

Development and Characterization of Smart Textile Based on 1×1 Rib Weft Knitted Fabric Coated with Polyaniline/Mxene

Marziye Basiri, Seyed Vahid Ebadi*

Department of Textile Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, 84156-83111, Iran

Received: 16 February 2025, accepted: 13 July 2025

ABSTRACT

Keywords:

knitted fabric,
MXene,
polyaniline,
Joule heating,
strain sensor

Hypothesis: With the rapid advancement of technology and growing concerns over health and well-being, smart clothing and wearable textiles have garnered significant attention from researchers. In this context, nanomaterials and conductive polymers are considered key components for the development of intelligent textile systems. Among newly emerging two-dimensional nanomaterials, MXene nanosheets stand out due to their high specific surface area, layered structure, and exceptional electrical conductivity.

Methods: This study aims to develop a smart fabric based on 1×1 rib knitted cotton fabric coated with polyaniline and MXene nanosheets, and to investigate its electrothermal and strain sensing performance. In-situ chemical polymerization of aniline was performed on the cotton-based knitted fabric, followed by MXene coating via a dipping process. The surface morphology, elemental composition, electrical conductivity, and electrothermal behavior of the fabricated samples were systematically analyzed.

Findings: FESEM and EDX analyses confirmed the successful deposition of polyaniline and MXene nanosheets on the fabric surface. Surface resistance decreased significantly from 176 to 51 Ω/sq after MXene coating. Upon applying an electric voltage, the surface temperature of the coated fabrics increased rapidly and returned to ambient conditions once the voltage was removed. The steady-state temperature rose proportionally with the applied voltage, reaching over 130°C at 25 V for the cotton/PANI/MXene sample. The MXene layer notably enhanced the thermal response of the fabric. Furthermore, the fabrics demonstrated potential as strain sensors, exhibiting a negative resistance response to increasing strain, with a gauge factor of 8.9. The combination of effective Joule heating and reliable strain sensitivity highlights the potential of these smart textiles for applications in personal thermal management and real-time human motion monitoring in wearable electronic systems and healthcare-related technologies.

(*)To whom correspondence should be addressed.

E-mail: sv.ebadi@iut.ac.ir

Please cite this article using:

Basiri M., Ebadi S.V., Development and Characterization of Smart Textile Based on 1×1 Rib Weft Knitted Fabric Coated with Polyaniline/Mxene, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, **37**, 567-578, 2024.

تولید و مشخصه‌یابی منسوج هوشمند بر پایه پارچه حلقوی پودی کشباف ۱×۱ پوشش‌یافته با پلی‌آنیلین-مکسین

مرضیه بصیری، سید وحید عبادی*

ایران، اصفهان، ۸۳۱۱۱-۸۴۱۵۶، دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مهندسی نساجی

دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۲۸، پذیرش: ۱۴۰۴/۴/۲۲

چکیده

فرضیه: امروزه با پیشرفت سریع فناوری و نیز افزایش سطح آگاهی جوامع و توجه بیشتر به سلامتی، پوشاک و منسوجات هوشمند توجه پژوهشگران زیادی را جلب کرده است. مواد و روش‌های مختلفی برای طراحی منسوجات هوشمند ارائه شده است که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به نانومواد و پلیمرهای رسانا اشاره کرد. نانوصفحه‌های مکسین به دلیل سطح ویژه زیاد، ساختار لایه‌ای و رسانایی الکتریکی عالی مورد توجه است.

روش‌ها: این پژوهش با هدف تولید منسوج هوشمند با استفاده از پارچه حلقوی کشباف ۱×۱ پوشش‌یافته با پلی‌آنیلین و نانوصفحه‌های مکسین و بررسی خواص الکتروگرایی و حسگری آن پایه‌ریزی شده است. بدین منظور از روش پلیمرشدن شیمیایی آنیلین روی پارچه‌های حلقوی پنبه‌ای و پوشش‌دهی نانوصفحه‌های مکسین استفاده شد. پس از تولید نمونه‌های پوشش‌یافته با پلی‌آنیلین و نیز پارچه پوشش‌یافته با ترکیب پلی‌آنیلین و مکسین، شکل‌شناسی سطحی، تجزیه عنصری، خواص الکتریکی و الکتروگرایی نمونه‌ها ارزیابی شد.

یافته‌ها: نتایج آزمون FE-SEM و EDX پوشش‌دهی پلی‌آنیلین و مکسین روی سطح پارچه حلقوی را تأیید کرد. نتایج نشان داد، با پوشش مکسین روی سطح پارچه، مقاومت سطحی آن از $176 \Omega/sq$ به $51 \Omega/sq$ کاهش می‌یابد. با اعمال ولتاژ الکتریکی دمای نمونه به سرعت افزایش می‌یابد و پس از قطع ولتاژ اعمالی دما به حالت اولیه برمی‌گردد. با پوشش‌دهی نانوصفحه‌های مکسین روی پارچه پنبه-پلی‌آنیلین، دمای نمونه در ولتاژهای مختلف افزایش می‌یابد. نتایج نشان‌دهنده دمای بیش از $130^\circ C$ با ولتاژ $25 V$ در پنبه-پلی‌آنیلین/مکسین بود. قابلیت استفاده از پارچه‌های تولیدی به عنوان حسگر کرنش نیز بررسی شد که نتایج نشان‌دهنده پاسخ منفی این نمونه‌ها نسبت به افزایش کرنش با بزرگی فاکتور گنج $8/9$ بود. تولید گرمای مناسب و حساسیت مطلوب حسگرهای تولیدی قابلیت استفاده از آن در مدیریت گرمایش و نظارت بر حرکات انسان را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی

پارچه حلقوی،
مکسین،
پلی‌آنیلین،
گرمایش ژول،
حسگر کرنش

* مسئول مکاتبات، پیام‌نگار:

sv.ebadi@iut.ac.ir

مقدمه

در دهه اخیر موج استفاده از دستگاه‌های هوشمند پوشیدنی با قابلیت‌های مختلف مانند مراقبت‌های پزشکی و بهداشتی، مباحث ایمنی و حفاظتی، ردیابی و تنظیم آسایش گرمایی افزایش چشمگیری داشته است. یکی از رویکردهای اصلی در این زمینه استفاده از ساختارهای مختلف نساجی است که هم‌زمان با عملکرد مدنظر، راحتی، انعطاف‌پذیری و انطباق‌پذیری مطلوبی را نیز برای مصرف‌کننده آن به‌دنبال داشته باشد [۱].

به‌منظور تولید منسوجات هوشمند الکترونیکی گفته‌شده، به استفاده از مواد الکتروفعالی نیاز است که بتواند با حفظ خواص اصلی منسوج، عملکردهای هوشمند مدنظر را به آن اضافه کند. افزون بر مواد رسانایی مانند فلزات [۲] و پلیمرهای رسانا [۳] در سال‌های اخیر با پیشرفت‌های نانو فناوری، استفاده از نانومواد مختلف نیز در این راستا مورد توجه بوده است. از جدیدترین این مواد می‌توان به خانواده جدید کاربیدها و نیتrideهای فلزات واسطه اشاره کرد که با عنوان مکسین (Mxene) شناخته می‌شوند. این نانومواد که در ۲۰۱۱ میلادی برای اولین بار کشف شدند، نه تنها خواص الکتریکی مطلوب فلزات را دارند، بلکه دارای خواص فیزیکی و مکانیکی مطلوب، مقاومت گرمایی و مقاومت خوردگی زیاد، خواص الکتروشیمیایی عالی و فرایندپذیری خوبی هستند [۴، ۵]. افزون بر این، نانوصفحه‌های مکسین قابلیت ترکیب و پراکنش در مایعات و محلول‌های مختلفی را دارند که ویژگی بسیار مطلوب به‌منظور ریسندگی یا پوشش‌دهی آن‌هاست. به دلیل این خواص بسیار عالی استفاده از این ماده در ساختار سازه‌های نساجی نویدبخش توسعه محصولات مختلف در حوزه منسوجات هوشمند در کاربردهای متنوعی از جمله ذخیره انرژی (باتری و ابرخازن) [۶]، برداشت انرژی [۷]، حسگر کرنش [۸]، حسگر گاز [۹]، حسگر رطوبت [۱۰]، نظارت بر علائم حیاتی [۱۱]، گرمایش ژول [۱۲] و محافظ تداخل الکترومغناطیسی [۱۳] است.

