

## بررسی نانوکامپوزیت لایه نازک PEDOT:PSS/SnO<sub>2</sub> به عنوان حسگر گاز CO

محمد دوازده امامی<sup>۱\*</sup>، راحله معمارزاده<sup>۲</sup> و سیروس جوادپور<sup>۳</sup>

### چکیده

در این مقاله، به بررسی اثر افزودن نانو ذرات اکسید قلع (SnO<sub>2</sub>) به پلی(۳،۴ اتیلن دی اکسی تیوفن) پلی(استیرن سولفونیت) (PEDOT:PSS) جهت تولید نانوکامپوزیت لایه نازک PEDOT:PSS/SnO<sub>2</sub> به عنوان حسگر گاز مونواکسید کربن (CO) پرداخته شده است. تولید لایه نازک این کامپوزیت به وسیله دستگاه پوشش دهنده چرخشی انجام شده است. نانوکامپوزیت به دست آمده با استفاده از تکنیک‌های آزمایشگاهی FTIR، AFM و XPS مورد بررسی قرار گرفته است. بمنظور تعیین دمای کارکرد مناسب، مقدار حساسیت حسگر در دماهای متفاوت بررسی شد. در پایان آزمایش‌ها سعی شده است تا مقدار بهینه‌ی درصد جرمی نانوذرات SnO<sub>2</sub> در نانوکامپوزیت ساخته شده جهت مناسب‌سازی حساسیت و به‌گزینی حسگر گاز CO به دست آید. هم‌چنین در این آزمایش‌ها به بررسی اثر رطوبت بر مقدار پاسخگویی حسگر نسبت به گاز CO پرداخته شده است. از خصوصیت‌های این حسگر می‌توان به پاسخگویی در دمای محیط، زمان پاسخگویی کوتاه و هم‌چنین ساخت آسان اشاره کرد.

واژه‌های کلیدی: حسگر گاز، مونواکسید کربن، PEDOT:PSS، اکسید قلع، نانوکامپوزیت

<sup>۱</sup> - دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه شیراز، دانشکده مهندسی، بخش مهندسی مواد، شیراز، ایران

<sup>۲</sup> - استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد مرودشت، گروه مکانیک، مرودشت، ایران

<sup>۳</sup> - دانشیار، دانشگاه شیراز، دانشکده مهندسی، بخش مهندسی مواد، شیراز، ایران

\*- نویسنده مسئول مقاله: Mohammad\_12emami@yahoo.com

## پیشگفتار

با پیشرفت صنعت، نیاز به کنترل آلاینده‌های هوای محیط اطراف کارخانه‌ها و نیز تأسیسات فنی افزایش یافته است. سیستم کنترلی باید امکان پایش پیوسته‌ی غلظت گازها به صورت کمی و انتخابی را دارا باشد. سیستم باید در عین ارزان بودن، از حساسیت<sup>۱</sup> بالا، به‌گزینی<sup>۲</sup> مناسب، واکنش سریع و دوام خوبی در مقابل آلاینده‌های هوا برخوردار باشد. کنترل و راهبری فرایندهای فنی به چنین سیستم‌های به‌گزینی گاز نیاز دارد. یک مثال، موتور احتراقی اتومبیل‌ها می‌باشد. گازهای خروجی از نظر ترکیبات سمی مانند مونواکسید کربن و ترکیبات نیتروژنی باید بررسی شوند. از کاربردهای دیگر حسگری گازی در این زمینه می‌توان اندازه‌گیری نسبت سوخت به هوا را نام برد [۱].

با توجه به رفتار مخرب اکسایشی مونواکسید کربن و ترکیبات نیتروژنی و واکنش آنها با لایه‌ی اوزون، این گازها، گازهایی مضر برای محیط هستند. بدین ترتیب وجود یک حسگر گاز CO جهت جلوگیری از مسمومیت محیط زیست ضروری به نظر می‌رسد [۲،۳].

