao T., and Cui Y., Personal Thermal Management by Metallic Nanowire-Coated Textile, *Nano Lett.*, **15**, 365-371, 2015.
 31. Zhang L., Baima M., and Andrew T.L., Transforming Commercial Textiles and Threads into Sewable and Weavable Electric Heaters, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **9**, 32299-32307, 2017.
 32. Guo Y., Dun C., Xu J., Mu J., Li P., Gu L., Hou C., Hewitt C.A., Zhang Q., and Li Y., Ultrathin, Washable, and Large-area Graphene Papers for Personal Thermal Management, *Small*, **13**, 1702645, 2017.
 33. Hazarika A., Deka B.K., Kim D., Jeong H.E., Park Y.-B., and Park H.W., Woven Kevlar Fiber/Polydimethylsiloxane/Reduced Graphene Oxide Composite-based Personal Thermal Management with Freestanding Cu-Ni Core-Shell Nanowires, *Nano Lett.*, **18**, 6731-6739, 2018.
 34. Moradi H., Nasouri K., and Askari G., Designing, Modeling, and Multi-response Optimization of Ni/Co-Coated Carbon Fibers for Electromagnetic Shielding and Electrothermal Applications, *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.*, **172**, 106116, 2025.
 35. Luo C.-L., Huang M.-L., Sun C., Zhao K.-Y., Hu Z., and Wang M., Achieving High Joule Heating and Self-cleaning Performance in Copper-Coated Fabrics with Excellent Microwave Shielding, *Cellulose*, **30**, 5987-6000, 2023.
 36. Zhang X., Wang X., Lei Z., Wang L., Tian M., Zhu S., Xiao H., Tang X., and Qu L., Flexible MXene-Decorated Fabric with Interwoven Conductive Networks for Integrated Joule Heating, Electromagnetic Interference Shielding, and Strain Sensing Performances, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **12**, 14459-14467, 2020.
 37. International A., Standard Test Method for Air Permeability of Textile Fabrics, ASTM International, 2012.
 38. Mandegari M., Nasouri K., Ghasemi-Mobarakeh L., and Jalali S.A.H., One Stone for Four Birds: Multifunctional MXene-Coated PET Fabric with Favorable Photothermal, Antibacterial, Flame Retardant, and EMI Shielding Properties, *Mater. Today Sustain.*, **27**, 100880, 2024.
 39. Shonali Natarajamani G., Kannan V.P., and Sridharan M., Unveiling LiF-Engineered MXene: A Novel $Ti_3C_2T_x/ZnO$ Hybrid Composite for Highly Selective and Sensitive Chemiresistive NH_3 Detection via Schottky Barrier Modulation at Ambient Temperature, *J. Mater. Chem. A*, **13**, 16414-16436, 2025.
 40. Yu Z., Deng C., Seidi F. Yong Q., Lou Z., Meng L., Liu J., Huang C., Liu Y., and Wu W., Air-permeable and Flexible Multifunctional Cellulose-based Textiles for Bio-protection, Thermal Heating Conversion, and Electromagnetic Interference Shielding, *J. Mater. Chem. A*, **10**, 17452-17463, 2022.
 41. Karami Hoomani K., Nasouri K., Mandegari M., and Jalali S.A.H., In Situ Synthesis of Fe_3O_4 /Carboxylated Multi-walled Carbon Nanotubes Nanostructures on Nylon Fabric with Efficient Flame Retardant and Antibacterial Properties, *Colloids Surf., A*, **706**, 135797, 2025.
 42. Alimohammadi F., Montazer M., Shamei A., and Rahimi M.K., Synthesis of Silver Nanoparticles in Cotton Fabric by Polyvinyl-2-Pyrrolidone as a Reducing and Stabilizing Agent, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, **25**, 265-275, 2012.
 43. Zhang C., Ma Y., Zhang X., Abdolhosseinzadeh S., Sheng H., Lan W., Pakdel A., Heier J., and Nüesch F., Two-dimensional Transition Metal Carbides and Nitrides (MXenes): Synthesis, Properties, and Electrochemical Energy Storage Applications, *Energy Environ. Mater.*, **3**, 29-55, 2020.
 44. Dixit P. and Maiti T., A Facile Pot Synthesis of (Ti_3AlC_2) MAX Phase and its Derived MXene $(Ti_3C_2T_x)$, *Ceram. Int.*, **48**, 36156-36165, 2022.
 45. De Faria A.F., Perreault F., Shaulsky E., Arias Chavez L.H., and Elimelech M., Antimicrobial Electrospun Biopolymer Nanofiber

- Mats Functionalized with Graphene Oxide–Silver Nanocomposites, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **7**, 12751-12759, 2015.
46. Sharma A., Nagarkar S., Thakre S., and Kumaraswamy G., Structure–Property Relations in Regenerated Cellulose Fibers: Comparison of Fibers Manufactured Using Viscose and Lyocell Processes, *Cellulose*, **26**, 3655-3669, 2019.
 47. Mayerberger E.A., Street R.M., McDaniel R.M., Barsoum M.W., and Schauer C.L., Antibacterial Properties of Electrospun $Ti_3C_2T_z$ (MXene)/Chitosan Nanofibers, *RSC Adv.*, **8**, 35386-35394, 2018.
 48. Cui Y., Gong H., Wang Y., Li D., and Bai H., A Thermally Insulating Textile Inspired by Polar Bear Hair, *Adv. Mater.*, **30**, 1706807, 2018.
 49. Cai N., Hou D., Luo X., Han C., Fu J., Zeng H., and Yu F., Enhancing Mechanical Properties of Polyelectrolyte Complex Nanofibers with Graphene Oxide Nanofillers Pretreated by Polycation, *Compos. Sci. Technol.*, **135**, 128-136, 2016.
 50. Jeong J.S., Moon J.-S., Jeon S.Y., Park J.H., Alegaonkar P.S., and Yoo J.B., Mechanical Properties of Electrospun PVA/MWNTs Composite Nanofibers, *Thin Solid Films*, **515**, 5136-5141, 2007.
 51. Jalaja K., Sreehari V.S., Kumar P.R.A., and Nirmala R.J., Graphene Oxide Decorated Electrospun Gelatin Nanofibers: Fabrication, Properties and Applications, *Mater. Sci. Eng. C*, **64**, 11-19, 2016.