از روش‌های مختلفی برای به‌کارگیری نانوصفحه‌های مکسین در سازه‌های الیافی به‌منظور تولید منسوجات هوشمند استفاده شده است که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به صافش در خلأ، پوشش‌دهی، الکتروریسی و تریسی اشاره کرد [۱۴]. از این میان، روش پوشش‌دهی به دلیل سادگی فرایند، قابلیت توسعه و هزینه مناسب، یکی از روش‌های اصلی استفاده‌شده برای ساخت منسوجات رسانا و هوشمند است. در این خصوص منسوجات طبیعی و سنتزی مختلفی از جمله پنبه [۱۵-۱۷]، نایلون [۱۸]، پلی‌آمید [۱۹] و پلی‌استر [۲۰] با مکسین پوشش داده شدند. بدین منظور، ابتدا محلول همگن مکسین تهیه می‌شود و سپس به کمک آن سازه نساجی با روش‌های مختلف

می‌تواند پوشش‌دهی شود. به عنوان مثال، نخ‌های سلولوزی با مکسین پوشش یافتند و چسبندگی مکسین به این نخ‌ها مطلوب گزارش شده است، به‌طوری که تغییرات مقاومت الکتریکی نمونه پس از زمان ۴۵ h شست‌وشو در دمای ۸ °C ناچیز بوده است [۱۴]. گفتنی است، روش پوشش‌دهی مکسین با چند فرایند متفاوت انجام‌شدنی است. این روش‌ها شامل پوشش‌دهی غوطه‌وری، پوشش‌دهی قطره‌ای و پوشش‌دهی افشانشی می‌شود.

بررسی‌ها نشان می‌دهد، پژوهش‌ها درباره منسوجات هوشمند بر پایه مکسین در چند سال اخیر آغاز شده است، به‌طوری که اولین پژوهش در این حوزه در ۲۰۱۷ میلادی منتشر شده و پس از آن روند پژوهش بر استفاده از این ساختار در منسوجات برای کاربردهای مختلف مانند ابرخازن‌ها، گرم‌کن‌های الکتریکی، حسگرها و برداشت انرژی الکتریکی به‌شدت رو به افزایش است. Wang و همکاران [۲۱] پارچه پنبه‌ای هوشمند بر پایه مکسین و کربوکسی‌متیل‌کیتوسان را به روش لایه‌به‌لایه با قابلیت کاربرد در زمینه‌های مختلف از جمله حسگر دما، هشدار آتش‌سوزی، مقاومت در برابر شعله، سنجش حرکات انسان و نیز گرمایش ژول تولید کردند. با بهره‌مندی از ویژگی گرماالکتربیک و رسانایی زیاد نانوصفحه‌های مکسین، این پارچه در یک محدوده گسترده عملکرد دقیقی در سنجش دما نشان داد و هنگام سوختن، می‌تواند سامانه هشدار آتش را در کمتر از ۱۰ ثانیه فعال کند. افزون بر این، پارچه به‌دست‌آمده می‌تواند انواع حرکات انسان را تشخیص دهد. Kim و همکاران [۲۲] پارچه پنبه‌ای پوشش‌یافته با مکسین را تولید و خواص الکتریکی و گرمایی آن را بررسی کردند. دمای حالت اشباع پارچه تولیدی در ولتاژ اعمالی ۲۰ V، ۱۰۰ °C به‌دست آمد. Liu و همکاران [۲۳] پارچه پوشش‌یافته با نانوصفحه‌های مکسین را به‌عنوان حسگر کرنش بررسی کردند. نتایج نشان‌دهنده این است که حساسیت حسگر در دامنه کرنش کمتر از ۱۵٪ به مقدار ۴/۱ بود. همچنین، این حسگر در ۵۰۰ چرخه متوالی اعمال کرنش پایداری زیادی را نشان داده است.

نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد، در بین مواد مختلفی که برای ساخت منسوجات الکترونیکی استفاده شده‌اند، نانوصفحه‌های مکسین محبوب‌ترین و پر استفاده‌ترین آن‌ها به‌شمار می‌آید. البته برای بهبود خواص الکتریکی، گرمایی و الکتروشیمیایی نانوصفحه‌های مکسین، ترکیب این مواد با سایر مواد الکتروفعال مانند پلیمرهای رسانا، نانومواد کربن و نانوذرات فلزی مورد توجه قرار گرفته است. یکی از مواد الکتروفعالی که در ترکیب با نانوصفحه‌های مکسین روی منسوجات قابل استفاده بوده، پلیمرهای رساناست. این پلیمرها با وجود داشتن خواص مطلوب پلیمرها مانند آسانی سنتز و انعطاف‌پذیری، خواص

ارزیابی رفتار گرمایش ژول و حسگر کرنش آن است.

تجربی

مواد

نخ پنبه با نمره Ne ۳۰ به منظور تولید پارچه حلقوی پودی به صورت تجاری خریداری شد. مونومر آنیلین، سدیم هیدروکسید، هیدروکلریک اسید (۳۷٪) و آمونیوم پرسولفات (≤ ۹۸٪) از Merck آلمان، فاز مکس Ti_3AlC_2 از American، المنت و لیتیم فلوئورید (۹۸٪) از شرکت Sigma-Aldrich خریداری شد. مونومر آنیلین پیش از استفاده دو بار تقطیر شد و سایر مواد بدون خالص سازی بیشتر به کار گرفته شدند.

دستگاه‌ها و روش‌ها

تولید نانوصفحه‌های مکسین

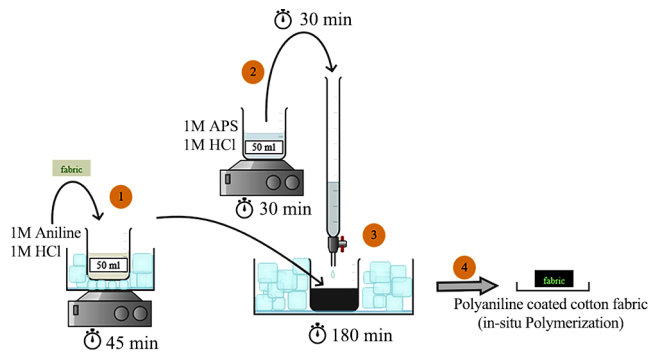
فرایند تولید نانوصفحه‌های مکسین ($Ti_3C_2T_x$) با حکاکی فاز مکس (Ti_3AlC_2) در محلول هیدروکلریک اسید و لیتیم فلوئورید مطابق پژوهش‌های پیشین انجام شد [۲۶]. ابتدا، لیتیم فلوئورید در هیدروکلریک اسید حل و سپس فاز مکس به محلول اضافه شد و واکنش در دمای $40^\circ C$ به مدت ۴۸ h ادامه یافت. پس از چند مرتبه شست‌وشو با آب یون زدوده و مرکزگریزی، pH محلول به ۶ رسید. سپس، محصول نهایی در آب یون زدوده با فراصوت دهی به مدت ۱ h پراکنده شد. در نهایت، این تعلیق به مدت ۱ h تحت سرعت 3500 rpm/min در معرض مرکزگریزی شده و نانوصفحه‌های مکسین تولیدی به مدت ۲۴ h درون آون خلأ خشک شد. شکل ۱ این فرایند را نشان می‌دهد.

