

تهیه حسگر گازی مقاومت شیمیایی بر پایه گرافن اکسید عامل‌دار شده برای آشکارسازی 4،2-دی‌نیترو تولوئن

محمد کوچکی*، امین گراوند و سعید منزوی

دانشگاه جامع امام حسین(ع)، دانشکده علوم پایه

(تاریخ دریافت: 1397/7/14 تاریخ پذیرش: 1398/11/13)

تحقیق و پژوهش در زمینه آشکارسازی مواد منفجره، با توجه به افزایش استفاده از این مواد در حملات تروریستی رو به گسترش می‌باشد. در این مقاله حسگر مقاومت شیمیایی الکتروکود شانه‌ای بر پایه گرافن اکسید عامل‌دار شده با 2،2،3،3،4،4،5-اکتافلورو-6،1-هگزان‌دی‌ال ارائه شده است و پاسخ آن به 4،2-دی‌نیترو تولوئن (DNT) مورد بررسی قرار گرفته است. پاسخ حسگر با افزودن لایه ثانوی پوشش دهنده بر روی حسگر گرافن اکسید عامل‌دار شده، افزایش حساسیت و گزینش‌پذیری قابل توجهی را از خود نشان داد. گستره پاسخ خطی برای DNT، 91/8-918 ppb تا حد تشخیص 91/8 ppb به دست آمد. انحراف استاندارد نسبی برای 3 بار تکرارپذیری پاسخ حسگر نیز مقدار 6/09 درصد محاسبه شد.

کلید واژه: گرافن اکسید، مواد منفجره، آشکارسازی، حسگر گازی، مقاومت شیمیایی، دی‌نیترو تولوئن

مقدمه

جاذب، مقدار رسانایی آن‌ها می‌باشد. با توجه به رسانایی بسیار زیاد گرافن (10^6 v s cm^{-2})، در این تحقیق، از گرافن اکسید کاهیده- شده به عنوان لایه جاذب استفاده شده است. بدین منظور، ابتدا نانوصفات گرافن اکسید از طریق اکسایش گرافیت تهیه شد. نانوصفات گرافن اکسید دارای تعداد زیادی گروه‌های عاملی هیدروکسیل، اپوکسی و کربونیل است که سبب خصلت آبدوستی گرافن اکسید می‌شود. از طرف دیگر، حضور این گروه‌های عاملی اکسیژن‌دار باعث تبدیل کرین مسطح sp^2 موجود در گرافیت به کرین sp^3 می‌شود [19 و 20] که منجر به از بین رفتن پیوستگی الکترونیکی پیوندهای π و به دنبال آن، کاهش هدایت الکترونیکی گرافن اکسید می‌گردد. علاوه بر این، حضور گروه‌های عاملی اکسیژن‌دار موجب ناپایداری حرارتی و تجزیه آن در دماهای بالا می‌شود [21 و 22]. هدایت الکترونیکی و پایداری حرارتی گرافن اکسید با کاهش دوباره آن برگشت‌پذیر است [23 و 24]. میزان هدایت الکترونیکی گرافن اکسید کاهیده‌شده به نوع روش، مدت زمان و دمای کاهش بستگی دارد [25، 21 و 26]. گروه‌های عاملی اکسیژن‌دار در طول زمان کاهش حذف و باعث کاهش قابلیت پراکندگی گرافن اکسید در حلال‌های مختلف می‌شود. در این تحقیق گرافن اکسید به طور همزمان با 2،2،3،3،4،4،5-اکتافلورو-6،1-هگزان‌دی‌ال عامل‌دار و با حرارت کاهیده و سپس پاسخ آن‌ها استفاده از حسگر مقاومت شیمیایی برای آشکارسازی DNT مورد بررسی گرفت.

