



Journal of Applied Research of Chemical-Polymer Engineering

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

Research Paper

Fabrication and Characterization of an Electrospun Polybenzimidazole–Carbon Nanotube Sensor for Volatile Vapor Detection

Payam Molla-Abbasi^{1,*}, Negin Sadat Hosseininejad¹

¹ Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran

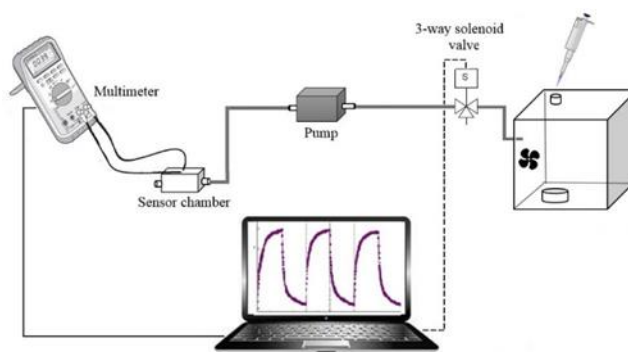
ARTICLE INFO

Received 2025-08-27
Accepted 2025-10-05
Available online 2025-11-17
ISSN: 2588-5316
Online ISSN: 2588-5324

Keywords:

Conductive Polymer Composite (CPC)
Polybenzimidazole (PBI)
Gas Detector
Nanofiber
Electrospinning Process

GRAPHICAL ABSTRACT



ABSTRACT

Research subject: In this study, a conductive sensitive layer composed of polybenzimidazole (PBI) and carbon nanotubes (CNTs) was designed and fabricated via electrospinning for the detection of volatile organic compounds (VOCs)—(methanol, ethanol, isopropyl alcohol (IPA), acetone—and water vapor.

Research approach: This study employed an experimental approach. In the first stage, various processing parameters—such as flow rate, voltage, and needle-to-collector distance—were optimized to enable the fabrication of uniform fibers with nanometric diameters. Subsequently, the fibers were deposited onto an interdigitated gold-on-glass electrode (IDE) as the sensor base to form the sensitive layer of the sensor. Finally, the dynamic response of the fabricated sensor was evaluated using a custom-built measurement system developed by the research group.

Main results: Optimal electrospinning conditions were established at a flow rate of 0.5 cc h⁻¹, an applied voltage of 24 kV, and a nozzle-to-collector distance of 15 cm, enabling the production of uniform nanofibers, as confirmed by scanning electron microscopy (SEM). Brunauer–Emmett–Teller (BET) analysis revealed a fiber specific surface area corresponding to 18.23 m² g⁻¹. Dynamic sensing experiments demonstrated strong sensor responses toward alcohols and acetone, with response intensity correlating inversely with alcohol polarity from methanol to IPA. The sensors exhibited an exceptionally short response time (< 10 s), attributed to the nanofibrous architecture of the sensing layer, which promotes rapid vapor diffusion and access to active sites. Furthermore, the response trends and selectivity toward target vapors were analyzed in the context of thermodynamic parameters, including the Flory–Huggins interaction parameter.

* Corresponding author: p.abbasi@eng.ui.ac.ir



نشریه پژوهش‌های کاربردی مهندسی شیمی-پلیمر

آدرس صفحه: www.arcpe.modares.ac.ir

مقاله تحقیقاتی

ساخت و بررسی رفتار حسگر پلی‌بنزی‌ایمیدازول-نانولوله کربنی الکترورسی شده برای شناسایی بخارات فرار

پیام ملاعباسی^{۱*}، نگین سادات حسینی‌نژاد^۱

^۱ گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

چکیده

موضوع تحقیق: در این پژوهش با استفاده از روش الکترورسی لایه حساس رسانای بر پایه پلی‌بنزی‌ایمیدازول (PBI)/ نانولوله کربنی (CNTs) به منظور شناسایی ترکیبات آلی فرار (VOGs) (متانول، اتانول، ایزوپروپیل‌الکل (IPA)، استون) و بخار آب طراحی و ساخته شده است.

روش تحقیق: روش انجام پژوهش به صورت تجربی است. در ابتدا پارامترهای فرایندی مختلف مانند دبی، ولتاژ و فاصله سوزن تا جمع‌کننده بهینه شد تا امکان تولید لیف یکنواخت و با قطر نانومتری به دست بیاید. سپس با لایه‌نشانی الیاف بر روی الکتروده شانه‌ای (IDE) طلا بر روی شیشه به عنوان پایه حسگر، لایه حساس حسگر ساخته شد. در پایان، پاسخ دینامیک حسگرهای ساخته شده توسط دستگاه طراحی شده توسط گروه مورد بررسی قرار گرفت.

نتایج اصلی: شرایط بهینه الکترورسی با تنظیم میزان دبی 0.5 cc.hr^{-1} و ولتاژ 24 کیلوولت و فاصله نازل تا جمع‌کننده 15 سانتی‌متر منجر به تولید نانوالیاف یکنواخت گردید که این ساختار با استفاده از آزمون میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) تأیید شده است. میزان سطح ویژه موجود در الیاف با استفاده از آزمون اندازه‌گیری سطح ویژه سه نقطه‌ای (BET) اندازه‌گیری شد که برابر $18/23 \text{ m}^2.\text{gr}^{-1}$ به دست آمد. نتایج آزمون پویای حسگری نشان‌دهنده پاسخ بسیار خوب حسگر ساخته شده در مقابل الکل‌ها و استون است، به گونه‌ای که شدت پاسخ با کاهش میزان قطبیت الکل‌ها از متانول به ایزوپروپیل‌الکل افزایش می‌یابد. زمان پاسخ حسگرها بسیار کوتاه (کمتر از ۱۰ ثانیه) است که این مسئله به دلیل ساختار نانوالیاف لایه حساس است که سبب می‌شود تا نفوذ مولکول‌های بخار و دسترسی آن‌ها به مکان‌های فعال به شدت افزایش یابد. در نهایت نیز روند پاسخ و انتخاب‌پذیری حسگر به دست آمده در مقابل بخارات هدف بر اساس پارامترهای ترمودینامیکی مانند پارامتر برهم‌کنش فلوری-هاگینز مورد مطالعه قرار گرفته است.