پلیمر شدن شیمیایی در جای آنیلین روی پارچه

با استفاده از نخ پنبه خالص با نمره Ne ۳۰، پارچه حلقوی پودی با طرح کشیاف 1×1 با تعداد رج در سانتی متر (course per centimeter, CPC) و ردیف در سانتی متر پارچه (wale per centimeter, WPC) به ترتیب ۲۴ و ۱۵ روی دستگاه بافندگی حلقوی دو رو سیلندر تولید شد. به منظور پلیمر شدن آنیلین، از آمونیوم پرسولفات (APS) به عنوان اکسنده با نسبت مولی ۱:۱ نسبت به مونومر آنیلین و روش پلیمر شدن شیمیایی درجا، مطابق مرجع [۲۷]، استفاده شد. بدین صورت که محلول آبی ۱ مولار از مونومر آنیلین در دوپه‌کننده هیدروکلریک اسید ۱ مولار تهیه شد. نمونه‌ها به مدت ۴۵ min در محلول تهیه

الکتریکی مشابه فلزات دارند و می‌توانند جریان الکتریکی را از خود عبور دهند. پلی‌پیرول، پلی‌آنیلین و پلی‌تیوفن پرکاربردترین پلیمرهای رسانا در تولید منسوجات رسانا هستند. He و همکاران [۲۴] نانوصفحه‌های مکسین و پلیمر رسانای پلی‌پیرول را روی سطح پارچه پوشش‌دهی کرده و سپس سطح پارچه را با ماده آب‌گریز دی‌متیل‌سیلوکسان اصلاح کردند نتایج این پژوهش نشان داد، رفتار پارچه تولیدی از قانون اهم پیروی می‌کند و رابطه مستقیمی بین ولتاژ الکتریکی و جریان الکتریکی وجود دارد. مطالعه رفتار گرمایش ژول این پارچه نشان داد، با افزایش ولتاژ الکتریکی، دمای تولیدی با نمونه افزایش می‌یابد و با قطع ولتاژ الکتریکی، دمای نمونه کاهش می‌یابد. همچنین، پارچه تولیدی در حالت‌های مختلف صاف و خم شده خواص الکتریکی خود را حفظ کرد. Zheng و همکاران [۲۵] پارچه پنبه‌ای را با مکسین و پلیمر رسانای پلی‌اتیلن دی‌اکسی تیوفن (PEDOT) پوشش‌دهی کردند. بدین منظور از روش پلیمر شدن فاز بخار برای پلیمر شدن PEDOT روی سطح پارچه استفاده شده و سپس با روش افشانش نانوصفحه‌های مکسین در تعداد چرخه‌های مختلفی روی سطح پوشش‌دهی شده است. نتایج نشان داد، در ولتاژ الکتریکی اعمالی ۱۲ V، با افزایش تعداد چرخه پوشش‌دهی مکسین، دمای تولیدی نمونه افزایش می‌یابد و بیشترین دمای تولیدی ($193^\circ C$) در نمونه با پنج چرخه پوشش‌دهی مشاهده شد. افزون بر این نتایج نشان داد، پارچه‌های پوشش‌یافته با مکسین و پلی‌اتیلن دی‌اکسی تیوفن را می‌توان به عنوان حسگر کرنش استفاده کرد. به طوری که تغییر شکل‌های مختلف به تغییر در مقاومت الکتریکی آن منجر می‌شود.

پلی‌آنیلین یکی از پلیمرهای رسانای رایج است که به دلیل سنتز آسان، پایداری شیمیایی، در دسترس بودن مواد اولیه و رسانایی زیاد، در کاربردهای مختلف مانند ابرخازن‌ها، محرک‌ها، پوشش‌های ضد خوردگی، حسگرها و باتری‌های شارژشدنی مورد توجه قرار گرفته است. از بین ساختارهای مختلفی که برای تولید وسایل هوشمند پوشیدنی بررسی شده است، منسوجات حلقوی یکی از ایده‌آل‌ترین گزینه‌ها به شمار می‌آیند. این ساختارها به دلیل انعطاف‌پذیری و ازدیاد طول‌پذیری زیاد، راحتی تولید، قیمت مناسب و در دسترس بودن در طراحی و تولید بسیاری از لباس‌ها استفاده می‌شوند و بخش جدایی‌ناپذیر صنعت نساجی را تشکیل می‌دهند. طبق بررسی‌های انجام‌شده تاکنون استفاده هم‌زمان از نانوصفحه‌های مکسین و پلیمر رسانای پلی‌آنیلین روی ساختارهای حلقوی برای تولید گرم‌کن‌های الکتریکی و حسگر کرنش گزارش نشده است. از این رو، هدف این پژوهش تولید پارچه حلقوی پودی با ساختار کشیاف 1×1 پوشش‌یافته با پلی‌آنیلین و نانوصفحه‌های مکسین و



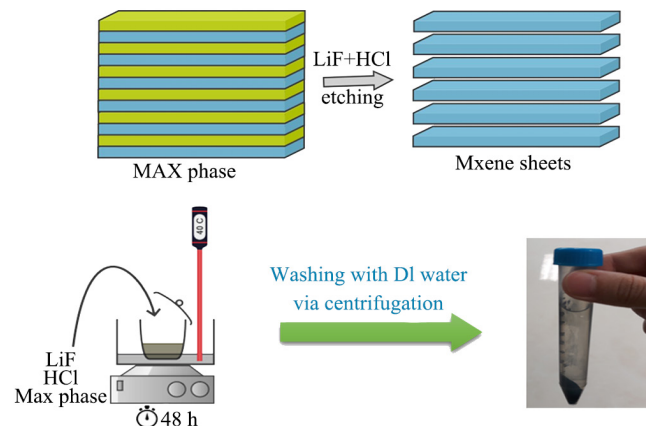
شکل ۲- فرایند پلیمرشدن شیمیایی درجای آنیلین روی پارچه حلقوی پنبه‌ای.

Fig. 2. In-situ chemical polymerization process of aniline on cotton-based knitted fabric.

نیز رسم نمودار ولتاژ الکتریکی برحسب جریان الکتریکی را دارد که برای دقت بیشتر از قابلیت رسم نمودار ولتاژ الکتریکی-جریان الکتریکی آن استفاده شده و شیب نمودار رسم شده (V/I) در معادله (۱) استفاده شد:

$$R_s = \frac{\pi V}{\ln 2 I} \quad (1)$$

R_s مقاومت سطحی نمونه و V و I نیز به ترتیب ولتاژ الکتریکی و جریان عبوری از نمونه است. گفتنی است، برای هر نمونه اندازه‌گیری مقاومت سطحی پنج مرتبه تکرار شده و میانگین آن گزارش شده است. برای بررسی شکل‌شناسی سطحی و تجزیه عنصری نمونه‌های تولیدی از میکروسکوپ الکترون پوشی گسیل میدانی (FE-SEM) مدل Quanta FEG 450 ساخت آمریکا مجهز به EDX استفاده شد. همچنین، برای بررسی خواص الکتروگرایی پارچه‌های پوشش‌یافته از دوربین گرمایی زیرقرمز (TG165, FLIR) ساخت آمریکا استفاده شده است. بدین منظور از منبع تغذیه مستقیم (PS-302D) ساخت چین) استفاده شده و ولتاژهای مختلف (۲۰، ۱۵، ۱۰، ۵، ۲/۵) (۲۵ V) به نمونه اعمال و تغییرات دمای آن اندازه‌گیری شد. حساسیت به کرنش نمونه‌های تولیدی نیز از دستگاه آزمایشگاهی طراحی شده به منظور اعمال کرنش (شکل ۳) استفاده شد. کرنش به عنوان تغییرات طول در واحد طول ($\epsilon = \Delta L/L$) تعریف می‌شود. پارامتر اساسی حسگرهای کرنش، حساسیت حسگر است که به عنوان فاکتور گنج (gauge, GF) بیان می‌شود. این پارامتر به عنوان نسبت تغییر کسری در مقاومت الکتریکی به تغییرات کسری در طول (کرنش) تعریف می‌شود (معادله ۲). از لحاظ قدرمطلق، هرچقدر عدد فاکتور گنج



شکل ۱- فرایند تولید نانوصفحه‌های مکسین $(Ti_3C_2T_x)$ از فاز مکس (Ti_3AlC_2) .

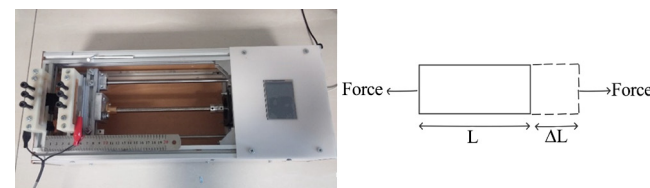
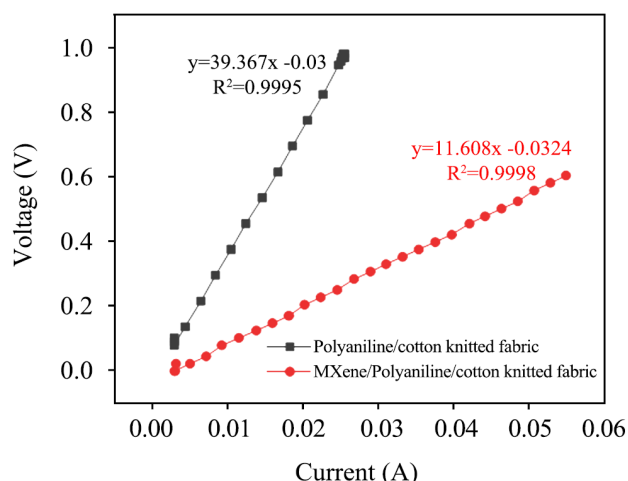
Fig. 1. The process of producing MXene nanosheets $(Ti_3C_2T_x)$ from the MAX phase (Ti_3AlC_2) .