بخش تجربی

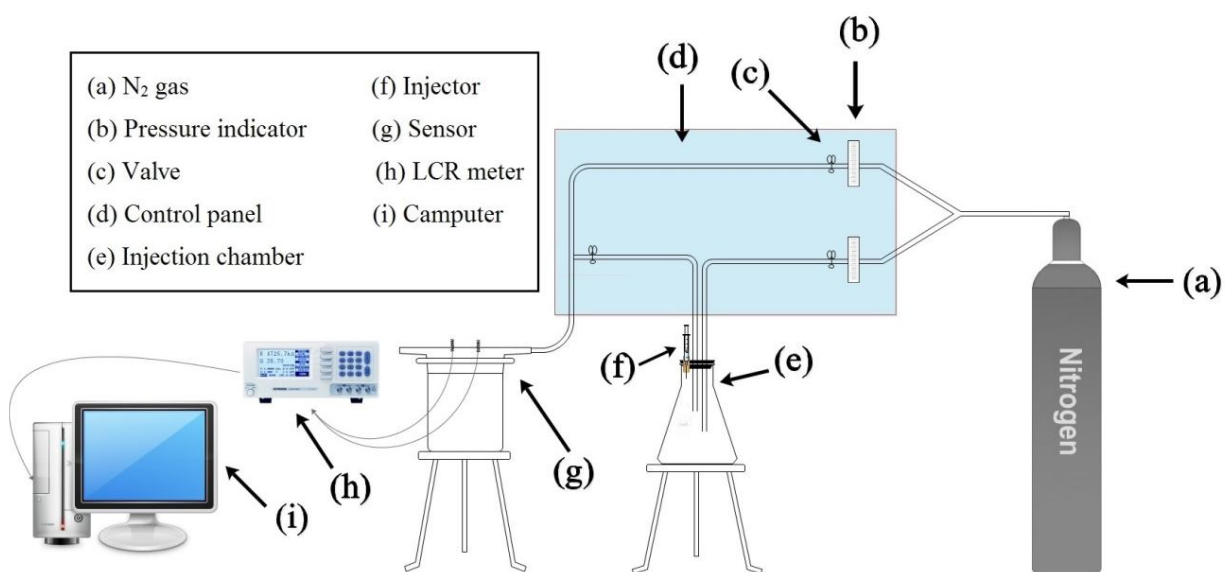
مواد و دستگاه‌ها

گرافیت ورقه‌ای (flake) با اندازه ذرات 100 مش، 4،2-دی-نیترو تولوئن (DNT)، پتاسیم پرمنگنات (95%)، باریم کلرید (96%)، سدیم نیترات (99%) و نقره نیترات (65%) از سیگما آلدريج، سولفوریک اسید (97%)، آب اکسیژنه (30%) و هیدروکلریک اسید (37%) از شرکت مرک، اتانول (99%) از شرکت شیمیایی کانتو و استون (99%) از شرکت شیمی ناب خریداری شد. از دستگاه FT-IR مدل Spectrum 100 شرکت Perkin Elmer Precisely و دستگاه LCR Meter مدل GPS-B3135 استفاده شد.

استفاده روزافزون از مواد منفجره توسط گروه‌های نظامی، تروریست‌ها و قابلیت حمل آسان آن در وسایل نقلیه، بسته‌های پستی و وسایل مسافران، سبب آغاز پژوهش‌های گسترده در زمینه آشکارسازی مواد منفجره توسط دستگاه‌های امنیتی در سراسر جهان شده است [1]. آشکارسازی مواد منفجره با توجه به فشار بخار پایین آن‌ها با مشکلات جدی روبرو است. روش‌های آشکارسازی مواد منفجره به دو دسته توده‌ای و مقادیر بسیار کم تقسیم بندی می‌شوند [2]. در این مقاله، پژوهش بر روی آشکارسازی مقادیر بسیار کم مواد منفجره انجام گرفته است. از جمله روش‌های آشکارسازی موجود برای مقادیر بسیار کم مواد منفجره می‌توان به روش‌های الکترونیکی-شیمیایی [3]، روش‌های نوری [4]، حسگرهای زیستی [5] و حیوانی [6] اشاره کرد. از جمله روش‌های الکترونیکی-شیمیایی می‌توان به طیفسنجی تحریک یونی (IMS) [7]، نورتابی شیمیایی (CL) [8]، طیفسنجی رامان [9]، طیفسنجی جرمی [10]، حسگرهای جرمی [11]، حسگرهای الکتروشیمیایی و حسگرهای مقاومت شیمیایی [12] اشاره کرد. از بین حسگرهای موجود، حسگرهای مقاومت شیمیایی به علت ویژگی‌هایی از قبیل قابلیت حمل آسان، حساسیت و دقت بالا و کم هزینه بودن، از جمله روش‌های نوین برای آشکارسازی مقادیر بسیار کم مواد منفجره محسوب می‌شوند [13]. حسگرهای مقاومت شیمیایی از سه قسمت اصلی بستر، الکتروکود شانه‌ای (شکل 1) و لایه جاذب تشکیل شده‌اند که می‌توان از لایه‌های کمکی نیز جهت افزایش حساسیت و گزینش‌پذیری آن استفاده کرد [14]. اساس کار این حسگرها، بر پایه جنب سطحی گونه مورد نظر بر روی لایه جاذب می‌باشد که سبب تغییر مقاومت الکتروکود می‌شود. از جمله مواد استفاده شده به عنوان لایه جاذب برای آشکارسازی مواد منفجره در این حسگرها می‌توان به نانولوله‌های کربنی [15]، گرافن [16]، پلیمرهای رسانا [17] و اکسید فلزات [18] اشاره کرد. در این پژوهش، از عامل‌دار کردن گرافن اکسید با 2،2،3،3،4،4،5-اکتافلورو-6،1-هگزان‌دی‌ال جهت آشکارسازی دی-نیترو تولوئن (DNT) استفاده شده است. یکی از ویژگی‌های مهم لایه‌های



شکل 1. تصویر الکتروود شانه‌ای [17].



شکل 2. تصویر سامانه آزمایش حسگر.