فناوری حسگرهای گازی بر اساس تغییراتی است که در هدایت الکتریکی نیمه‌هادی‌ها ایجاد می‌شود، که این پدیده به ترکیب شیمیایی و انتقال الکترون در نیمه‌هادی بستگی دارد. یک حسگر گاز برای تبدیل داده‌های شیمیایی (وجود و یا غلظت یک گاز مخصوص) به داده‌های مناسب (سیگنال الکتریکی یا نوری) طراحی می‌شود [۴].

مطالعات زیادی بر روی اکسیدهای فلزی مانند SnO<sub>2</sub> و WO<sub>3</sub> و ZnO و Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> صورت گرفته و آنها را به عنوان حسگرهای مقرون به‌صرفه برای کنترل گازهای سمی مطرح کرده است [۵-۷]. به ویژه SnO<sub>2</sub> به‌صورت گسترده برای بررسی مقدار کمی آلاینده‌ها استفاده می‌شود، چرا که از دقت خوبی در مقابل آلودگی گازها برخوردارند. البته این

اکسیدهای فلزی معایب مهمی مانند ضعف در به‌گزینی، عدم دقت در مواجهه با رطوبت و دمای کاری بالا دارند.

اخیراً برخی نیمه‌رساناهای آلی مانند پلی-تیوفن‌ها (Polythiophene)، به واسطه‌ی تغییر در مقاومت الکتریکی‌شان، در معرض گازهای گوناگون، به عنوان حسگرهای گازهای سمی استفاده می‌شوند. از جمله امتیازات کاربرد این نوع پلیمرها در ساخت حسگرهای گازی، می‌توان به تنوع، گستردگی و قابل دسترس بودن پلیمرها و عملکرد آنها در دمای اتاق اشاره کرد [۸-۱۰]. ویژگی‌های ذکر شده برای حسگرهای آلی، آنها را مستعد استفاده در اتمسفرهای خانگی می‌سازد. یکی از معایب این پلیمرها ضعف در پایداری و تشخیص انتخابی گازها است. به همین دلیل، ناخالصی‌های ویژه‌ای جهت افزایش دقت و به‌گزینی گاز مورد نظر به آنها اضافه می‌شود [۱۱].

PEDOT:PSS به عنوان یک پلیمر نیمه-هادی با ساختار قطبی می‌تواند برهم‌کنش مناسبی با گازهای قطبی داشته باشد. به همین دلیل، انتظار می‌رود در میان گازهای متداول موجود در اتمسفرهای خانگی، مونواکسید کربن و بخار آب به عنوان دو گاز قطبی بتوانند تأثیر چشمگیری بر تغییر مقاومت این پلیمر داشته باشند.

در این مقاله به بررسی اثر افزودن نانو ذرات SnO<sub>2</sub> به پلیمر PEDOT:PSS جهت تولید نانو کامپوزیت لایه نازک PEDOT:PSS/SnO<sub>2</sub> به عنوان حسگر گاز CO پرداخته شده است.

## مواد و روش‌ها

## مواد مورد استفاده

جهت آماده‌سازی نانوکامپوزیت PEDOT:PSS/SnO<sub>2</sub> از دو نوع نمونه‌ی SnO<sub>2</sub>، به صورت تجاری و فراوری شده، استفاده شد. نمونه‌ی پودری تجاری (نمونه‌ی شماره ۱) از US Research Nanomaterials, Inc تهیه شد و دارای اندازه‌ی ذره‌ی متوسط ۴۵nm بود. این نانو

<sup>1</sup> - sensitivity

<sup>2</sup> - selectivity

۱۷  $\frac{ml}{sec}$  وارد محفظه شده و شیر خروجی محفظه در حین آزمایش باز نگه داشته شد. به این ترتیب تغییرات به وجود آمده در مقاومت الکتریکی حسگر به وسیله رایانه ثبت شد.

پاسخگویی<sup>۱</sup> لایه‌ی حسگر به گاز مورد نظر به وسیله‌ی رابطه‌ی  $\%S = \frac{R_g - R_a}{R_a} \times 100$  اندازه‌گیری شد که در آن  $R_a$  مقاومت اولیه الکتروود در هوای معمولی و  $R_g$  مقاومت الکتروود در معرض گاز مورد نظر است.