کلیدواژه‌ها

کامپوزیت پلیمری رسانا (CPC)

پلی‌بنزی‌ایمیدازول

حسگر شناسایی گاز

نانوالیاف

فرایند الکترورسی

اطلاعات مقاله

دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۰۵

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۱۰

دسترس آنلاین: ۱۴۰۴/۰۸/۲۶

ISSN: 2588-5316

Online ISSN: 2588-5324

* نویسنده مسئول: p.abbasi@eng.ui.ac.ir

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

۱ مقدمه

در حالت کلی حسگرها ابزاری هستند متشکل از یک لایه حساس که در اثر اعمال محرکی مانند نور، صوت، دود، گاز و غیره به‌عنوان سیگنال ورودی تغییرات فیزیکی و شیمیایی در لایه حساس آن‌ها اتفاق می‌افتد. پس از آن سیگنال خروجی به‌صورت الکتریکی اطلاعات سیگنال ورودی را بررسی و ردیابی می‌کند. جنس ماده استفاده‌شده در لایه‌های حساس بسیار پراهمیت است؛ زیرا نشان می‌دهد که چه اتفاقی در حسگر می‌افتد و چه تأثیری بر عملکرد حسگر می‌گذارد [۱]. به‌طور معمول برای تشخیص ترکیبات آلی فرار، به‌دلیل خطرات ناشی از قرار گرفتن در معرض این مواد، از حسگرهای شناسایی گاز استفاده می‌شود [۲]. از سال‌های گذشته تقاضا برای تشخیص و شناسایی گازها و بخارات بسیار زیاد شده و کاربرد حسگرها بسیار وسیع شده است. مطالعاتی درباره حسگرها برای اولین بار در فوکونوکا، ژاپن، در سال ۱۹۸۳ توسط پروفیسور سیاما انجام شد [۳]. این حسگرها به‌طور چشم‌گیری نشان دادند که نظارت بر گونه‌ای گاز خاص در محل و در زمان واقعی چقدر مهم است و به‌طور مداوم برای اطمینان از ایمنی از خطرات گاز، محافظت از محیط و همچنین برای تشخیص و واکاوی ترکیبات آلی فرار در دهه‌های گذشته در بسیاری از زمینه‌ها مانند آلودگی هوا و تشخیص گازهای سمی و بیماری براساس نشانگرهای زیستی (Biomarkers) از بدن، کنترل کیفیت غذا و غیره، اهمیت چنین فناوری نوظهوری به‌خوبی نشان داده شده است [۳].

حسگرهای گازی، حسگرهای شیمیایی هستند که توانایی تشخیص گاز یا بخار (آنالیت) (Analyte) را دارند و اگر سیگنال خروجی آن‌ها به‌صورت تغییر مقاومت الکتریکی باشد حسگرهای مقاومته شیمیایی (Chemiresistor) نام دارند [۵]. سازوکار اصلی عملکرد این حسگرها مبتنی بر برهم‌کنش بین مولکول‌های آنالیت و لایه حساس است. این حسگرها، براساس منطق پاسخ، به حسگر منفرد و آرایه‌ی بینی الکترونیکی تقسیم می‌شوند و همچنین می‌توان براساس نوع لایه حساس برپایه‌ی اکسیدهای فلزی، پلیمرهای رسانای ذاتی، نانومواد کربنی و کامپوزیت پلیمری رسانا، حسگرهای شناسایی گاز را دسته‌بندی کرد [۶، ۷]. حسگرهای برپایه اکسیدهای فلزی در برابر مولکول‌های گاز یا آنالیت سریع پاسخ داده و حساسیت بالایی از خود نشان می‌دهند؛ اما به‌شدت به دما و رطوبت حساس هستند و انتخاب‌پذیری ضعیفی دارند [۸]. حسگرهای برپایه پلیمرهای رسانای ذاتی از دسته پلیمرهایی هستند که رسانایی کمی دارند و از طریق واکنش اکسایش کاهش رسانایی آن‌ها افزایش می‌یابد و همچنین دارای حساسیت خوب و سریع نسبت به برخی بخارات هستند؛ ولی به دما و رطوبت حساسند و برگشت‌پذیری خوبی ندارند و همچنین به‌دلیل تنوع کم پلیمرهای رسانا، کاربردشان محدود است [۱۰، ۱۱]. حسگرهای برپایه نانولوله کربنی یا به‌صورت تک‌دیواره هستند که حساسیت نسبتاً بالایی دارند یا به‌صورت چنددیواره هستند که حساسیت کمی دارند و انتخاب‌پذیری آن‌ها ضعیف است؛ اما درکل این دسته از حسگرها به‌دلیل سطح خنثی و عدم وجود گروه‌های عاملی حساسیت بسیار پایینی دارند [۱۲]. در حسگر کامپوزیت‌های پلیمری رسانا یک لایه حساس کامپوزیت پلیمری بر روی زمینه‌ی شیشه‌ای یا سرامیکی دارای الکتروود رسانا نشانده شده است. به‌منظور بررسی پاسخ این دسته از حسگرها سه سازوکار پیشنهاد

شده است. در روش اول مولکول‌های بخار مورد نظر در ماتریس پلیمری نفوذ می‌کنند و ماتریس پلیمری متورم می‌شود و شبکه رسانایی ایجادشده نیز مختل می‌شود و مقاومت الکتریکی لایه حساس تغییر می‌کند. در منطق دوم، مولکول بخار موردنظر جذب سطح نانوذرات رسانای نیمه‌رسانا مانند نانولوله-کربنی توزیع‌شده در ماتریس پلیمری می‌شوند و منجر به تغییر مقاومت الکتریکی خود نانوذره می‌شوند. در سازوکار سوم، نفوذ و جذب مستقیم مولکول‌های گاز یا ترکیبات بخار آلی در اتصالات نانوذره با نانوذره منجر به افزایش فاصله بین نانوذره‌ها می‌شود و مقاومت الکتریکی CPC تغییر پیدا می‌کند [۴]. زمانی که مولکول‌های آنالیت در ماتریس پلیمری نفوذ می‌کنند باعث تغییر در ساختار سه‌بعدی ذرات رسانا می‌شوند و مقاومت الکتریکی تغییر می‌کند و پس از آن حسگر دوباره در معرض هوای پاک قرار می‌گیرد و مسیر رسانایی مجدداً ایجاد شده و مقاومت الکتریکی به مقدار اولیه خود می‌رسد [۱۴].

از دلایل انتخاب CPCها می‌توان به برگشت‌پذیری خوب آن‌ها و کارایی در دمای اتاق و خطی بودن منحنی پاسخ و ثبات عالی و مصرف کم انرژی آن‌ها اشاره کرد. با این وجود CPCها پاسخ کندی دارند و توانایی شناسایی هم‌زمان بخارهای آلی قطبی و غیرقطبی را ندارند که برای بهبود این پارامترها تحقیقات زیادی صورت گرفته است [۱، ۲]. تحقیقات انجام‌شده نشان می‌دهد که دسترسی به مکان‌های فعال، پارامتر بسیار مهمی در تأثیر بر روی حساسیت و زمان پاسخ است و ایجاد تخلخل و افزایش سطح ویژه برای نفوذ بهتر مولکول‌های آنالیت به زنجیر پلیمر کمک می‌کند تا میزان حساسیت در حسگرهای CPC بالا برود و زمان پاسخ کوتاه‌تر شود.