سنتر گرافن اکسید

گرافن اکسید با روش اصلاح شده هامر سنتر شد [27]. در یک بشر 250 میلی‌لیتری، یک گرم گرافیت با 25 میلی‌لیتر سولفوریک اسید مخلوط و به هم زده شد، سپس 1/25 گرم سدیم نیترات به آن اضافه و به مدت یک ساعت در حمام صفر درجه به هم زده شد. به دنبال آن، 3/7 گرم پتاسیم پرمنگنات طی 2 ساعت به بشر اضافه و دمای مخلوط تا 35 درجه سانتی-گراد افزایش یافت و 2 ساعت در این دما نگهداری گردید. در ادامه، 100 میلی‌لیتر آب سرد و 3/5 میلی‌لیتر آب اکسیژنه 30% به مخلوط واکنش اضافه شد. گرافن اکسید تهیه شده سانتیفریوژ و چند بار با آب مقطر و کلریدریک اسید 3% شستشو شد تا زمانی که در محلول بالای رسوب، با اضافه کردن باریم کلرید، هیچ رسوب باریوم سولفات مشاهده نشود. سپس گرافن اکسید با آب مقطر شستشو داده شد تا زمانی که تست AgNO_3 منفی شود. محصول به دست آمده در دمای اتاق خشک و برای آزمایش‌های بعدی در ظرف درب بسته نگهداری شد.

3-2- عامل‌دار کردن گرافن اکسید با 5،5،4،4،3،3،2،2-اکتافلورو-6،1-هگزان‌دی‌آل، در یک بالن 250 میلی‌لیتری، مقدار 50 میلی‌گرم گرافن اکسید به 75 میلی‌لیتر تیونیل کلرید اضافه و به مدت یک ساعت در حمام فراصوت قرار داده شد تا گرافن اکسید به طور کامل پخش شود. مخلوط حاصل، به مدت یک شبانه روز در دمای 75 درجه سانتی‌گراد بازروانی شد. سپس تیونیل کلرید تبخیر و رسوب باقیمانده در 75 میلی‌لیتر دی‌کلرومتان پخش شد. مقدار 0/025 گرم 5،5،4،4،3،3،2،2-اکتافلورو-6،1-هگزان‌دی‌آل به آن اضافه و مخلوط به مدت 12 ساعت در 80 درجه سانتی‌گراد بازروانی شد. بعد از پایان بازروانی، رسوب 3 بار با آب مقطر و اتانول به ترتیب شستشو و در دمای محیط خشک شد.

بررسی پاسخ حسگر

شکل (2) سامانه تست حسگر مقاومت شیمیایی را نشان می‌دهد. برای بررسی پاسخ حسگر، مقدار 100 میکرولیتر از مخلوط $0/1 \text{ mg ml}^{-1}$ گرافن اکسید عامل‌دار شده در اتانول بر روی الکتروود شانه‌ای ریخته شد و در آن در دمای 70 درجه سانتی‌گراد قرار گرفت تا خشک شود. سپس الکتروود شانه‌ای پوشش داده شده در محفظه قرار داده شد و تغییرات مقاومت ناشی از عبور بخار DNT و برخی ترکیبات دیگر مورد بررسی قرار گرفت. تهیه غلظت‌های یکسان از هر ماده با استفاده از محاسبات مربوط به چگالی مایع‌ها و تزیق مقادیر مشخص از هر ماده به محفظه نمونه سازی انجام شد. پس از تبخیر کامل مقدار تزیق شده در محفظه نمونه سازی، بخار حاصل توسط گاز نیتروژن با خلوص 99 درصد به عنوان گاز حامل از طریق سامانه به محفظه حسگر در دما و فشار محیط منتقل شد.

مشخصات الکتروود شانه‌ای

الکتروود شانه‌ای مورد استفاده از جنس کروم لایه نشانی‌شده بر روی یک سیلیکون است که یک لایه نانومتری با ضخامت 150 نانومتر بر روی آن نشانداده شده است. طول انگشتانه‌های الکتروودی آن 5 میلی‌متر، پهنای آن و فاصله الکتروودی 20 میکرومتر و تعداد شانه‌های آن 40 جفت در نظر گرفته شده است.

نتایج و بحث

مشخصه‌یابی گرافن اکسید سنتر شده

تعیین مشخصات گرافن اکسید سنتر شده با روش اصلاح شده روش هامر، با روش‌های طیف‌سنجی زیرقرمز و تصویر برداری میکروسکوپ الکترونی روبشی انجام شد. یکی از روش‌های اثبات تهیه گرافن اکسید، استفاده از روش تصویربرداری با میکروسکوپ الکترونی است. شکل (3)، تصویر SEM گرافن اکسید را نشان می‌دهد، همان‌طور که در این شکل مشخص است، ورقه‌های گرافن اکسید مانند کاغذ مچاله شده هستند. چنین تصویری با تصاویر به دست آمده از مراجع برای گرافن اکسید مطابقت دارد [21].