بعد از ثابت شدن تقریبی مقاومت حسگر درون محفظه‌ی پر از هوا، گاز CO وارد محفظه شده و تا ثابت شدن تقریبی مقاومت حسگر در معرض گاز CO ورود این گاز ادامه می‌یابد. پس از آن حسگر مجدداً در معرض هوا قرار گرفت تا بازیابی انجام شود.

به کمک یک دستمال مرطوب و یک رطوبت-سنج دیجیتال و مقدار مشخصی خشک کننده ژل-سیلیکایی همه‌ی آزمایش‌های حساسیت به گاز در رطوبت نسبی ۲۵٪ انجام شد.

برای به دست آوردن دمای کاری بهینه‌ی این حسگرها، مقدار حساسیت به گاز آنها، در دمای اتاق، ۵۰°C، ۱۰۰°C و ۱۵۰°C مورد سنجش قرار گرفت. به این ترتیب که ابتدا حسگر در محفظه‌ی پر از هوا در رطوبت نسبی ۲۵٪ قرار داده شد و سپس دما به مقدار مورد نظر رسانده شد و سایر مراحل به همان ترتیب ذکر شده انجام شد.

برای بررسی مقدار تأثیر رطوبت بر کارایی حسگر، الکتروودهای پوشش داده شده درون محفظه-ای از هوا با رطوبت نسبی ۷۰٪ در دمای اتاق قرار گرفتند و با استفاده از خشک کننده‌ی سیلیکایی رطوبت درون محفظه حذف شد و تغییرات مقاومت الکتروودها ثبت گردید.

جهت بررسی مقدار حساسیت به گازهای گوناگون موجود در هوا و نیز مقدار به‌گزینی حسگر به همان ترتیب که برای گاز CO ذکر شد،

ذرات بدون هیچ گونه خالص سازی استفاده شدند. نمونه‌ی پودری که به صورت آزمایشگاهی فراوری شده است (نمونه‌ی شماره ۲) دارای اندازه‌ی ذره‌ی متوسط ۲nm می‌باشد [۱۲].

سوسپانسیون پایدار پلیمری PEDOT:PSS مورد استفاده از Aldrich (USA) تهیه و بدون تغییر استفاده گردید. این سوسپانسیون آبی حاوی ۱wt% ذرات جامد بوده که به رنگ آبی تیره به نظر می‌رسد. این محلول دارای ویسکوزیته‌ی ۱۵mpa.s و رسانایی ۱۰ S/cm می‌باشد. گاز CO مورد استفاده از Linde Industrial Gases با خلوص ۹۹/۹۹٪ تهیه شد.

### آماده‌سازی نانوکامپوزیت لایه نازک

نانوکامپوزیت، با درصدهای متفاوت جرمی تهیه و به وسیله هم‌زن مغناطیسی ۲۰ دقیقه به هم زده شد.

در این پژوهش، از الکتروودهای شانهای درهم فرورفته‌ی طلا که به روش سیلیک بر روی یک قطعه‌ی شیشه‌ای نشانده شده است، استفاده شد. ابعاد این الکتروودها ۱۵mm×۱۰mm با فاصله‌ی بین شانهای ۱/۱۰۹μm است.

کامپوزیت‌های آماده شده به روش پوشش‌دهی چرخشی بر روی الکتروودهای ذکر شده پوشش داده شدند. سرعت چرخش دستگاه پوشش دهنده چرخشی ۱۵۰ دور بر دقیقه و زمان پوشش‌دهی ۱۵ ثانیه در نظر گرفته شد. نانوکامپوزیت به دست آمده با استفاده از AFM, FTIR و XPS مورد بررسی قرار گرفت.

### آزمایش مقدار حساسیت و به‌گزینی

در این آزمایش‌ها، برای بررسی رفتار حسگر پلیمری ساخته شده در معرض گاز مونواکسید کربن، از یک محفظه به حجم ۱۰lit استفاده شد.