شده از مونومر و دوپه‌کننده غوطه‌ور شده و دمای محلول با استفاده از حمام یخ به حدود $0^\circ C$ رسانده شد. سپس، محلول آبی ۱ مولار هیدروکلریک اسید دارای آمونیوم پرسولفات ۱ مولار، قطره‌قطره طی مدت ۳۰ min به آن افزوده شد، در حالی که محلول به آرامی هم‌زده می‌شد. عملیات پلیمرشدن به مدت ۳ h روی لرزاننده ادامه یافت. در نهایت، نمونه‌ها به خوبی شست‌وشو داده شده و در دمای محیط به مدت یک شبانه‌روز خشک شدند. شکل ۲ طرح فرایند پلیمرشدن شیمیایی درجای آنیلین روی پارچه را نشان می‌دهد.

همچنین برای تولید نمونه پنبه-پلی آنیلین/مکسین پس از پلیمرشدن شیمیایی درجا آنیلین، از روش پوشش‌دهی غوطه‌وری برای پوشش نانوصفحه‌های مکسین استفاده شد. بدین منظور، ابتدا محلول آبی دارای ۱۰ mg/mL مکسین به مدت ۳۰ min در حمام فراصوت قرار گرفت تا مخلوطی یکنواخت و همگن به دست آید. سپس پارچه حلقوی پوشش‌یافته با پلی آنیلین یک مرتبه در محلول مکسین غوطه‌ور شده و پس از ۱۵ min از محلول خارج شده و در دمای $50^\circ C$ خشک شد.

مشخصه‌یابی

مقاومت سطحی نمونه‌ها با دستگاه کاوند چهار نقطه‌ای ساخت شرکت سفیر ثریا سپاهان ایران (FPP-SN-554) اندازه‌گیری شده و با معادله (۱) مقاومت سطحی (square/Ω) نمونه‌ها محاسبه شد. نرم‌افزار دستگاه کاوند چهار نقطه‌ای استفاده شده قابلیت نمونه‌برداری نقطه‌ای و



شکل ۳- روش اعمال کرنش در آزمون حسگر کرنش.

Fig. 3. Strain application method for strain sensor test.

بیشتر باشد، حساسیت بیشتری در برابر کرنش دارد:

$$GF = \frac{\Delta R/R_0}{\Delta L/L_0} = \frac{\Delta R/R_0}{\varepsilon} \quad (2)$$

در این معادله، ΔR ، تغییر در مقاومت الکتریکی نمونه؛ R_0 ، مقاومت اولیه نمونه؛ ΔL ، تغییر طول؛ L_0 ، طول اصلی نمونه و ε ، کرنش است.

شکل ۴- نمودار ولتاژ برحسب جریان الکتریکی نمونه‌های پنبه- پلی‌آنیلین و پنبه-پلی‌آنیلین/مکسین.

Fig. 4. The plot of electrical voltage versus current for cotton/polyaniline and cotton/polyaniline/MXene samples.

سطحی نمونه‌های پنبه-پلی‌آنیلین و پنبه-پلی‌آنیلین/مکسین به ترتیب ۱۵ ± ۱۷۶/۰ و ۶ ± ۵۱/۱ Ω/sq به دست می‌آید. مشاهده می‌شود، با پوشش‌دهی مکسین روی نمونه، مقاومت سطحی نمونه به طور شایان توجهی کاهش یافته است. این موضوع ناشی از رسانایی زیاد این نانوصفحه‌هاست که به صورت پل‌های ارتباطی روی پوشش پلی‌آنیلین قرار می‌گیرد.

بررسی شکل‌شناسی سطحی

تصاویر میکروسکوپ الکترونی پوششی سطح نمونه پارچه‌های پنبه‌ای خام و پوشش‌یافته با پلی‌آنیلین و پلی‌آنیلین/مکسین در شکل ۵ نشان داده شده است. پارچه پنبه‌ای دارای ساختار متخلخل و یاف‌ای با ابعاد میکرومتر است. پیش از پوشش‌دهی، پارچه نسبتاً دارای سطحی صاف و بدون ناخالصی است. پس از پوشش‌دهی پارچه با پلی‌آنیلین سطح یاف تشکیل‌دهنده پارچه دارای شکل‌شناسی سطحی نسبتاً ناهموار شده است.

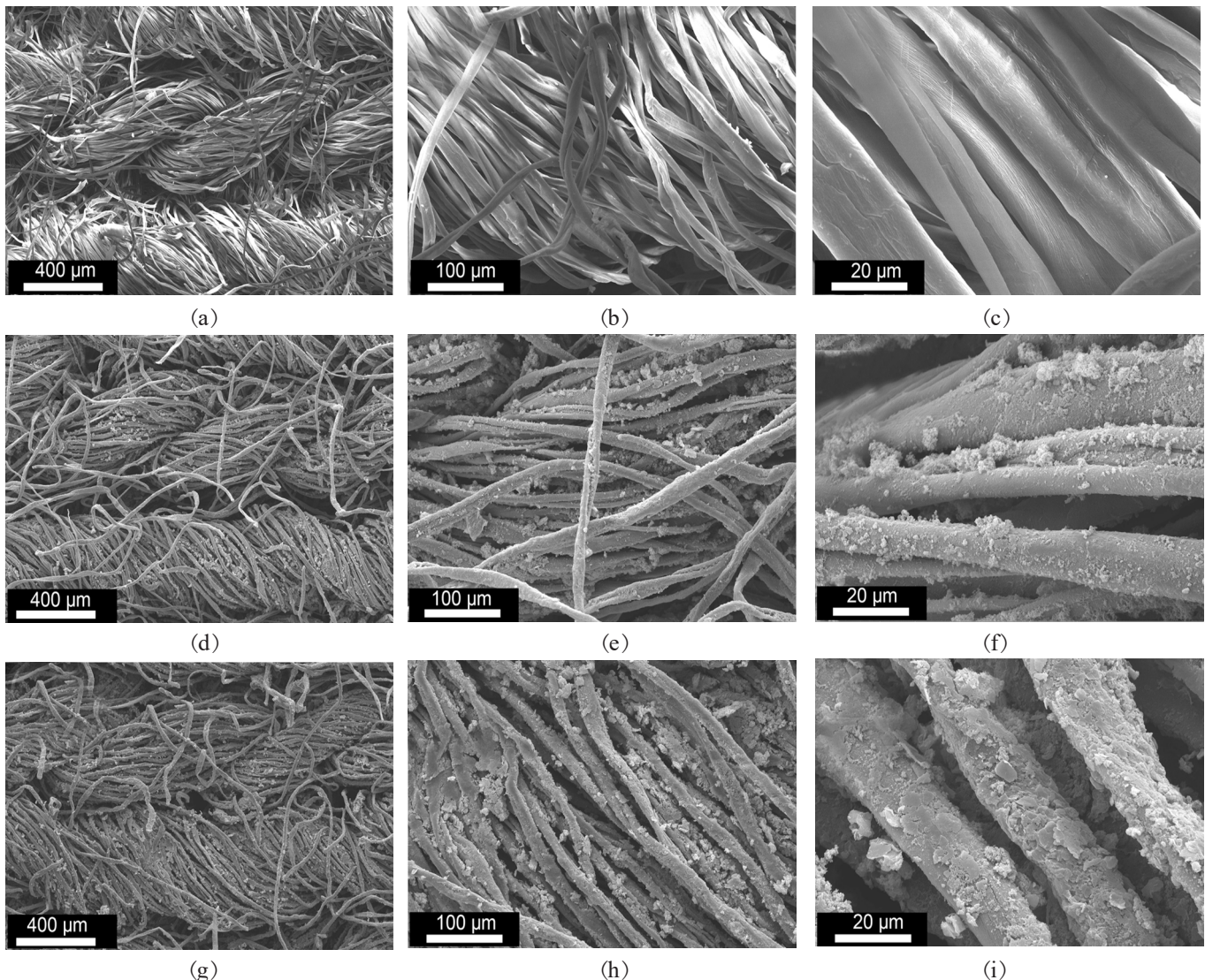
همچنین تصاویر پارچه پنبه/پلی‌آنیلین پس از پوشش‌دهی با مکسین نشان‌دهنده قرارگیری نانوصفحه‌های مکسین روی این یاف است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، پس از پوشش‌دهی همچنان ساختار لیفی و متخلخل پارچه‌ها حفظ شده است. این نانوصفحه‌ها به عنوان پل توده‌های پلیمر رسانای پلی‌آنیلین را به یکدیگر وصل می‌کنند. این پدیده باعث کاهش مقاومت الکتریکی پارچه پوشش‌یافته با پلیمر رسانا می‌شود که نتایج مقاومت سطحی نیز همین را نشان داد.