شکل (4-الف)، طیف زیرقرمز گرافن اکسید سنتر شده را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، نوار جذب 983 cm^{-1} ارتعاش خمشی O-H موجود در گروه کربوکسیلیک اسید، نوارهای جذب 1052 و 1071 cm^{-1} مربوط به ارتعاش‌های کششی پیوند C-O در الکل‌ها، اترها و کربوکسیلیک اسیدها می‌باشد ($1000-1320 \text{ cm}^{-1}$). نوار جذب 1400 cm^{-1} مربوط به ارتعاش کششی پیوند C-C حلقه‌های آروماتیک و نوار جذب 1621 cm^{-1} مربوط به پیوند C=C و نوار جذب 1732 cm^{-1} متعلق به پیوند C=O و نوار جذب 3209 cm^{-1} مربوط به ارتعاش خمشی پیوند O-H در گروه کربوکسیلیک اسید و نوار جذب 3344 cm^{-1} برای پیوند ارتعاشی O-H در الکل‌ها و فنول‌ها هستند. وجود این ارتعاش‌ها بیانگر عامل‌دار شدن صفحات گرافیت و جدا شدن آن‌ها از هم نشانه سنتر نانوصفحات گرافن اکسید است. شکل (4-ب) طیف زیرقرمز گرافن اکسید عامل‌دار شده با 5،5،4،4،3،3،2،2-اکتافلورو-6،1-هگزان‌دی‌آل را نشان می‌دهد. با توجه به تشکیل استر به هنگام عامل‌دار کردن انتظار می‌رود طیف زیرقرمز آن همانند گرافن اکسید باشد با این تفاوت که نوار جذب پیوند C=C به دلیل اثرات متفاوت گروه کربونیل و استری جابه‌جا شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نوار جذب پیوند C=C از 1621 به 1611 cm^{-1} منتقل شده است و نوار جذب 1227 cm^{-1} مربوط به ارتعاش کششی C-F است.

بررسی پاسخ حسگر مقاومت شیمیایی

در این آزمایش حسگر مبتنی بر گرافن اکسید عامل‌دار شده از طریق روش خشک کردن قطره بر روی الکتروود شانه‌ای تهیه شده است؛ میزان پاسخ حسگر را می‌توان از رابطه (1) محاسبه کرد. پاسخ حسگر تهیه شده به گازهای مختلف در شکل (5) آورده شده است.

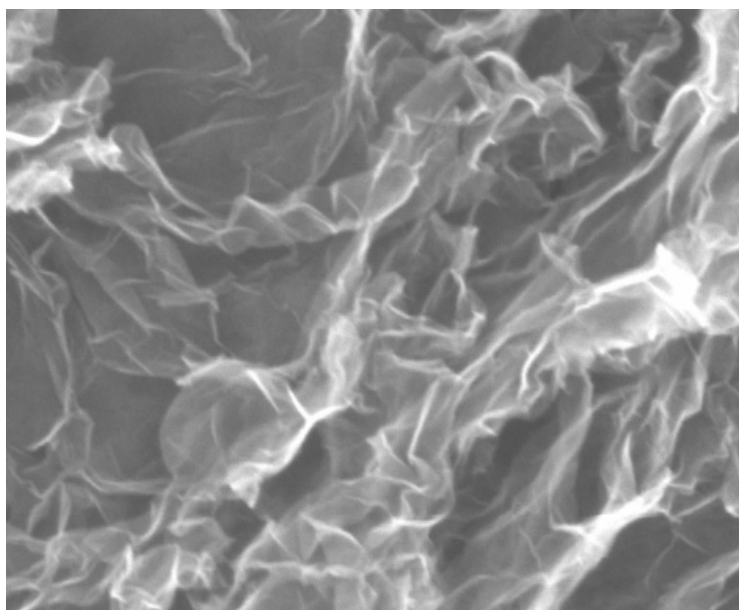
$$(1) \quad \text{درصد تغییرات نسبی مقاومت} = (R - R_0)/R_0 \times 100$$

R_0 : مقاومت اولیه الکتروود هنگام عبور گاز حامل

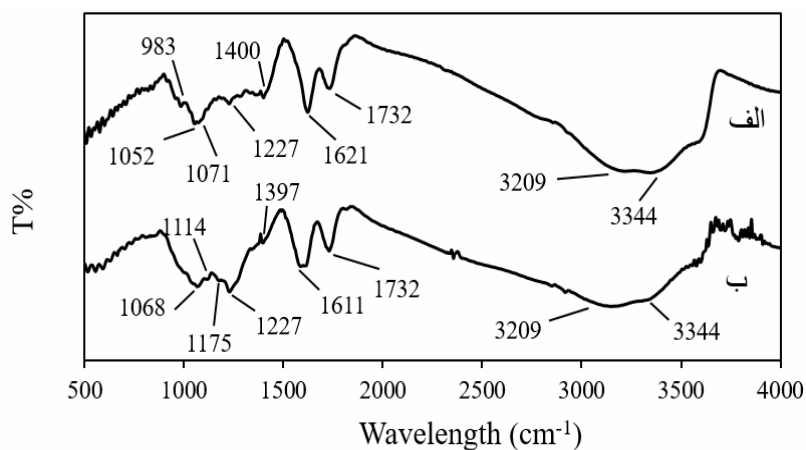
R: مقاومت الکتروود هنگام عبور گاز حامل به همراه نمونه

شکل 5 نمودار پاسخ حسگر لایه نشانی‌شده با گرافن اکسید عامل‌دار شده را به DNT و نمونه‌های مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل قابل مشاهده است، این حسگر گزینش‌پذیری قابل توجهی نسبت به DNT در مقابل دیگر ترکیب‌ها از خود نشان نمی‌دهد.