یکی از روش‌های بهبود نفوذ مولکول‌های آنالیت داخل ماتریس پلیمری افزایش سطح ویژه است. ملاعباسی و همکارانش به بررسی و تحلیل اثر تخلخل کامپوزیت پلیمری رسانای سلولز استات در شناسایی ترکیبات آلی و تشخیص بیماری براساس نشانگرهای زیستی سرطان ریه پرداخته‌اند. در این پژوهش از کامپوزیت پلیمری رسانای سلولز استات با نانولوله کربنی برای تشخیص نشانگرهای زیستی سرطان ریه مانند استون، متانول، ایزوپروپیل الکل، اتانول و آب استفاده شده است. کامپوزیت پلیمری به‌روش جدایی فازی ناشی از تبخیر حلال برای ایجاد تخلخل و افزایش دسترسی مولکول‌های آنالیت به مکان‌های فعال تهیه شده است و آن‌ها دریافتند که ایجاد تخلخل باعث می‌شود کامپوزیت پلیمری سلولز استات با نانولوله کربنی به‌خوبی نشانگرهای زیستی سرطان ریه را تشخیص دهد و همچنین نشان داده شد کامپوزیت پلیمری در برابر بخار ایزوپروپیل الکل بیشترین میزان حساسیت را دارد [۴]. استفاده از روش تولید نانوالیاف توسط الکتروریسی از جمله دیگر روش‌های مورد نظر برای افزایش سطح ویژه فیلم پلیمری است. کامران و همکارانش پلی‌وینیل الکل را با نانوذره اکسیدتیتانیوم به‌صورت نانوالیاف یکنواخت به روش الکتروریسی تولید کردند و پس از استفاده به‌عنوان حسگر شناسایی گاز، در برابر بخارهای دی‌اکسیدکربن، اکسیژن و گاز مایع میزان حساسیت و زمان پاسخ را بررسی کردند و مشاهده کردند نانوالیاف پلی‌وینیل الکل با نانوذره اکسیدتیتانیوم در برابر گاز مایع بیشترین میزان حساسیت و کوتاه‌ترین زمان پاسخ را از خود نشان می‌دهد؛ زیرا وجود نانوذره باعث افزایش رسانایی و نفوذ بهتر بخارات مورد هدف در نانوالیاف می‌شود و در نتیجه حساسیت افزایش می‌یابد [۱۵].

تجمع الکتریکی است. طبق آزمایش‌های انجام‌شده میزان آستانه تجمع برای نانولوله‌های کربنی مورد استفاده در حدود ۳٪ وزنی است. بنابراین برای اطمینان از تشکیل مسیر رسانایی مناسب میزان نانولوله کربنی در ماتریس پلیمری به مقدار ۴٪ وزنی مورد استفاده قرار گرفت.

۲-۳ فرایند الکتروروسی

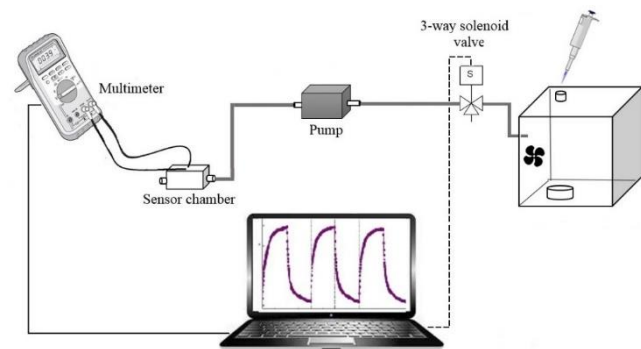
فرایند الکتروروسی توسط دستگاه الکتروروسی نیمه‌صنعتی (محصول شرکت فن‌آوران تجهیزات نانوآزمای) انجام پذیرفت. پارامترهای قابل کنترل شامل دبی تزریق، فاصله نازل تا جمع‌کننده، ولتاژ اعمالی و مدت زمان پاشش بوده است. به‌منظور انجام فرایند ۵ میلی‌لیتر از محلول مورد نظر داخل سرنگ پلاستیکی منتقل شده و توسط سوزن نوک صاف فرایند پاشش انجام می‌گرفت. برای تهیه لایه حساس نهایی فرایند الکتروروسی بر روی الکترودهای شانه‌ای (Interdigitated Electrode) طلا بر روی شیشه انجام پذیرفت.

۲-۴ سامانه اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی

مطابق با شکل ۱ سامانه حسگر گازی مورد استفاده در این پژوهش، شامل ظرف شیشه‌ای مجهز به فن و گرم‌کن، شیر مغناطیسی سه‌طرفه، میکروپمپ و محفظه حسگر است. برای تعیین پاسخ پویای حسگرهای آماده‌شده به غلظت‌های مختلف بخار، مولتی‌متر دیجیتال مورد استفاده قرار گرفت (SANWA, Japan). در این سامانه غلظت مشخصی از بخار آنالیت در مخزن با چکاندن حجم محاسبه‌شده‌ای از قطره مایع آنالیت روی گرم‌کن و سپس تبخیر آن تهیه می‌شود. با در نظر گرفتن هوا و همچنین آنالیت تبخیر شده به‌عنوان گاز ایده‌آل؛ با داشتن جرم مولکولی آنالیت و نسبت مولی بخار آنالیت به هوای داخل مخزن می‌توان مقدار حجم آنالیت مورد نظر از آنالیت هدف برای تهیه غلظت خاص را محاسبه کرد. در این روش تغییرات در مقاومت الکتریکی لایه حساس به‌عنوان تابعی از زمان مشاهده می‌شود [۷]. پاسخ حسگر به‌صورت تغییر مقاومت الکتریکی مستقل از ضخامت فیلم پلیمری و زمان پاسخ از معادله زیر به‌دست می‌آید:

$$R_{REL}(\%) = \frac{R - R_i}{R_i} \times 100 \quad (1)$$

در این رابطه R مقاومت الکتریکی لایه حساس در هر لحظه و R_i مقاومت پایه (در حالت عدم حضور بخار حلال) است. تمام اندازه‌گیری‌ها در دمای محیط انجام شد.



شکل ۱ طرح‌واره سامانه حسگر گاز برای شناسایی ترکیبات آلی فرار
Figure 1 Schematic of the Gas Sensor System for Detection of Volatile Organic Compounds

در این پژوهش هدف تولید لایه حساس کامپوزیت پلیمری رسانا از الیاف نانومتری پلی‌بنزی‌ایمیدازول-نانولوله کربنی است. این پلیمر به‌دلیل داشتن حلقه بنزنی و همچنین گروه‌های N-H قابلیت زیادی برای شناسایی طیف گسترده‌ای از بخارات آلی فرار مانند متانول، اتانول، ایزوپروپیل الکل، استن و آب را خواهد داشت. ضمن اینکه قابلیت الکتروروسی این پلیمر، که در مقالات هم به آن اشاره شده، با توجه به هدف پژوهش از دیگر دلایل انتخاب این پلیمر بوده است. علت استفاده از آنالیت‌های ذکرشده دو مسئله مهم است. استفاده از طیف گسترده‌ای از آنالیت‌ها با قطبیت‌های مختلف که امکان بررسی دقیق رفتار حسگر ساخته‌شده را می‌دهند و از طرف دیگر هدف مقاله تمرکز بر روی شناسایی آنالیت‌هایی است که به‌عنوان زیست‌شناساگرهای بیماری‌های سرطان ریه و دیابت در بازدم افراد استفاده می‌شوند (یعنی خانواده الکل‌ها و استن). از آنجایی که بازدم همواره حاوی مقدار بالایی رطوبت نیز هست، بخار آب نیز در این مجموعه قرار داده شده است. در این فرایند دی‌متیل‌استامید به‌عنوان حلال استفاده شده است. پس از بهینه‌سازی شرایط به‌منظور تهیه الیاف با بهترین ریزساختار و مشخصه‌یابی آن با آزمون‌های FESEM، BET؛ لایه حساس نانوالیاف بر روی الکترودهای شانه‌ای (Interdigitated Electrode) طلا بر روی شیشه تهیه شد. پاسخ لایه حساس تهیه‌شده در مقابل بخارات آنالیت‌های ذکرشده در غلظت‌های مختلف بررسی و پاسخ‌های به‌دست‌آمده توسط مدل‌های ترمودینامیکی تحلیل شد.