نتایج و بحث

خواص الکتریکی نمونه‌های تولیدی

در این پژوهش، پس از تولید پارچه حلقوی پودی پنبه‌ای کشیاف ۱×۱، این پارچه با روش‌های پلیمرشدن شیمیایی درجا و پوشش‌دهی غوطه‌وری به ترتیب تحت پوشش‌دهی با پلیمر رسانای پلی‌آنیلین و نانوصفحه‌های مکسین قرار گرفت. گفتنی است، با وجود آمونیوم پرسولفات و در محیط اسیدی، ابتدا آنیلین به رادیکال‌های کاتیونی اولیگوآنیلین تبدیل می‌شود. سپس، با پیشرفت پلیمرشدن اکسایشی که واکنشی گرمازا است، پلی‌آنیلین روی سطح یاف رسوب می‌کند و رنگ محلول به آبی تیره تغییر می‌یابد. در پایان، رنگ محلول به سبز (شکل امرالدینین) تغییر یافته و واکنش به پایان می‌رسد. این فرایند درجا بر سطح یاف انجام شده و به تشکیل پوشش رسانای پلی‌آنیلین روی یاف منجر می‌شود.

به منظور بررسی خواص الکتریکی پارچه‌های تولیدی، مقاومت سطحی نمونه‌ها با روش کاوند چهار نقطه‌ای اندازه‌گیری شد. بدین منظور نمودار ولتاژ برحسب جریان برای هر نمونه رسم و شیب نمودار حاصل محاسبه شد. شکل ۴ نمودارهای ولتاژ برحسب جریان الکتریکی نمونه‌های مختلف را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد، رفتار پارچه‌های تولیدی از قانون اهم پیروی می‌کند و رابطه مستقیمی بین ولتاژ الکتریکی و جریان الکتریکی وجود دارد. شیب نمودار نمونه‌های پنبه-پلی‌آنیلین و پنبه-پلی‌آنیلین/مکسین، بیانگر مقاومت الکتریکی نمونه‌هاست. با استفاده از معادله (۱) مقاومت



شکل ۵- تصاویر FE-SEM با بزرگ‌نمایی‌های مختلف پارچه‌های (a)-(c) پنبه، (d)-(f) پنبه-پلی‌انیلین و (g)-(i) پنبه-پلی‌انیلین/مکسین.

Fig. 5. FESEM images at different magnifications of (a)-(c) cotton, (d)-(f) cotton/polyaniline, and (g)-(i) cotton/polyaniline/MXene fabrics.

عنصر کلر افزون بر وجود به‌عنوان دوپه‌کننده می‌تواند به‌دلیل وجود در گروه‌های سطحی نانوصفحه‌های مکسین نیز باشد. گفتنی است، پیک‌های ظاهرشده در حدود $2/1$ و $9/7$ keV ناشی از عنصر طلای پوشش‌دهی‌شده در آزمون FE-SEM است.

رفتار گرمایش ژول نمونه‌های تولیدی

برای بررسی رفتار گرمایش ژول پارچه‌های حلقوی پوشش‌یافته با پلی‌انیلین و پلی‌انیلین/مکسین، با اتصال دو انتهای نمونه‌های تولیدی به منبع تغذیه DC تغییر دمای نمونه در ولتاژهای مختلف $2/5$ ، 5 ، 10 ، 15 و 20 V بررسی شد. قابلیت گرمایش ژول نمونه‌ها براساس تغییرات دمایی نمونه نسبت به زمان ارزیابی می‌شود. نمودار تغییرات

شکل ۶، طیف EDX و درصد عناصر موجود در نمونه‌های پارچه خام، پارچه پوشش‌یافته با پلی‌انیلین و پارچه پوشش‌یافته با پلی‌انیلین/مکسین را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد، پارچه پنبه‌ای خام فقط دارای عناصر کربن و اکسیژن است. پارچه پوشش‌یافته با پلی‌انیلین دارای عناصر S، N، O، C و Cl است که تأییدکننده پوشش پلی‌انیلین سنتز شده با دوپه‌کننده HCl و اکسندۀ آمونیوم پرسولفات است. وجود عنصر گوگرد ناشی از استفاده از اکسندۀ آمونیوم پرسولفات است. پس از پوشش‌دهی پارچه با مکسین، افزون بر عناصر قبلی، عناصر F و Ti نیز روی سطح پارچه وجود دارند که درصد زیاد تیتانیم بیانگر پوشش‌دهی مکسین روی سطح الیاف پنبه/پلی‌انیلین است. وجود فلئور می‌تواند ناشی از گروه‌های عاملی مکسین باشد. همچنین،

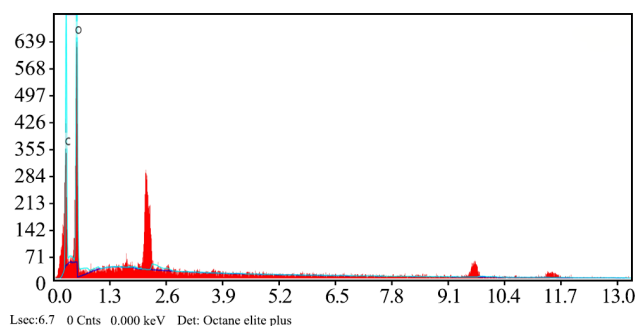
دمای تولیدی با اعمال ولتاژهای الکتریکی مختلف قابل کنترل است. دمای حالت پایدار برای پارچه حلقوی پنبه/پلی‌آنیلین در ولتاژهای الکتریکی ۲/۵، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ V به ترتیب ۲۹/۵، ۳۴/۷، ۶۱/۶، ۷۵/۹، ۹۹/۶، ۱۲۵/۴ °C به دست آمده است.

همچنین نتایج نشان می‌دهد، تنها با یک چرخه پوشش‌دهی مکسین روی سطح پارچه پنبه-پلی‌آنیلین، دماهای پایدار افزایش می‌یابد. به طوری که دمای حالت پایدار این نمونه در ولتاژهای الکتریکی ۲/۵، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ V به ترتیب ۳۱/۵، ۳۹/۵، ۶۲/۳، ۸۷/۸، ۱۱۴ و ۱۳۱/۳ °C است. دمای تولیدی نمونه پلی‌آنیلین/مکسین بیشتر از نمونه پوشش‌یافته با پلی‌آنیلین تنها بوده که دلیل آن مقاومت به نسبت کمتر آن است. این نتایج خاصیت هم‌افزای پلی‌آنیلین و نانوصفحه‌های مکسین را تأیید می‌کند. دمای تولیدی با این نمونه نسبت به بسیاری از پژوهش‌های قبلی بیشتر است. به عنوان مثال، پارچه حلقوی پنبه‌ای پوشش‌دهی شده با پلیمر رسانای PEDOT و نانوصفحه‌های گرافن اکسید کاهش یافته در ولتاژ ۳۰ V، دمای ۷۰ °C تولید کرده است [۲۸]. در پژوهش دیگری دمای تولیدی با پارچه حلقوی پنبه/پلی‌پیرول در ولتاژ ۱۶ V حدود ۱۲۰ °C گزارش شده است [۲۹]. همچنین در پژوهش Parvez و همکاران [۳۰] دمای حدود ۴۰ °C با اعمال ولتاژ ۱۵ V گزارش شده است.