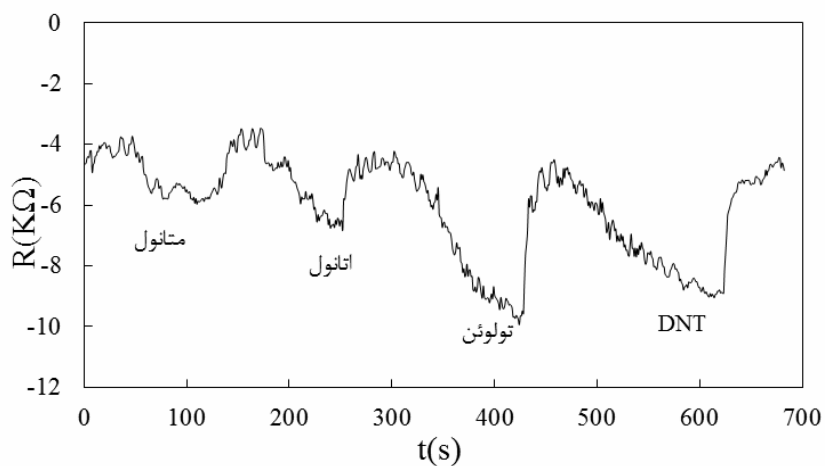
با توجه به این که DNT تمایل به ایجاد برهمکنش‌های هیدروژنی با هیدروژن‌های اسیدی از سمت اتم‌های اکسیژن خود دارد، می‌توان از



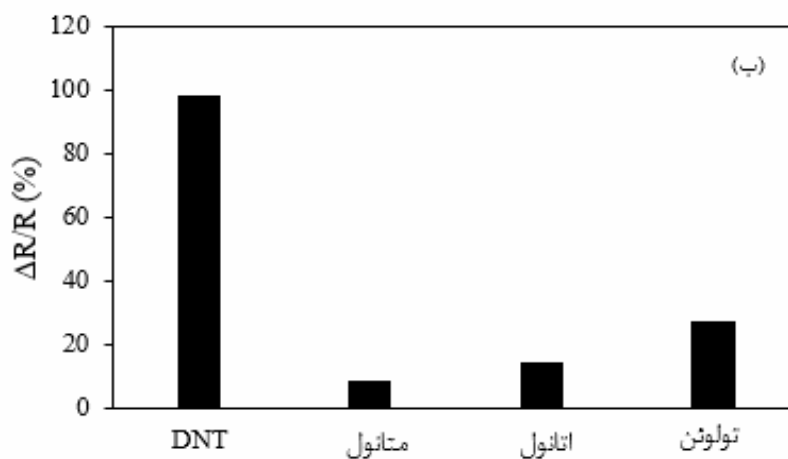
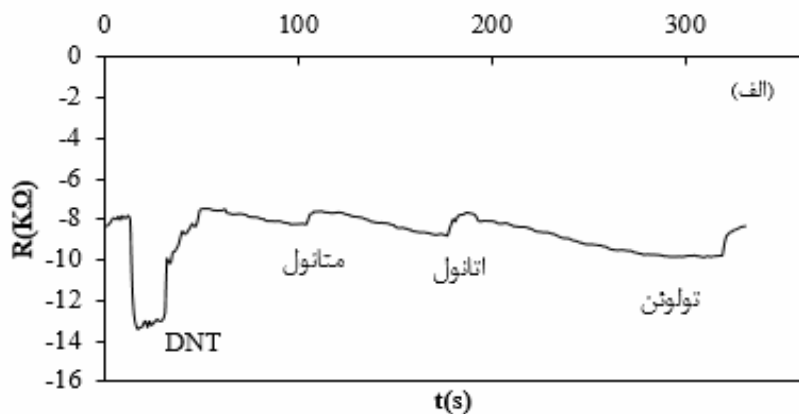
شکل 3. تصویر SEM گرافن اکسید.