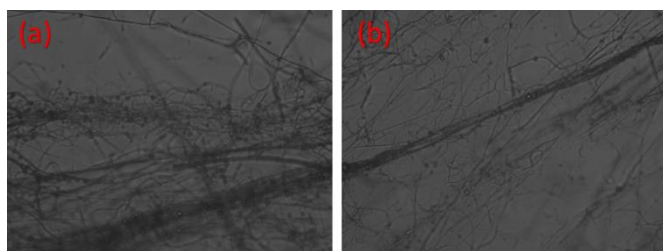
۲ بخش تجربی

۲-۱ مواد

پلیمر مورد استفاده در این پژوهش، پلی‌بنزی‌ایمیدازول (PBI) ($M_w = 18,000 \text{ to } 60,000 \text{ gr.mol}^{-1}$) (Nanochemazone, Canada) بود. به‌منظور انحلال پلیمر از دی‌متیل‌استامید (DMAc) (Sigma Aldrich, Germany) در دمای جوش استفاده شد. افزودنی مورد استفاده برای ایجاد رسانایی الکتریکی در کامپوزیت، نانولوله چندقدره (MWNT) (متوسط قطر ۴۰-۱۰ نانومتر، طول ۲۵-۱ میکرومتر) ساخت شرکت کره‌ای (CNT Co., LTD) از روش رسوب‌گذاری بخار شیمیایی بود. متانول، اتانول، ایزوپروپیل الکل (Sigma Aldrich, Germany)، استون (دکتر مجلی، ایران) به‌عنوان آنالیت مورد استفاده قرار گرفتند.

۲-۲ آماده‌سازی محلول

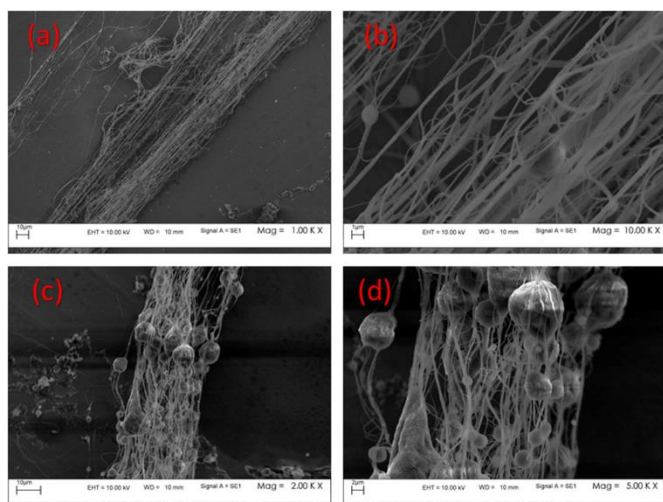
انحلال پلیمر داخل حلال DMAc در نزدیکی دمای جوش حلال در دمای ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد انجام گرفت. به این منظور از سامانه رفلکس و کندانسور داخل حمام روغن و بر روی هیتر استیرر استفاده شد. مدت زمان مورد نیاز برای انحلال کامل پلیمر و به‌دست‌آمدن محلول در حدود ۲۴ ساعت بوده است. غلظت پلیمر در هر کدام از محلول‌ها ۲۰ درصد وزنی است. هم‌چنین در هر نمونه میزان ۰/۸ گرم لیتیوم کلرید به‌منظور پایدار ماندن محلول اضافه شده [۱۶، ۱۷]. در نمونه‌های حاوی نانولوله کربنی، پس از انحلال کامل پلیمر و رسیدن دمای محلول به دمای اتاق، مقدار ۴ درصد وزنی نسبت به وزن پلیمر، نانولوله کربنی به محلول اضافه شده و پس از ۴۸ ساعت اختلاط در دمای محیط بر روی استیرر و سپس ۱۵ دقیقه فراصوت محلول نهایی آماده می‌شد. میزان ترکیب درصد نانولوله کربنی انتخاب شده براساس نظریه



شکل ۳ تصویر میکروسکوپ نوری از الیاف PBI/CNT الکتروریسی شده در شرایط فرایندی مختلف الف) ولتاژ ۲۰ کیلوولت و دبی ۰/۷۵ cc.hr⁻¹ (ب) ولتاژ ۲۴ کیلوولت و دبی ۰/۵ cc.hr⁻¹

Figure 3 Optical microscope image of electrospun PBI/CNT fibers under different processing conditions a) V=20 kV, flow rate = 0.75 V=24 kV, flow rate = 0.5 cc.hr⁻¹, b) cc.hr⁻¹

به منظور بررسی دقیق‌تر، الیاف نهایی به دست آمده را با میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد بررسی قرار دادیم. شکل ۴-ا و b تصویر SEM از نمونه الیاف الکتروریسی شده پلی‌بنزی‌ایمیدازول (در دو بزرگ‌نمایی مختلف) و شکل ۴- c و d تصویر SEM نمونه الکتروریسی شده از نانوکامپوزیت پلی‌بنزی-ایمیدازول/نانولوله کربنی را (در دو بزرگ‌نمایی مختلف) نشان می‌دهد.



شکل ۴ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از الیاف PBI خالص و PBI/CNT الکتروریسی شده در دو بزرگ‌نمایی مختلف

Figure 4 Scanning electron microscope image of pure PBI fibers and PBI/CNT electrospun at two different magnifications

همان‌گونه که در تصاویر مشخص است نمونه الکتروریسی شده حاوی نانولوله‌های کربنی از یکنواختی کم‌تری برخوردار است و میزان دانه گره‌های موجود در این نمونه بیشتر است. این مسئله با توجه به حضور نانولوله‌های کربنی که با سطح ویژه بسیار زیاد خود امکان توزیع و پخش کاملاً یکنواخت در ماتریس پلیمر را نداشته‌اند (با وجود اختلاط ۴۸ ساعته و استفاده از فراصوت پروبی برای بهبود اختلاط) منجر شده است. اما در مجموع الیاف کامپوزیتی به دست آمده کیفیت نسبتاً مطلوبی برای استفاده به عنوان لایه حساس حسگر را داشته‌اند. همچنین تصاویر SEM نشان می‌دهد که قطر الیاف در ناحیه بدون دانه کمتر از ۱۰۰ نانومتر است.

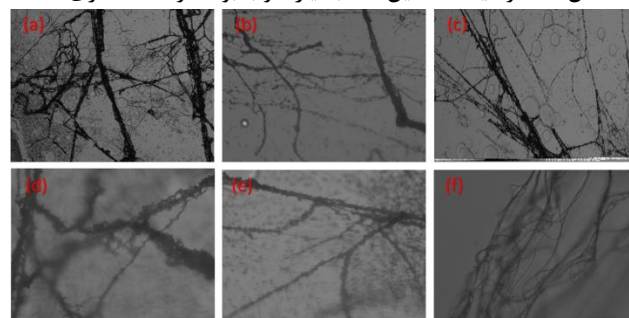
سطح ویژه لایه حساس یکی از عوامل بسیار مؤثر بر رفتار حسگرهای شیمیایی محسوب می‌شود. به‌طور کلی، سطح ویژه جامد، سطح قابل دسترس در واحد جرم آن است. نتایج آزمون BET برای الیاف نانوکامپوزیتی

۲-۵ مشخصه‌یابی الیاف پلیمری

برای بررسی ریزساختار فیلم‌های کامپوزیتی تهیه شده، از میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل MIRA3 ساخت شرکت TESCAN جمهوری چک استفاده شده است. به منظور اندازه‌گیری میزان سطح ویژه الیاف به دست آمده و توزیع حفره‌ها از دستگاه Belsorp-mini II شرکت MicrotracBEL Corp ژاپن استفاده شد. قبل از انجام این آزمون نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت تحت دمای محیط و خلأ گاززدایی شدند. در طول این آزمون از گاز نیتروژن به عنوان گاز جذب و واجذب استفاده شد.