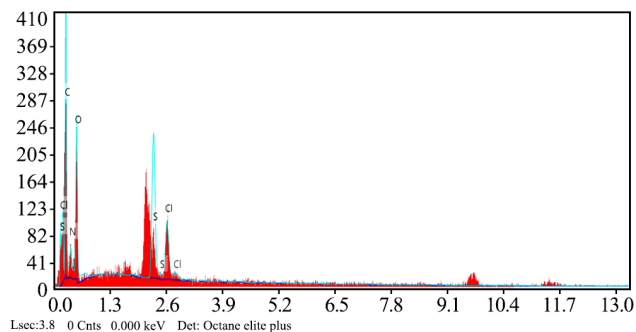
عملکرد نمونه‌های تولیدی به عنوان حسگر کرنش

به واسطه ویژگی ازدیاد طول‌پذیری پارچه‌های حلقوی، تغییرات دما در کرنش‌های مختلف در نمونه پنبه-پلی‌آنیلین/مکسین بررسی شد. تغییرات دمای تولیدی به کمک نمونه در کرنش‌های مختلف در شکل ۸ نشان داده شده است. طبق نتایج با افزایش کرنش اعمال شده به نمونه، دمای تولیدی به کمک نمونه افزایش می‌یابد، به طوری که دماهای تولیدی در کرنش‌های ۰، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰٪ به ترتیب ۵۱/۳، ۵۵/۷، ۶۰/۵، ۶۴ و ۶۹/۷ °C است. با اعمال کشش به نمونه تماس بین الیاف و نخ‌های پوشش‌یافته با مکسین و پلی‌آنیلین در پارچه بیشتر شده و نخ‌ها به یکدیگر نزدیک می‌شوند و در نتیجه رسانایی افزایش و دمای تولیدی افزایش می‌یابد.

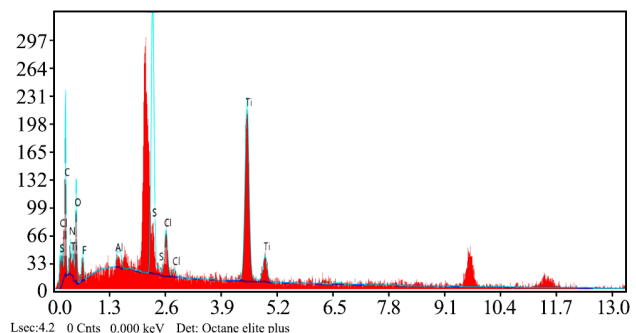
در سال‌های اخیر حسگرهای کرنش انعطاف‌پذیر کاربردهای امیدوارکننده‌ای را در زمینه‌های مختلف مانند تشخیص حرکات انسان، نظارت بر مراقبت‌های بهداشتی و رابط انسان و ماشین نشان داده‌اند. از این رو، قابلیت استفاده از پارچه حلقوی پنبه-پلی‌آنیلین/مکسین به عنوان حسگر کرنش نیز بررسی شد. تغییرات پاسخ حسگر برحسب کرنش اعمال شده با سرعت کرنش ۵ mm/min بررسی شده است که نتیجه آن در شکل ۹ مشاهده می‌شود. منفی بودن شیب



(a)



(b)

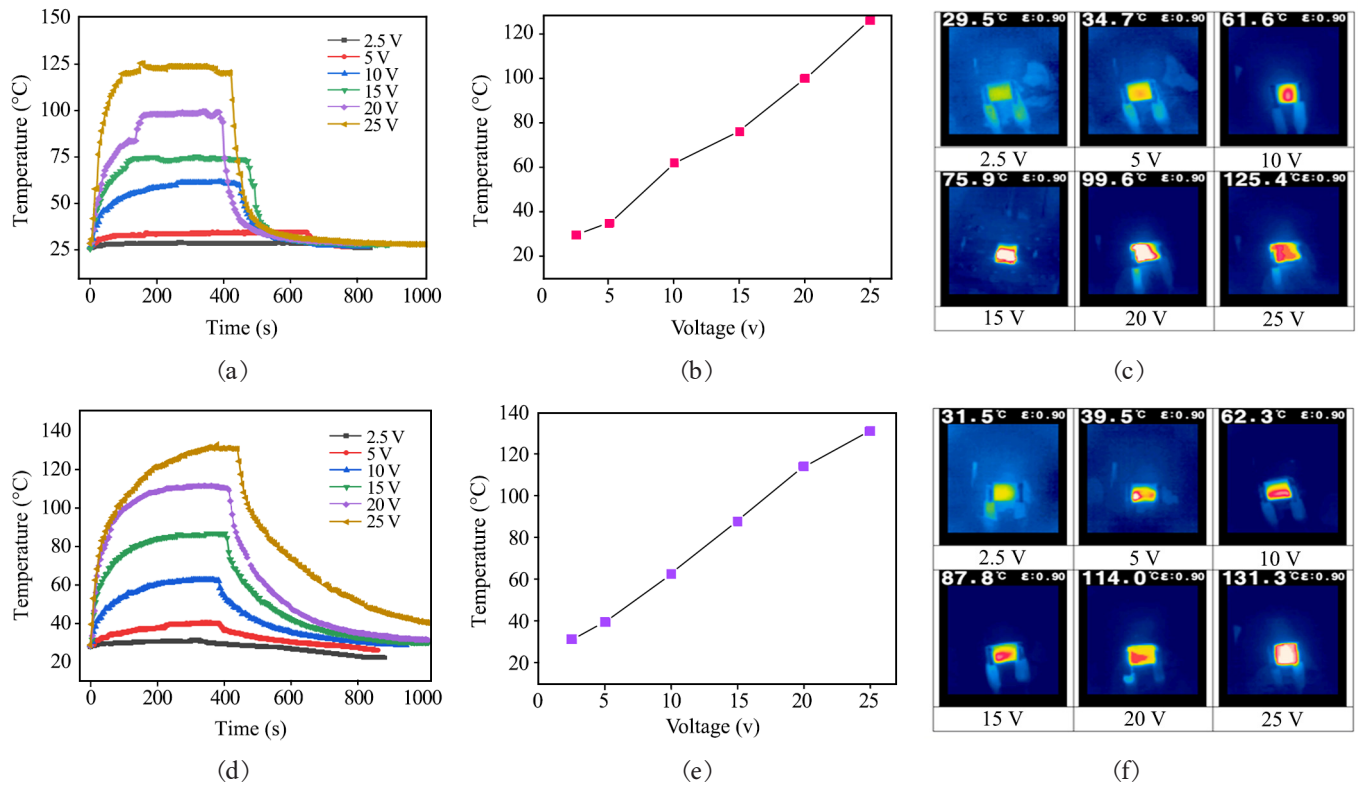


(c)

شکل ۶- طیف EDX پارچه‌های (a) پنبه‌ای، (b) پوشش‌یافته با پلی‌آنیلین و (c) پوشش‌یافته با پلی‌آنیلین/مکسین.

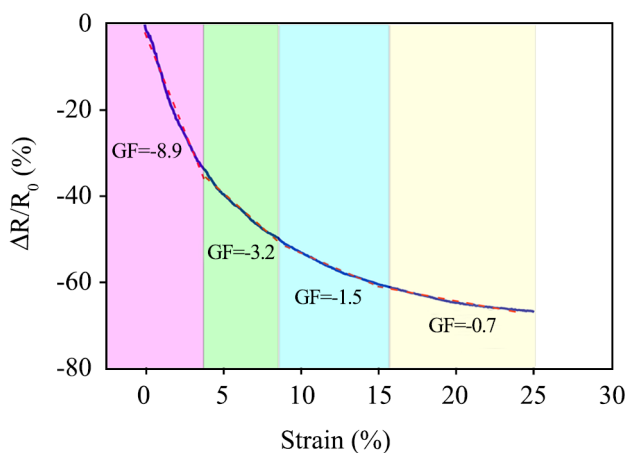
Fig. 6. EDX spectra of (a) cotton, (b) polyaniline-coated, and (c) polyaniline/MXene-coated fabrics.

دما برحسب زمان، نمودار دمای اشباع در ولتاژهای مختلف و تصاویر دوربین گرمایی نمونه در دماهای مختلف و در ولتاژهای مختلف در شکل ۷ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در ناحیه اول نمودار دما-زمان، با توجه به رسانایی نمونه، با اعمال ولتاژ الکتریکی، جریان الکتریکی از نمونه عبور کرده و باعث تولید گرما می‌شود و دمای نمونه افزایش می‌یابد. در ناحیه دوم که همان حالت تعادل است، نمونه به بیشترین دمای ممکن رسیده و دما تقریباً ثابت می‌ماند. در نهایت، در ناحیه سوم با قطع ولتاژ الکتریکی، دمای نمونه کاهش می‌یابد و نمونه به تدریج سرد می‌شود تا به دمای اولیه برسد.