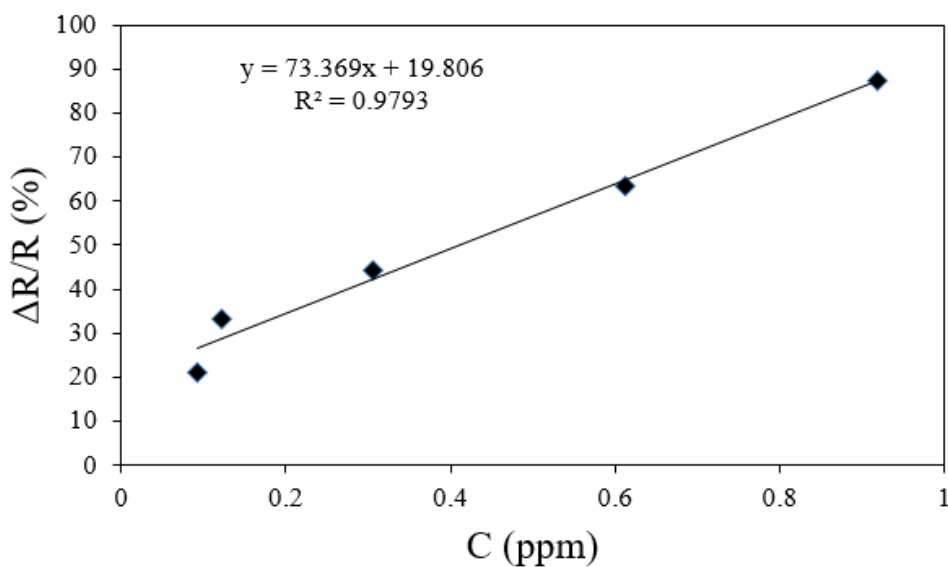
شکل 4. طیف زیرقرمز: (الف) گرافن اکسید سنتز شده، (ب) گرافن اکسید عامل دار شده با 2، 3، 3، 4، 4، 5، 5-اکتافلورو-1، 6-هگزان دی آل.



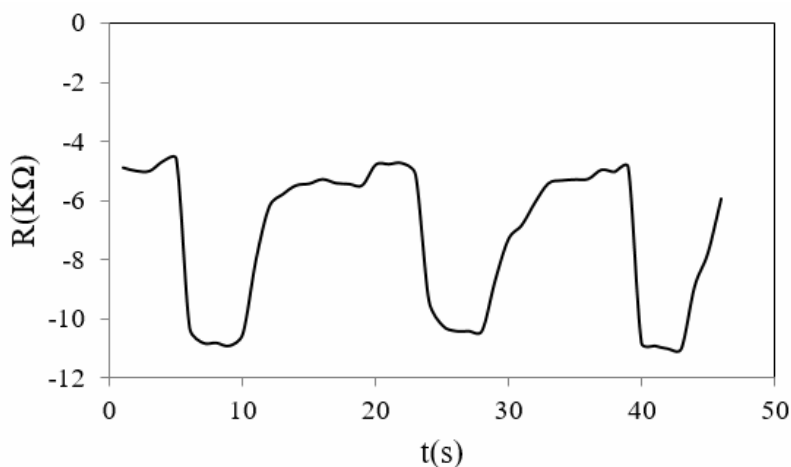
شکل 5. نمودار پاسخ حسگر لایه نشانی شده با گرافن اکسید عامل دار شده به نمونه های مختلف در غلظت $23/7 \text{ mg l}^{-1}$.



شکل 6. (الف) نمودار پاسخ حسگر لایه نشانی شده با گرافن اکسید عامل‌دار شده به نمونه‌های مختلف در غلظت $23/7 \text{ mg l}^{-1}$ به همراه لایه‌ای از TFQ، (ب) نمودار میله‌ای پاسخ حسگر در شرایط قسمت (الف).



شکل 7. نمودار کالیبراسیون حسگر لایه نشانی شده با گرافن اکسید عامل‌دار شده با 2،2،55،5،4،4،3،3-اکتانولورو-6،1-هگزاندی‌ال برای DNT.



شکل 8. نمودار تکرارپذیری پاسخ حسگر به ازای تزریق 1/2 ppm DNT

جدول 1. مقایسه نتایج به دست آمده با نتایج برخی از منابع

مرجع	زمان باز گشت (ثانیه)	زمان پاسخ (ثانیه)	دامنه خطی (ppb)	حدتشخیص (ppb)	نوع اصلاح گر	نوع حسگر
[28]	600	600	گزارش نشده	28	گزارش نشده	گرافن
[29]	635	68	گزارش نشده	گزارش نشده	نیترژن و سیلیکا دوپ شده	گرافن اکسید
[30]	1800	900	گزارش نشده	1/3	ازن	گرافن
[31]	5	10	گزارش نشده	0/5	تک لایه هیدرازین	گرافن اکسید کاهیده شده
[32]	1680	420	گزارش نشده	5×10^3	سیستامین هیدروکلراید	گرافن اکسید کاهیده شده با سدیم بورو هیدرید
تحقیق حاضر	35	20	91/8-918	91/8	نترافلورو هیدروکینون	گرافن اکسید عامل دار شده با 5،5،4،4،3،3،2،2- اکتافلورو-6،1-هگزان دی آل

می‌شود که هر گونه تمایلی در برقراری پیوند TFQ با هر یک از بخارات نمونه، سبب تغییر در هدایت گرافن اکسید شود. از آنجایی که اساس جذب DNT بر روی نانوساختارهای کربنی از طریق تشکیل پیوند هیدروژنی است، از TFQ در پوشش دهی الکترودهای لایه‌نشانی شده با گرافن اکسید عامل‌دار شده با 5،2،3،3،4،4،5- اکتافلورو-6،1- هگزان دی آل استفاده شد و مجدداً پاسخ حسگری مورد ارزیابی قرار گرفت. با بررسی پاسخ حسگر که در شکل 6-الف نشان داده شده است، مشخص گردید که حسگر لایه نشانی شده با گرافن اکسید عامل‌دار شده با 5،2،3،3،4،4،5- اکتافلورو-6،1- هگزان دی آل به همراه لایه‌ای از TFQ، پاسخ مناسبتری