۳ بحث و نتایج

در ابتدا با تغییر شرایط فرایندی تلاش شد تا بتوانیم الیاف پیوسته را از فرایند الکتروریسی تولید کنیم. همان‌طور که بیان شد پارامترهای دبی، ولتاژ و فاصله نازل تا جمع‌کننده را به عنوان متغیرهای اصلی در نظر داشته‌ایم [۱۷]. در این میان آزمون‌های اولیه نشان داد که فاصله تأثیر زیادی بر شکل‌گیری الیاف ندارد و فاصله نازل تا جمع‌کننده برابر ۱۵ سانتی‌متر و ثابت در نظر گرفته شد. شکل ۲ تصویر میکروسکوپ نوری نمونه‌های الکتروریسی شده در شرایط مختلف را نشان می‌دهد. شکل ۲-ا در شرایط ولتاژ ۲۳ کیلوولت و دبی ۱ cc.hr⁻¹ که همان‌طور که مشخص است الیاف دانه بسیار زیادی داشت. دومین الکتروریسی با ولتاژ ۱۵ و دبی ۰/۱۵ cc.hr⁻¹ (شکل ۲-ب)، سومین الکتروریسی را با ولتاژ ۲۰ کیلوولت و دبی ۰/۱۵ cc.hr⁻¹ (شکل ۲-ج)، چهارمین الکتروریسی با ولتاژ ۲۰ کیلوولت و دبی ۰/۲۵ cc.hr⁻¹ (شکل ۲-د)، پنجمین الکتروریسی با ولتاژ ۲۰ کیلوولت و دبی ۰/۵ cc.hr⁻¹ (شکل ۲-ه) و در آخر ششمین الکتروریسی با ولتاژ ۲۰ کیلوولت و دبی ۰/۷۵ cc.hr⁻¹ انجام شد (شکل ۲-ف) و الیاف تشکیل شده بسیار خوب بودند و دانه کمتری داشتند.

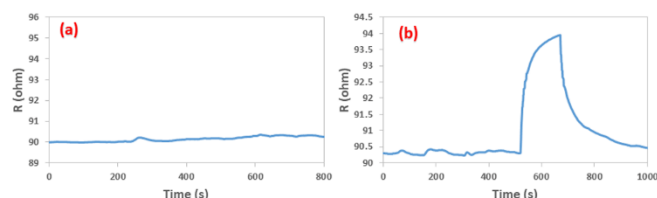


شکل ۲ تصویر میکروسکوپ نوری از الیاف پلی‌بنزی‌ایمیدازول الکتروریسی شده در شرایط فرایندی مختلف

Figure 2 Optical microscope image of electrospun polybenzimidazole fibers under different processing conditions

همان‌طور که مشخص است نمونه شماره ۶ (شکل ۲-ف) بهترین لیف را از نظر یکنواختی و کم‌ترین میزان دانه به دست آورده است. این نمونه و شرایط فرایندی می‌تواند به عنوان شروعی برای الکتروریسی نمونه‌های کامپوزیتی به کار برود. برای نمونه‌های کامپوزیتی و با افزودن نانولوله کربنی نیز شرایط فرایندی مختلفی آزموده شد که به عنوان نمونه دو مورد از آن در شکل ۳ آورده شده است. شکل ۳-ا در شرایط ولتاژ ۲۰ کیلوولت و دبی ۰/۷۵ cc.hr⁻¹ و شکل ۳-ب در شرایط ولتاژ ۲۴ کیلوولت و دبی ۰/۵ cc.hr⁻¹ انجام شده است. همان‌طور که دیده می‌شود در حالت دوم الیاف کامپوزیتی یکنواختی به دست آمده است.

ماتریس با قطع مسیرهای رسانایی سبب تغییر مقاومت الکتریکی می‌شود [۱۸-۲۰]. در لایه حساس متراکم نفوذ مولکول‌های بخار در ماتریس پلیمر به سختی اتفاق می‌افتد و با توجه به ضخامت بالای آن دسترسی به مکان‌های فعال مشکل است. اما در نمونه الکتروروسی شده با توجه به افزایش شدید سطح ویژه ($18/23 \text{ m}^2.\text{gr}^{-1}$) در مقایسه با کمتر از $0/1 \text{ m}^2.\text{gr}^{-1}$ برای نمونه متراکم) نفوذ و دسترسی به مکان‌های فعال به شدت افزایش می‌یابد و همین مسئله باعث می‌شود تا در زمان‌های برابر شدت پاسخ نمونه الکتروروسی شده به مقدار بسیار چشمگیری افزایش یابد.

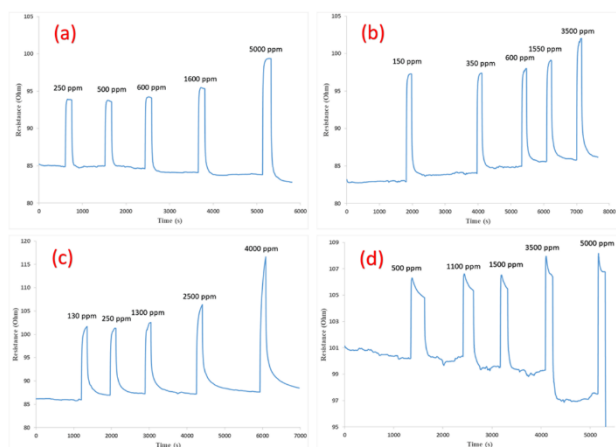


شکل ۵ پاسخ (الف) لایه حساس متراکم PBI/CNT و (ب) لایه حساس

الکتروروسی شده PBI/CNT در مقابل غلظت ۱۰۰ ppm از بخار استون

Figure 5 Response of a) Dense sensitive layer of PBI/CNT and b) Electrospun sensitive layer of PBI/CNT to 100 ppm concentration of acetone vapor

به‌منظور بررسی بهتر و بیشتر رفتار لایه حساس نانوکامپوزیتی الکتروروسی شده، پاسخ پویای آن در مقابل غلظت‌های مختلف آنالیت‌های هدف مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۶ نشان‌دهنده پاسخ پویای این حسگر در مقابل غلظت‌های مختلف از بخار متانول، اتانول، IPA و آب است.