برای ثبت تغییرات به وجود آمده در پتانسیل و مقاومت الکتریکی حسگر پلیمری، از مالتی‌متر دیجیتال استفاده گردید. گاز CO با نرخ

<sup>1</sup> - responsibility

توجه به افزایش زبری سطح می‌توان نتیجه گرفت، سطح مؤثر لایه‌ی کامپوزیتی نسبت به لایه‌ی پلیمری بیش‌تر است.

شکل ۴ مربوط به طیف‌های به دست آمده از آنالیز XPS<sup>۴</sup> نمونه‌ی PEDOT:PSS خالص و PEDOT:PSS/(1wt%)SnO<sub>2</sub> است. PEDOT و PSS هر دو دارای یک اتم گوگرد در واحد سازنده‌ی تکرارپذیر خود هستند. بدین ترتیب انرژی پیوند گوگرد به صورت دو پیک مجزا نمایش داده شده است. پیک با انرژی بیش‌تر مربوط به PSS و پیک با انرژی کمتر مربوط به PEDOT در لایه‌ی PEDOT:PSS است (شکل ۴(a)). در این شکل جابه‌جایی پیک S(2p) در PEDOT از ۱۶۵/۳۴eV به ۱۶۴/۱۹eV و از ۱۶۴/۱۹eV به ۱۶۳/۹eV مشاهده می‌شود [۱۵]. دلیل ایجاد این جابه‌جایی، تشکیل نیروی الکترواستاتیک PEDOT و نانوذرات SnO<sub>2</sub> و تغییر محیط شیمیایی S در زنجیره‌ی پلی تیوفن است، که باعث می‌شود انرژی پیوند S(2p) به مقدار کمتری جابه‌جا شود [۱۶].

برای O(1s) دو پیک در انرژی پیوند ۵۳۲/۶eV و در ۵۳۳/۶eV مشاهده می‌شود که به ترتیب مربوط به سولفونیت (PSS) و حلقه‌ی تیوفن هستند (شکل ۴(a)). در شکل ۴(b) به خوبی مشخص است که بعد از وارد شدن نانوذرات SnO<sub>2</sub> در ساختار PEDOT:PSS، یک جزء به طیف O(1s) اضافه شده است. پیک ظاهر شده در انرژی پیوند ۵۳۰/۹eV می‌تواند نمایانگر O<sup>-</sup> یا نمایانگر O<sup>۲-</sup> باشد [۱۷].

#### مقدار حساسیت و به‌گزینی

برای بهبود خواص حسگری، پلیمر با درصدهای متفاوتی از هر دو نمونه نانوذرات SnO<sub>2</sub> مخلوط شد.

همان‌گونه که در شکل ۵ مشاهده می‌شود در پلیمر دوپ شده به وسیله نانوذرات SnO<sub>2</sub>، بهترین حساسیت به گاز را در میان نانوکامپوزیت‌های

حساسیت حسگر نسبت به گازهای CO<sub>2</sub>، O<sub>2</sub> و N<sub>2</sub> نیز آزمایش شد.

## نتایج و بحث

### مشخصه‌یابی مواد

شکل ۱ و ۲ به ترتیب نشان دهنده‌ی طیف FTIR<sup>۱</sup> مربوط به پلیمر PEDOT:PSS و نانوکامپوزیت PEDOT:PSS/(0.5wt%)SnO<sub>2</sub> می‌باشد که با استفاده از قرص KBr، در محدوده‌ی ۴۰۰۰-۵۰۰ cm<sup>-۱</sup> ثبت شده‌اند.

در هر دو طیف باندهای مشاهده شده در فرکانس‌های تقریبی ۱۶۴۳، ۱۳۸۰، ۱۱۸۸، ۸۳۳ cm<sup>-۱</sup> مربوط به پیوندهای PEDOT:PSS هستند [۱۳].

پیک‌های مشاهده شده در فرکانس‌های ۶۱۵، ۶۷۰ cm<sup>-۱</sup> نیز از شاخص‌های شبکه SnO<sub>2</sub> می‌باشند [۱۴].