موادی که دارای هیدروژن‌های اسیدی هستند جهت افزایش حساسیت و گزینش‌پذیری حسگر استفاده کرد. این مواد می‌توانند به عنوان بستر حسگر یا به عنوان لایه‌ای حساس بر روی بستر حسگر قرار بگیرند که در این تحقیق، از ترکیب نترافلورو هیدروکینون (TFQ)، جهت افزایش حساسیت و گزینش‌پذیری حسگر لایه نشانی شده با گرافن اکسید عامل‌دار- شده جهت آشکارسازی DNT استفاده شده است. با توجه به این که TFQ دارای چهار اتم فلور و دو اتم اکسیژن است، می‌تواند پیوند هیدروژنی قوی با گروه‌های کربونیلی و کربوکسیلی گرافن اکسید عامل‌دار شده برقرار کند. این ارتباط قوی بین TFQ و گرافن اکسید عامل‌دار شده سبب

حسگر شود.

مراجع

- 1) Z. Bielecki, *et al.* Metrology and Measurement Systems 19 (2012) 3.
- 2) L. Mokalled, *et al.* Int. J. Sci. Eng. Res. 5 (2014) 337.
- 3) J.S. Caygill, *et al.* Talanta 88 (2012) 14.
- 4) K.J. Albert, D.R. Walt, Anal. Chem. 72 (2000) 1947.
- 5) R.G. Smith, *et al.* Analyst 133 (2008) 571.
- 6) R.J. Harper, *et al.* Talanta 67 (2005) 313.
- 7) R.G. Ewing, *et al.* Talanta 54 (2001) 515.
- 8) T.H. Fereja, *et al.* ISRN Spectroscopy, 2013.
- 9) M.L. Lewis, *et al.* Vibrational Spectroscopy 38 (2005) 17.
- 10) X. Pan, *et al.* Talanta 70 (2006) 455.
- 11) A. Nimal, *et al.* Sensors and Actuators B: Chem. 135 (2009) 399.
- 12) V. Dobrokhoto, *et al.* Sensors 12 (2012) 5608.
- 13) F. Wang, *et al.* J. Am. Chem. Soc. 130 (2008) 5392.
- 14) J.W. Grate, Chem. Rev. 108 (2008) 726.
- 15) J.M. Schnorr, *et al.* Adv. Funct. Mater. 23 (2013) 5285.
- 16) W. Yuan, G. Shi, J. Mater. Chem. A 1 (2013) 10078.
- 17) H. Bai, G. Shi, Sensors 7 (2007) 267.
- 18) D. Wang, Trace Explosive Sensor Devices Based on Semiconductor Nanomaterials, University of Washington, 2014.
- 19) H.A. Becerril, J. Mao, Z. Liu, R.M. Stoltenberg, Z. Bao, Y. Chen, ACS Nano 2 (2008) 463.
- 20) H. Bai, G. Shi, Gas Sensors Based on Conducting Polymers. Sensors 7 (2007) 267.
- 21) S. Stankovich, D.A. Dikin, R.D. Piner, K.A. Kohlhaas, A. Kleinhammes, Y. Jia, R.S. Ruoff, Carbon 45 (2007) 1558.
- 22) H.P. Boehm, A. Clauss, G.O. Fischer, U. Hofmann, Zeitschrift Für Anorganische und Allgemeine Chemie 316 (1962) 119.
- 23) A.B. Bourlinos, D. Gournis, D. Petridis, T. Szabó, A. Szeri, I. Dékány, Langmuir 19 (2003) 6050.
- 24) N.A. Kotov, I. Dékány, J.H. Fendler, Adv. Mater., 8 (1996) 637.
- 25) V.H. Pham, T.V. Cuong, S.H. Hur, E. Oh, E.J.

از نظر حساسیت در مقابل DNT از خود نشان می‌دهد. این تغییر در پاسخ را می‌توان به برهم‌کنش اکسیژن متصل به نیتروژن در DNT با هیدروژن‌های اسیدی TFQ نسبت داد. شکل 6-الف، نمودار پاسخ حسگر لایه نشانی شده با گرافن اکسید عامل‌دار شده به همراه لایه‌های از TFQ را نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل مشخص است، این حسگر گزینش‌پذیری مناسبی نسبت به DNT از خود نشان می‌دهد که این امر در نمودار میله‌ای (شکل 6-ب) به صورت تغییر مقاومت نسبی پاسخ حسگر، قابل مشاهده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، علاوه بر حساسیت، گزینش‌پذیری حسگر نیز به مقدار قابل توجهی در مقایسه با نتایج ارائه شده در شکل (5) بهبود یافته است. انحراف استاندارد برای داده‌های شکل 6 مقدار 1/24 بدست آمد.