شکل ۷- نمودار تغییرات دما برحسب زمان، نمودار دمای اشباع برحسب ولتاژ و تصاویر دوربین زیرقرمز در ولتاژهای مختلف برای پارچه‌های (a)-(c) حلقوی پنبه/پلی‌انیلین و (d)-(f) پنبه/پلی‌انیلین/مکسین

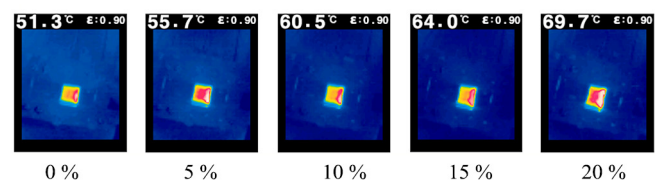
Fig. 7. Temperature change versus time plot, saturation temperature versus voltage plot, and infrared camera images at different voltages for cotton/polyaniline (a)-(c) and cotton/polyaniline/MXene (d)-(f) knitted fabrics.



شکل ۹- تغییرات پاسخ حسگر تولیدشده از پارچه حلقوی پنبه/پلی‌انیلین/مکسین برحسب کرنش اعمال شده با مقدار کرنش ۰.۵ mm/min.

Fig. 9. Sensor response changes of the cotton/polyaniline/MXene knitted fabric versus applied strain at a strain rate of 0.5 mm/min.

نمودار که همان فاکتور گنج (GF) را نشان می‌دهد، بیانگر کاهش مقاومت الکتریکی نمونه طی ازدیاد طول است. مشاهده می‌شود، در کرنش‌های اولیه حساسیت حسگر شایان توجه است ($GF = -8/9$) و با افزایش کرنش شیب نمونه کاهش یافته که بیانگر کاهش تغییرات در پاسخ نمونه است. پاسخ منفی حسگر تولیدی به کرنش را می‌توان به



شکل ۸- تصاویر دوربین گرمایی از سطح پارچه حلقوی پوشش یافته با پلی‌انیلین/مکسین تحت کرنش‌های ۰ تا ۲۰٪ در ولتاژ اعمالی ۱۰ V.

Fig. 8. Thermal camera images of the surface of polyaniline/MXene-coated knitted fabric under strains of 0 to 20 % at an applied voltage of 10 V.

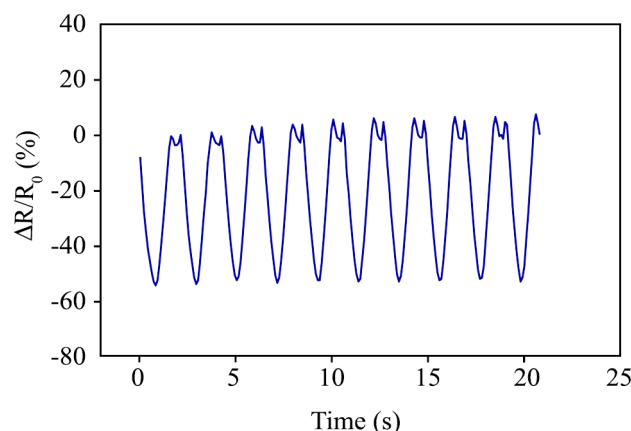
به دلیل استفاده همزمان از دو ماده حساس پلی‌آنیلین و مکسین است. شکل ۱۰ پاسخ حسگر تولیدی را در ۲۰٪ کرنش در چرخه‌های متوالی نشان می‌دهد. طبق نتایج مقاومت الکتریکی پس از اعمال نیرو و ایجاد ازدیاد طول در نمونه افزایش و پس از حذف آن کاهش می‌یابد و حسگر به خوبی این تغییرات را تشخیص داده است. همچنین این شکل حاکی از تکرارپذیری مطلوب پاسخ حسگر تولیدی است. پارچه‌های پوشش‌یافته با پلی‌آنیلین و مکسین، انعطاف‌پذیری زیادی دارند و می‌توان آن‌ها را در زاویه‌ها و تغییر شکل‌های مختلفی استفاده کرد که این ویژگی مهمی در کاربردهای عملی محسوب می‌شود.

نتیجه‌گیری

پارچه‌های پنبه‌ای حلقوی با استفاده از پلیمر رسانای پلی‌آنیلین و نانوصفحه‌های مکسین پوشش‌دهی شده و قابلیت استفاده از آن‌ها به عنوان گرم‌کن‌های الکتریکی و نیز حسگر کرنش ارزیابی شد. نتایج آزمون FE-SEM و EDX پوشش‌دهی پلی‌آنیلین و مکسین بر سطح پارچه پنبه‌ای را تأیید کرد. طبق قانون ژول، مقاومت الکتریکی کمتر به تولید گرمای بیشتر منجر می‌شود. با افزایش ولتاژ الکتریکی، دمای نمونه افزایش می‌یابد. اثر کشش بر خواص الکتروگرمایی نمونه پنبه-پلی‌آنیلین/مکسین تحت ولتاژ الکتریکی ۱۰ V بررسی شد. نتایج نشان داد، با اعمال کشش به نمونه، حلقه‌ها به یکدیگر نزدیک شده و تماس مواد رسانا با یکدیگر افزایش یافته در نتیجه دمای تولیدی نمونه افزایش می‌یابد. در نمونه پنبه-پلی‌آنیلین/مکسین با اعمال ۲۰٪ کشش، گرمایش الکتریکی از ۵۱/۳ °C به ۶۹/۷ °C افزایش یافت. قابلیت استفاده از پارچه‌های پنبه-پلی‌آنیلین/مکسین تولیدی به عنوان حسگر کرنش بررسی شد که نتایج نشان‌دهنده پاسخ منفی این نمونه‌ها نسبت به افزایش کرنش بود. حساسیت مطلوب حسگرهای پارچه تولیدی در این پژوهش قابلیت استفاده از آن را در نظارت و تحلیل حرکت انسان نشان می‌دهد.

مراجع

1. Liu L., Liang X., Wan X., Kuang X., Zhang Z., Jiang G., Dong Z., Chen C., Cong H., He H., A Review on Knitted Flexible Strain Sensors for Human Activity Monitoring, *Adv. Mater. Technol.*, **8**, 2300820, 2023.
2. Idumah C.I., Design, Fabrication, Characterization and Properties of Metallic and Conductive Smart Polymeric Textiles for Multifunctional Applications, *Nano-Struct. Nano-Objects*, **35**, 100982, 2023.
3. Grancarić A.M., Jerković I., Koncar V., Cochrane C., Kelly F.M., Soulat D., Legrand X., Conductive Polymers for Smart Textile Applications, *J. Ind. Text.*, **48**, 612-642, 2018.
4. Zhang S., Ying H., Huang P., Yang T., Han W.Q., Hierarchi-



شکل ۱۰- پاسخ حسگر کرنش تولیدی نسبت به ۲۰٪ کرنش در چرخه‌های متوالی.

Fig. 10. Strain sensor response to 20% strain in consecutive cycles.

دو عامل نسبت داد: (الف) با اعمال کشش در یک راستا به دلیل نسبت پواسون مثبت پارچه در طول فرایند کشش یا خم شدن، نخ‌ها در راستای دیگر به یکدیگر نزدیک شده و تماس پیدا می‌کنند و در نتیجه سطح تماس افزایش می‌یابد و مقاومت در نقاط تقاطع نخ‌ها کاهش می‌یابد. (ب) الیاف درون نخ‌های کشیده شده نیز نزدیک تر از وضعیت اولیه خود قرار می‌گیرند، به طوری که الیاف رسانا به یکدیگر فشرده شده و به کاهش مقاومت ذاتی نخ‌ها منجر می‌شود. در نتیجه، کشش به کاهش مقاومت ذاتی نخ، مقاومت در برابر تماس بین نخ‌های تار و بود و در نهایت باعث کاهش مقاومت پارچه منجر می‌شود. این پدیده در پژوهش‌های پیشین نیز مشاهده شده است [۳۱].