شکل ۶ پاسخ پویای حسگر نانوکامپوزیت رسانای الکتروروسی شده در مقابل

غلظت‌های مختلف بخار (a) متانول، (b) اتانول، (c) IPA و (d) آب

Figure 6 Dynamic response of the electrospun conductive nanocomposite sensor to different concentrations of a) methanol, b) ethanol, c) IPA, and d) water vapor

همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، هنگامی که لایه حساس در معرض بخارات آنالیت قرار می‌گیرد، مقاومت الکتریکی آن به‌طور ناگهانی افزایش می‌یابد. این افزایش ناگهانی ناشی از نفوذ و جذب مولکول‌های آنالیت به درون لایه کامپوزیتی الکتروروسی شده و جذب آن‌ها در میان زنجیره‌های پلیمری و سطح نانولوله‌های کربنی است. جذب این مولکول‌ها باعث تورم ماتریس پلیمری، افزایش انعطاف‌پذیری موضعی زنجیره‌های پلیمری در ناحیه فصل مشترک میان پلیمر و نانولوله‌های کربنی و در نتیجه اختلال در ساختار شبکه

به‌دست‌آمده نشان‌دهنده سطح ویژه $18/23 \text{ m}^2.\text{gr}^{-1}$ است که در مقایسه با مقادیر گزارش شده در منابع برای سطح ویژه فیلم متراکم (کمتر از $\text{m}^2.\text{gr}^{-1}$) $0/1$ [۱] نشان‌دهنده بهبود چشمگیر سطح ویژه در اثر ایجاد تخلخل در زمینه پلیمر بود. این میزان سطح ویژه منجر به بهبود فرایند نفوذ و جذب مولکول‌های آنالیت در داخل لایه حساس و در نتیجه بهبود حساسیت و زمان پاسخ آن خواهد شد.

به‌منظور بررسی رفتار لایه حساس الکتروروسی شده از جنس کامپوزیت رسانای پلیمری، رفتار تغییرات مقاومت الکتریکی این لایه‌ها در حضور آنالیت‌های مختلف مورد مطالعه قرار داده شد. پلی‌بنزی‌ایمیدازول پلیمر بسیار جذاب برای استفاده به‌عنوان لایه حساس حسگر گاز است. این پلیمر دارای گروه‌های عاملی آمینی در کنار حلقه‌های بنزنی است که باعث می‌شود برای شناسایی بخارات مختلف مستعد شود. از طرف دیگر با وجود قطبیت بسیار زیاد به‌دلیل پیوندهای هیدروژنی بسیار زیاد درون مولکولی امکان انحلال در آب ندارد. پس با این شرایط بررسی پاسخ آن در مقابل بخارات مختلف با قطبیت‌های مختلف بسیار جذاب است. هم‌چنین امکان الکتروروسی این پلیمر نیز باعث می‌شود تا بتوان از آن لایه حساس از جنس لیف‌های نانومتری با سطح ویژه بالا تولید کرد.

شکل ۵ رفتار تغییر مقاومت الکتریکی لایه‌های متراکم (لایه‌نشانی شده به‌صورت قطره‌ای (drop casting) بر روی الکتروده شانه‌ای) و الکتروروسی شده را در مقابل غلظت ۱۰۰ ppm (بخش بر میلیون) از بخار استون به‌عنوان نمونه نشان می‌دهد. الکتروده شانه‌ای استفاده شده محصول شرکت DropSens با الکترودهای طلا بر روی شیشه شامل ۳۲ جفت شانه با فاصله ۱۰ میکرومتر است و به‌عنوان زمینه برای حسگر گازی به‌کار می‌رود. برای این منظور الکتروده شیشه‌ای بر روی جمع‌کننده دستگاه الکتروروسی چسبانده شد. به‌منظور جلوگیری از ایجاد لیاف بر روی پایه الکتروده، پایه‌های الکتروده با کاغذ پوشانده شدند. سپس طبق شرایط گفته شده در بخش تجربی الکتروروسی به مدت ۱ دقیقه انجام گرفت. پس از اتمام کار به سرعت الکتروده بر روی هیتر دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت تا حلال باقی مانده تبخیر و ساختار لیاف بر روی شیشه تثبیت شود.

نتایج به‌دست‌آمده نشان‌دهنده عدم پاسخ لایه متراکم به غلظت ۱۰۰ ppm از بخار هدف است. در ادامه حسگر گاز کامپوزیتی الکتروروسی شده در معرض بخارات استون در همان غلظت قرار گرفته و همان‌طور که مشاهده می‌شود پاسخ مناسبی در برابر این غلظت از خودش نشان می‌دهد. هم‌چنین همان‌طور که مشخص است شکل رفتار پاسخ کاملاً برگشت پذیر است؛ به‌گونه‌ای که با قرارگیری لایه حساس در معرض بخار هدف، مقاومت الکتریکی افزایش یافت و با قطع جریان بخار و قرارگیری لایه حساس در معرض هوای پاک مقاومت الکتریکی به مقدار پایه برگشته است.

علت این پدیده را باید در امکان نفوذ مولکول‌های بخار در لایه حساس و امکان دسترسی به مکان‌های فعال بررسی کرد. در لایه حساس‌های کامپوزیت پلیمری محل اتصال فاز رسانا و پلیمر (در اینجا نانولوله‌های کربنی و زنجیره‌های PBI) و هم‌چنین سطح نانولوله‌های کربنی مکان‌های فعالی هستند که با جذب مولکول‌های شناساگر بر روی آن‌ها امکان تغییر مقاومت الکتریکی پدید می‌آید. هم‌چنین جذب مولکول‌های بخار در ماتریس پلیمری و تورم

برای بررسی بهتر و اطمینان از روند پاسخ‌ها در غلظت پایین پاسخ حسگر تهیه‌شده را در مقابل غلظت ۱۰۰ ppm از بخارات مختلف به‌صورت مستقل و جداگانه اندازه‌گیری کردیم. شکل ۷-b پاسخ پویای این حسگر در مقابل غلظت ۱۰۰ ppm از بخارات متانول، اتانول، IPA، بخار آب و استن را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشخص است روند پاسخ به‌صورت زیر است:

$$A_{R,IPA} > A_{R,Acetone} > A_{R,Ethanol} > A_{R,Methanol} > A_{R,Water}$$

میزان حساسیت حسگرهای کامپوزیت رسانای پلیمری در مقابل آنالیت‌های مختلف به پارامترهای مختلفی از جمله اندازه مولکول نفوذکننده، برهم‌کنش ترمودینامیکی بین پلیمر و کوچک‌مولکول نفوذکننده، ضریب دی‌الکتریک آنالیت و غیره وابسته است [۲۰، ۲۴]. یکی از پارامترهای بسیار مهم برای تحلیل و پیش‌بینی میزان شدت پاسخ حسگرهای پلیمری، برهم‌کنش بین پلیمر و کوچک‌مولکول مورد نظر است. هرچه میزان برهم‌کنش بین پلیمر و مولکول‌های بخار بیشتر باشد حلالیت مولکول جذب‌شده و مایع‌شده در لایه حساس بیشتر می‌شود. در این حالت امکان تورم زمینه پلیمری و در نتیجه برهم خوردن شبکه رسانایی که منجر به افزایش مقاومت الکتریکی می‌شود، بیشتر می‌شود. این پدیده باعث افزایش شدید مقاومت الکتریکی فیلم پلیمری می‌شود که به‌عنوان پاسخ لایه حساس اندازه‌گیری می‌شود. یکی از پارامترهای متداول بیان‌کننده میزان برهم‌کنش بین پلیمر و حلال پارامتر برهم‌کنش فلوری-هاگینز است که به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$\chi_{12} = \frac{V_M(\delta_P - \delta_S)^2}{RT} \quad (2)$$

در این رابطه V_M ، R ، T ، δ_P و δ_S به‌ترتیب بیانگر حجم مولی حلال، ثابت جهانی گازها، دمای مطلق، پارامتر حلالیت هیلدبراند حلال و پارامتر حلالیت هیلدبراند پلیمر است. در جدول ۱ مشخصات پلیمر و مولکول‌های آنالیت مورد نظر و همچنین پارامتر برهم‌کنش فلوری-هاگینز محاسبه و ارائه شده است [۲۵، ۲۶].