نمودار کالیبراسیون حسگر لایه نشانی شده با گرافن اکسید عامل‌دار شده به همراه لایه‌های از TFQ برای آشکارسازی DNT در شکل (7) نشان داده شده است. حسگر تهیه شده در دامنه غلظتی 91/8 تا 918 ppb رفتار خطی از خود نشان داده است. برای محاسبه حد تشخیص، پنج بار گاز زمینه به محفظه الکتروود وارد شد که بر مبنای میانگین پاسخ شاهد به اضافه سه برابر انحراف استاندارد، اندازمگیری مقدار حد تشخیص 91/8 ppb به دست آمد. تکرارپذیری پاسخ حسگر با 3 بار تزریق DNT با غلظت 1/2 ppm به محفظه حسگر مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج در شکل (8) نشان داده شده است. انحراف استاندارد نسبی حاصل از این 3 بار تزریق، 6/09 درصد به دست آمد که نشان دهنده تکرارپذیری خوبی برای پاسخ دهی حسگر است. همچنین استاندارد معیار برای شکل 8، مقدار 0/65 بدست آمد.

زمان پاسخ حسگر به صورت «مدت زمانی که طول می‌کشد تا تغییرات مقاومت به 90% بیشینه تغییرات برسد» تعریف می‌شود [27]. زمان پاسخ و بازگشت محاسبه شده برای این حسگر به ترتیب 20 و 35 ثانیه است. مقایسه نتایج به دست آمده با برخی نتایج پژوهش‌های دیگر در جدول (1) ارائه شده است. همان‌طور که در جدول (1) مشخص است، حسگر مقاومت شیمیایی مبتنی بر گرافن اکسید عامل‌دار شده با 2،2،3،3،4،4،5،5-اکتافلورو-1،6-هگزان‌دی‌ال به همراه لایه‌های از تترافلورو هیدروکینون دارای مزایایی از قبیل زمان پاسخ کمتر، زمان بازگشت مناسب و حدتشخیص نسبتاً خوبی نسبت به دیگر حسگرها است.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، نوعی حسگر مقاومت شیمیایی بر اساس پوشش دهی الکتروود شانه‌ای با گرافن اکسید عامل‌دار شده با 2،2،3،3،4،4،5،5-اکتافلورو-1،6-هگزان‌دی‌ال تهیه و پاسخ آن نسبت به DNT مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که حسگر موجود گزینش‌پذیری و حساسیت قابل توجهی نسبت به DNT دارد. پاسخ حسگر با افزودن لایه‌کمی بر روی حسگر لایه نشانی شده با گرافن اکسید عامل‌دار شده با 2،2،3،3،4،4،5،5-اکتافلورو-1،6-هگزان‌دی‌ال، افزایش حساسیت و گزینش‌پذیری قابل توجهی را به DNT از خود نشان داد. گستره پاسخ خطی به دست آمده برای این نوع حسگر 918-91/8 ppb با حد تشخیص 91/8 ppb است. انحراف استاندارد نسبی برای 3 بار تکرارپذیری پاسخ حسگر مقدار 6/09 درصد محاسبه شد. به نظر می‌رسد استفاده از ترکیبات دارای هیدروژن اسیدی می‌تواند باعث افزایش گزینش‌پذیری و حساسیت



- 31) J.T. Robinson, F.K. Perkins, E.S. Snow, Z. Wei, P.E. Sheehan, *Nano Lett.* 8 (2008) 3137.
- 32) P.G. Su, H.C. Shieh, *Sensors and Actuators B: Chem.* 190 (2014) 865. (2012) 174.
- 33) J.J. Wu, C. Wu, H. Ma, C.C. Chang, *Chemosphere*, 54 (2004) 997.
- 34) I.M. Ramirez, M.T. Orta de Velasquez, *Water Res.* 38 (2004) 2359.
- 35) M. Shabani, E. Fatehifar, A. Baradar Khoshfetrat, D. Kahforoushan, *J. Civ. Environ. Eng.* 44 (2014) 76.
- 26) P.G. Ren, D.X. Yan, X. Ji, T. Chen, Z.M. Li, *Nanotechnol.* 22 (2010) 055705.
- 27) P.G. Ren, D.X. Yan, X. Ji, T. Chen, Z.M. Li., *Nanotechnol.* 22 (2010) 055705.
- 28) J.D. Fowler, M.J. Allen, V.C. Tung, Y. Yang, R.B. Kaner, B.H. Weiller, *ACS Nano* 3 (2009) 301.
- 29) F. Niu, J.M. Liu, L.M. Tao, W. Wang, W.G. Song, *J. Mater. Chem. A* 1 (2013) 6130.
- 30) M.G. Chung, D.H. Kim, H.M. Lee, T. Kim, J.H. Choi, D. Kyun Seo, Y.H. Kim, *Sensors and Actuators B: Chem.* 166 (2012) 172.
- Kim, E.W. Shin, J.S. Chung, *J. Mater. Chem.* 21 (2011) 3371.