گفتنی است، مقدار مطلق حساسیت حسگر تولیدی در این پژوهش (۸/۹) در مقایسه با بسیاری از کارهای پیشین بیشتر است. به عنوان مثال، حساسیت پارچه لاکرای پوشش‌یافته با پلی‌آنیلین [۳۲] ۰/۹۲، پارچه پنبه-مکسین [۲۳] ۴/۱، پارچه پنبه‌ای پوشش‌یافته با PEDOT و گرافن [۳۳] ۴/۴ و پارچه حلقوی پنبه-پلی‌پیرول از ۰/۳۵ تا ۲/۹ [۳۴] گزارش شده است. حساسیت بیشتر نمونه تولیدی در این پژوهش

- cal Utilization of raw Ti_3C_2Tx MXene for fast Preparation of Various $Ti_3C_2T_x$ MXene Derivatives, *Nano Res.*, 1-10, 2022.
5. Chauhan V.K., Dubey R., Pandey R., Thennarasu P., Dubey S.K., MXene on Textile Substrates: A Review, *Adv. Eng. Mater.*, **26**, 2301962, 2024.
 6. Zhang Y., Zhang S., Qi K., Wang Y., Chen W., Xu J., Wang Y., Gu D., Pi X., Sun B., Scalable Assembly of Polyaniline/ $Ti_3C_2T_x$ MXene Modified Cotton Yarn Flexible Electrode for High-Performance Wearable Energy Storage, *Chem. Eng. Sci.*, **305**, 121206, 2025.
 7. Mokhtari F., Usman K.A.S., Zhang J., Komljenovic R., Simon Z., Dharmasiri B., Rezk A., Sherrell P.C., Henderson L.C., Varley R.J., Enhanced Acoustoelectric Energy Harvesting with $Ti_3C_2T_x$ MXene in an All-Fiber Nanogenerator, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2025.
 8. Qin R., Nong J., Wang K., Liu Y., Zhou S., Hu M., Zhao H., Shan G., Recent Advances in Flexible Pressure Sensors Based on MXene Materials, *Adv. Mater.*, **36**, 2312761, 2024
 9. Sun Z., Shen J., Pan Y., Jiang Y., Jiang J., MXene Anchored Fabric for Room-Temperature Operated Ammonia Sensing, *Chem. Eng. Sci.*, **302**, 120845, 2025.
 10. Zhao X., Wang L.-Y., Tang C.-Y., Zha X.-J., Liu Y., Su B.-H., Ke K., Bao R.-Y., Yang M.-B., Yang W., Smart $Ti_3C_2T_x$ MXene Fabric with Fast Humidity Response and Joule Heating for Healthcare and Medical Therapy Applications, *ACS Nano*, **14**, 8793-8805, 2020.
 11. Azeem M., Shahid M., Masin I., Petru M., Design and Development of Textile-Based Wearable Sensors for Real-Time Biomedical Monitoring; A Review, *J. Text. Inst.*, **116**, 80-95, 2025.
 12. Li H., Cao J., Chen J., Li Y., Liu J., Du Z., MXene-Containing Pressure Sensor Based on Nanofiber Film and Spacer Fabric with Ultrahigh Sensitivity and Joule Heating Effect, *Text. Res. J.*, **92**, 1999-2009, 2022.
 13. Zeng Q., Su J., Han J., Lightweight MXene-Coated Cotton Textiles with Electromagnetic Interference Shielding, Electrothermal/Photothermal Conversion and Self-cleaning Properties, *Cellulose*, 1-17, 2025.
 14. Ahmed A., Hossain M.M., Adak B., Mukhopadhyay S., Recent Advances in 2D MXene Integrated Smart-Textile Interfaces for Multifunctional Applications, *Chem. Mater.*, **32**, 10296-10320, 2020.
 15. Yang M., Pan J., Luo L., Xu A., Huang J., Xia Z., Cheng D., Cai G., Wang X., CNT/Cotton Composite Yarn for Electro-Thermochromic Textiles, *Smart Mater. Struct.*, **28**, 085003, 2019.
 16. Afroj S., Karim N., Wang Z., Tan S., He P., Holwill M., Ghazaryan D., Fernando A., Novoselov K.S., Engineering Graphene Flakes for Wearable Textile Sensors via Highly Scalable and Ultrafast Yarn Dyeing Technique, *ACS Nano*, **13**, 3847-3857, 2019.
 17. Levitt A., Hegh D., Phillips P., Uzun S., Anayee M., Razal J.M., Gogotsi Y., Dion G., 3D Knitted Energy Storage Textiles Using MXene-coated yarns, *Mater. Today*, **34**, 17-29, 2020.
 18. Hu M., Li Z., Li G., Hu T., Zhang C., Wang X., All-Solid-State Flexible Fiber-Based MXene Supercapacitors, *Adv. Mater. Technol.*, **2**, 1700143, 2017.
 19. Tas M., Altin Y., Bedeloglu A., Graphene and Graphene Oxide-Coated Polyamide Monofilament Yarns for Fiber-Shaped Flexible Electrodes, *J. Text. Inst.*, **110**, 67-73, 2019.
 20. Shao W., Tebyetekerwa M., Marriam I., Li W., Wu Y., Peng S., Ramakrishna S., Yang S., Zhu M., Polyester@MXene Nanofibers-Based Yarn Electrodes, *J. Power Sources*, **396**, 683-690, 2018.
 21. Wang B., Lai X., Li H., Jiang C., Gao J., Zeng X., Multifunctional MXene/Chitosan-Coated Cotton Fabric for Intelligent Fire Protection, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **13**, 23020-23029, 2021.
 22. Kim S.-Y., Gang H.-E., Park G.-T., Jeon H.-B., Jeong Y.G., Electromagnetic Interference Shielding and Electrothermal Performance of MXene-Coated Cellulose Hybrid Papers and Fabrics Manufactured by a Facile Scalable Dip-Dry Coating Process, *Adv. Eng. Mater.*, **23**, 2100548, 2021.
 23. Liu L., Wang L., Liu X., Yuan W., Yuan M., Xia Q., Hu Q., Zhou A., High-Performance Wearable Strain Sensor Based on MXene@ Cotton Fabric with Network Structure, *Nanomaterials*, **11**, 889, 2021.
 24. He H. and Guo Z., Fabric-Based Superhydrophobic MXene@ Polypyrrole Heater with Superior Dual-Driving Energy Conversion, *J. Colloid Interface Sci.*, **629**, 508-521, 2023.
 25. Zheng X., Shen J., Hu Q., Nie W., Wang Z., Zou L., Li C., Vapor Phase Polymerized Conducting Polymer/MXene Textiles for Wearable Electronics, *Nanoscale*, **13**, 1832-1841, 2021.
 26. Ye F., Xu B., Chen R., Li R., Chang G., A High Performance Flexible Cotton-Based Supercapacitor Prepared by In-Situ Polyaniline and MXene Coating, *J. Energy Storage*, **62**, 106803, 2023.
 27. Onar N., Akşit A.C., Ebeoglugil M.F., Birlik I., Celik E., Ozdemir I., Structural, Electrical, and Electromagnetic Properties of Cotton Fabrics Coated with Polyaniline and Poly-

- pyrrole, *J. Appl. Polym. Sci.*, **114**, 2003-2010, 2009.
28. Ahmed A., Jalil M.A., Hossain M.M., Moniruzzaman M., Adak B., Islam M.T., Parvez M.S., Mukhopadhyay S., A PEDOT:PSS and Graphene-Clad Smart Textile-Based Wearable Electronic Joule Heater with High Thermal Stability, *J. Mater. Chem. C*, **8**, 16204-16215, 2020.
 29. Wang B., Cheng H., Zhu J., Yuan Y., Wang C., A Flexible and Stretchable Polypyrrole/Knitted Cotton for Electrothermal Heater, *Org. Electron.*, **85**, 105819, 2020.
 30. Parvez M.S., Rahman M.M., Samykano M., Ali M.Y., Electrochemical Characterization and Joule Heating Performance of Polyaniline Incorporated Cotton Fabric, *Phys. Chem. Earth, Parts A/B/C*, **129**, 103323, 2023.
 31. Zhao K., Niu W., Zhang S., Highly Stretchable, Breathable and Negative Resistance Variation Textile Strain Sensor with Excellent Mechanical Stability for Wearable Electronics, *J. Mater. Sci.*, **55**, 2439-2453, 2020.
 32. Muthukumar N., Thilagavathi G., Kannaian T., Design and Development of Polyaniline-Coated Fabric Strain Sensor for Goniometry Applications, *Int. J. Sci. Eng. Appl.*, 2319-7560, 2019.
 33. Zahid M., Papadopoulou E.L., Athanassiou A., Bayer I.S., Strain-Responsive Mercerized Conductive Cotton Fabrics Based on PEDOT:PSS/Graphene, *Mater. Des.*, **135**, 213-222, 2017.
 34. Hao D., Xu B., Cai Z., Polypyrrole Coated Knitted Fabric for Robust Wearable Sensor and Heater, *J. Mater. Sci., Mater. Electron.*, **29**, 9218-9226, 2018.