جدول ۱ مشخصات فیزیکی حلال‌ها و پلیمر و پارامتر برهم‌کنش محاسبه‌شده

Table 1 Physical properties of the solvents and polymer, and the calculated interaction parameters

	V_M (cm ³ /mol)	δ (J/cm ³) ^{1/2}	χ_{12}
IPA	76.4	23.6	0.06
Ethanol	58.3	26.4	0.40
Methanol	40.5	29.6	0.88
Acetone	63.8	19.9	0.14
Water	18.0	47.8	4.71
PBI	-	22.2	-

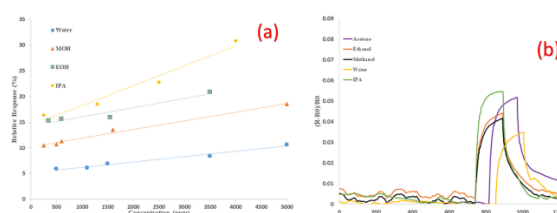
نتایج جدول نشان‌دهنده روند زیر برای تغییرات پارامتر برهم‌کنش فلوری-هاگینز است:

$$\chi(PBI-IPA) < \chi(PBI-Acetone) < \chi(PBI-Ethanol) < \chi(PBI-Methanol) < \chi(PBI-Water)$$

هرچه پارامتر برهم‌کنش فلوری-هاگینز به صفر نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده برهم‌کنش بهتر بین دو جزء است و هرچه بزرگ‌تر باشد، بیانگر تنفر نسبی بیشتر بین پلیمر و حلال است. نتایج جدول ۱ نشان می‌دهد که بیشترین تمایل و برهم‌کنش بین PBI و IPA و سپس با استن است و این میزان تمایل از اتانول به متانول و آب کاهش می‌یابد. بنابراین همان‌طور که مشاهده

سه‌بعدی رسنا درون پلیمر می‌شود. پیامد این فرایند، افزایش فاصله بین نانولوله‌های کربنی و در پی آن، افزایش مقاومت الکتریکی کامپوزیت خواهد بود [۲۱، ۲۲]. این پدیده کاملاً برگشت‌پذیر است؛ به‌گونه‌ای که با قرار گرفتن مجدد لایه حساس در معرض هوای پاک، مولکول‌های آنالیت از سطح لایه حساس و لابلای زنجیرهای پلیمری جدا شده و ساختار رسنا بازسازی می‌شود و مقاومت الکتریکی به مقدار اولیه خود بازمی‌گردد. با این حال، در برخی موارد، این بازگشت‌پذیری کامل نیست که ممکن است ناشی از گیرافتادن مولکول‌های آنالیت درون ماتریس پلیمری به‌دلیل برهم‌کنش آن‌ها با سطح نانولوله‌ها یا پلیمر باشد. برای بهبود این فرایند، روش‌هایی مانند افزایش دمای لایه حساس به‌منظور تسریع واجذب آنالیت پیشنهاد شده است [۲۳]. با توجه به منحنی‌های رسم شده می‌توان مشاهده کرد که زمان پاسخ (مدت زمان رسیده به ۹۰٪ مقاومت الکتریکی بیشینه) حسگرهای تهیه‌شده در غلظت‌های مختلف کمتر از ۱۰ ثانیه است. زمان پاسخ به‌دست‌آمده مقدار بسیار مناسب و قابل‌قبولی است و علت این کاهش شدید زمان پاسخ به ساختار الکترونیسی‌شده الیاف که به‌عنوان لایه حساس استفاده شده‌اند مربوط است. این ساختار با سطح ویژه بسیار زیاد خود نفوذ و جذب مولکول‌های آنالیت در ماتریس پلیمری را بهبود می‌بخشد و سبب جذب سریع مولکول‌ها بر روی مکان فعال لایه حسگر می‌شود. این امر زمان پاسخ حسگر را به شدت کاهش می‌دهد.

برای بررسی دقیق‌تر رفتار پاسخ حسگر تهیه شده و به‌دست آوردن میزان حساسیت آن در مقابل بخارات مختلف باید پاسخ این حسگر در برابر غلظت‌های مختلف از بخارات هدف (با توجه به داده‌های شکل ۶) مقایسه شود. شکل ۷-a منحنی حساسیت و انتخاب‌پذیری لایه حساس نانوکامپوزیتی رسانای الکترونیسی‌شده را در مقابل غلظت‌های مختلف بخار خانواده الکل‌ها و آب نشان می‌دهد و شکل ۷-b منحنی مقایسه پاسخ این لایه حساس در مقابل غلظت ۱۰۰ ppm از بخارات متانول، اتانول، IPA، آب و استن را نشان داده است.



شکل ۷ الف) منحنی حساسیت و انتخاب‌پذیری لایه حساس نانوکامپوزیتی

رسانای الکترونیسی‌شده (ب) مقایسه پاسخ لایه حساس در مقابل غلظت ۱۰۰ ppm از بخارات متانول، اتانول، IPA، آب، و استن

Figure 7 a) Sensitivity and selectivity curve of the electrospun conductive nanocomposite sensitive layer. b) Comparison of the sensitive layer response to a concentration of 100 ppm of methanol, ethanol, IPA, water, and acetone vapors

همان‌طور که در شکل ۷-a مشخص است شدت پاسخ حسگر ساخته‌شده در تمامی غلظت‌ها برای IPA بیشترین مقدار را نشان می‌دهد و برای آب کم‌ترین مقدار است. در واقع روند شدت پاسخ در برابر آنالیت‌های مختلف به شکل زیر است:

$$A_{R,IPA} > A_{R,Ethanol} > A_{R,Methanol} > A_{R,Water}$$

8. Aroutiounian V.M., Metal oxide gas sensors decorated with carbon nanotubes, *Lithuanian Journal of Physics*, 55, 2015.
9. Mirzaei A., Leonardi S., Neri G., Detection of hazardous volatile organic compounds (VOCs) by metal oxide nanostructures-based gas sensors: A review, *Ceramics International*, 42, 15119-15141, 2016.
10. Albert K.J., Lewis N.S., Schauer C.L., Sotzing G.A., Stitzel S.E., Vaid T.P., Walt D.R., Cross-reactive chemical sensor arrays, *Chemical Reviews*, 100, 2595-2626, 2000.
11. Bai H., Shi G., Gas sensors based on conducting polymers, *Sensors*, 7, 267-307, 2007.
12. Castro M., Lu J., Bruzaud S., Kumar B., Feller J.-F., Carbon nanotubes/poly(ϵ -caprolactone) composite vapour sensors, *Carbon*, 47, 1930-1942, 2009.
13. Qi H., Liu J., Pionteck J., Pötschke P., Mäder E., Carbon nanotube-cellulose composite aerogels for vapour sensing, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 213, 20-26, 2015.
14. Bouvree A., Feller J.-F., Castro M., Grohens Y., Rinaudo M., Conductive polymer nano-biocomposites (CPC): chitosan-carbon nanoparticle a good candidate to design polar vapour sensors, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 138, 138-147, 2009.
15. Khan K.-u.-H., Masroor S., Rizvi G., Electrospinning and electrospun based polyvinyl alcohol nanofibers utilized as filters and sensors in the real world, *Journal of Polymer Engineering*, 43(7), 627-639, 2023.
16. Jahangiri S., Aravi İ., Işık Şanlı L., Menciloğlu Y.Z., Özden-Yenigün E., Fabrication and optimization of proton conductive polybenzimidazole electrospun nanofiber membranes, *Polymers for Advanced Technologies*, 29, 594-602, 2018.
17. Anandhan S., Ponrapakaran K., Senthil T., George G., Parametric study of manufacturing ultrafine polybenzimidazole fibers by electrospinning, *International Journal of Plastics Technology*, 16, 101-116, 2012.
18. Soleimani E., Aghamiri S.F., Molla-Abbasi P., Shabanian M., Tuning the polymer-graphene interfaces by picric acid molecules to improve the sensitivity of a prepared conductive polymer composite gas detector, *Iranian Polymer Journal*, 1-10, 2020.
19. Noormohammad A., Molla-Abbasi P., An analytical investigation on the effect of porous conductive cellulose acetate composite morphology on the detection of organic compounds, *Polymer Engineering & Science*, 60, 1631-1641, 2020.
20. Molla-Abbasi P., Ghaffarian S.R., Dashtimoghdam E., Wrapping carbon nanotubes by biopolymer chains: role of nanointerfaces in detection of vapors in conductive polymer composite transducers, *Polymer Composites*, 37, 2803-2810, 2016.
21. Castro M., Kumar B., Feller J.-F., Lu J., Haddi Z., Amari A., Bouchikhi B., Novel e-nose for the discrimination of volatile organic biomarkers with an array of carbon nanotubes (CNT) conductive polymer nanocomposites (CPC) sensors, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 159, 213-219, 2011.
22. Nag S., Sachan A., Castro M., Choudhary V., Feller J., Spray layer-by-layer assembly of POSS functionalized CNT quantum chemoresistive sensors with tuneable selectivity and ppm resolution to VOC biomarkers, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 222, 362-373, 2016.
23. Danesh E., Molina-Lopez F., Camara M., Bontempi A., Quintero A.V., Teyssieux D., Thierry L., Briand D., de Rooij N.F., Persaud K.C., Development of a new generation of ammonia sensors on printed polymeric hotplates, *Analytical Chemistry*, 86, 8951-8958, 2014.
24. Kumar B., Feller J.-F., Castro M., Lu J., Conductive bio-polymer nanocomposites (CPC): chitosan-carbon nanotube transducers assembled via spray layer-by-layer for volatile organic compound sensing, *Talanta*, 81, 908-915, 2010.
25. Hansen C.M., Hansen solubility parameters: a user's handbook, CRC Press, 2007.
26. Kumar B., Castro M., Feller J.-F., Poly(lactic acid)-multi-wall carbon nanotube conductive biopolymer nanocomposite vapour sensors, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 161, 621-628, 2012.

می‌شود روند نشان‌داده‌شده توسط پارامتر برهم‌کنش فلوری-هاگینز به‌طور کامل روند تغییرات پاسخ حسگر را توجیه می‌کند.

نتایج به دست‌آمده نشان‌دهنده قابلیت بسیار خوب لایه حساس الکتروریسی شده در شناسایی بخارات آلی فرار است. همچنین این نتایج بیانگر تأثیر چشمگیر فرایند الکتروریسی بر زمان پاسخ و شدت پاسخ لایه حساس ساخته شده است که با توجه به توسعه فرایند الکتروریسی در مقیاس‌های آزمایشگاهی، نیمه‌صنعتی و صنعتی امکان استفاده از این تکنیک در ساخت لایه حساس را به عنوان روش کارآمد تضمین می‌کند.

۴ نتیجه‌گیری

در این پژوهش لایه حساس حسگر کامپوزیت رسانای پلیمری برپایه پلی-بنزیلیمیدازول و نانولوله کربنی ساخته شده است. علت استفاده از این پلیمر ساختار شیمیایی آن برای پاسخ به مولکول‌های غیرقطبی بوده است. به‌منظور ساخت لایه حساس از روش الکتروریسی استفاده شده و شرایط بهینه با میزان دبی 0.5 cc.hr^{-1} و ولتاژ 24 کیلوولت و فاصله نازل تا جمع‌کننده 15 سانتی-متر برای تولید الیاف پیوسته به‌دست آمد. ساختار الیاف با استفاده از میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی مطالعه شد که تشکیل الیاف با قطر حدود 100 نانومتر را نشان داده است. با استفاده از آزمون BET میزان سطح ویژه الیاف اندازه‌گیری شد که مقدار آن $18/23 \text{ m}^2.\text{gr}^{-1}$ است. این میزان سطح ویژه تأثیر بسیار زیادی بر فرایند نفوذ و جذب آنالیت بر روی لایه حساس پلیمری خواهد داشت. این مسئله سبب شده تا زمان پاسخ حسگرهای ساخته در حدود کمتر از 10 ثانیه باشد. همچنین میزان حساسیت لایه کامپوزیتی ساخته‌شده در مقابل بخارات IPA، اتانول، متانول، استون و بخار آب اندازه‌گیری شد که نشان‌دهنده بیشترین میزان پاسخ در مقابل IPA و استون و کم‌ترین میزان شدت پاسخ در مقابل بخار آب بوده است. این روند پاسخ براساس میزان برهم‌کنش بین پلیمر و مولکول‌های آنالیت که با استفاده از تئوری فلوری-هاگینز بررسی شد تحلیل شده است.

مراجع

1. Danesh E., Ghaffarian S.R., Molla-Abbasi P., Non-solvent induced phase separation as a method for making high-performance chemiresistors based on conductive polymer nanocomposites, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 155, 562-56, 2011.
2. Wang X., Li Y., Pionteck J., Zhou Z., Weng W., Luo X., Qin Z., Voit B., Zhu M., Flexible poly(styrene-butadiene-styrene)/carbon nanotube fiber based vapor sensors with high sensitivity, wide detection range, and fast response, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 256, 896-904, 2018.
3. Yamazoe N., Shimanoe K., New perspectives of gas sensor technology, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 138, 100-107, 2009.
4. Noormohammad A., Molla-Abbasi P., An analytical investigation on the effect of porous conductive cellulose acetate composite morphology on the detection of organic compounds, *Polymer Engineering & Science*, 60, 1631-1641, 2020.
5. Gardner J.W., Bartlett P.N., Sensors and sensory systems for an electronic nose, *Springer*, 1992.
6. Arshak K., Moore E., Lyons G.M., Harris J., Clifford S., A review of gas sensors employed in electronic nose applications, *Sensor Review*, 24, 181-198, 2004.
7. Molla-Abbasi P., Shabanian M., A bulky aromatic functional polyimide composite as a sensitive layer for the detection of organic compound biomarkers, *Iranian Polymer Journal*, 28, 203-211, 2019.