انتقال مشاهده شده در برخی فرکانس‌ها حاصل برهم‌کنش PEDOT:PSS و SnO<sub>2</sub> است. چرا که در نتیجه این برهم‌کنش، دانسیته الکترونی اطراف باندهای شیمیایی تغییر می‌کند و این امر منجر به جابه‌جایی فرکانس مربوط به هر باند می‌شود.

تصویر AFM<sup>۲</sup> مربوط به PEDOT:PSS و نانوکامپوزیت PEDOT:PSS/(0.5wt%)SnO<sub>2</sub> در شکل ۳ نشان داده شده است.

مقدار ریشه‌ی میانگین مربعات<sup>۳</sup> (rms) زبری سطح از ۱/۲۴nm در PEDOT:PSS به ۱/۵۰m در نانوکامپوزیت PEDOT:PSS/(0.5wt%) SnO<sub>2</sub> افزایش یافته است.

با توجه به تمایل نانوذرات اکسید قلع به کاهش انرژی سطحی و خوشه‌ای شدن [۱۲]، حضور آنها در لایه نازک کامپوزیتی، باعث افزایش مقدار ریشه‌ی میانگین مربعات زبری سطح می‌شود. با

<sup>۱</sup> - Fourier transform infrared spectroscopy

<sup>۲</sup> - Atomic force microscope

<sup>۳</sup> - Root mean square

<sup>۴</sup> - X-ray photoelectron spectroscopy

حسگر مورد نظر است، از این مورد صرف نظر می‌شود.

در شکل ۷ پاسخگویی به گاز CO حسگرهای PEDOT:PSS نانوکامپوزیت PEDOT:PSS/(0.4wt%)SnO<sub>2</sub>(#1) و PEDOT:PSS/(0.6wt%)SnO<sub>2</sub>(#2) نسبت به تغییرات دما نشان داده شده است. دمای کاری بهینه برای این حسگرها، همان دمای اتاق می‌باشد که این خصوصیت از مزایای این دسته از حسگرها بشمار می‌رود. علاوه بر این، این امر می‌تواند تأییدی بر ساز و کار پیشنهادی برای این دسته از کامپوزیت‌های زمینه پلیمری باشد.

شکل ۸ نشان دهنده‌ی پاسخگویی پلیمر نیمه-هادی مورد نظر و نانوکامپوزیت آن در برابر رطوبت می‌باشد. مولکول‌های H<sub>2</sub>O می‌توانند با ایجاد پیوندهای هیدروژنی با پلیمر PEDOT:PSS برهم‌کنش کنند. این مولکول‌ها می‌توانند به عنوان پلی میان دو زنجیره‌ی قرار بگیرند. با توجه به نمودارهای نشان داده شده می‌توان نتیجه گرفت رطوبت تأثیر کمتری بر حسگرهای نانوکامپوزیتی PEDOT:PSS/SnO<sub>2</sub> نسبت به حسگر پلیمری PEDOT:PSS دارد. از آنجا که در پلیمر دوپ شده موقعیت‌های کمتری برای تشکیل پیوند هیدروژنی به‌وسیله مولکول‌های آب وجود دارد و این مولکول‌ها پیوندهای کمتری با پلیمر دوپ شده نسبت به پلیمر خالص ایجاد می‌کنند. چرا که مکان‌های مناسب برای برهم‌کنش مولکول‌های آب و زنجیره پلیمری، قبلاً به‌وسیله نانوذرات اکسیدی اشغال شده‌اند. قابل ذکر است که افزایش رطوبت باعث افزایش مقاومت حسگر می‌شود، در حالی که مواجه شدن با گاز CO باعث کاهش مقاومت پلیمر می‌شود.

در شکل ۹ حساسیت به گازهای موجود در هوا برای حسگرهای نانوکامپوزیتی PEDOT:PSS/(0.4wt%)SnO<sub>2</sub>(#1) و PEDOT:PSS/(0.6wt%)SnO<sub>2</sub>(#2) و مقایسه‌ی آن با پاسخگویی به گاز CO برای این

ساخته شده از نمونه‌ی شماره ۱، نانوکامپوزیت PEDOT:PSS/(0.4wt%)SnO<sub>2</sub> و در میان نانوکامپوزیت‌های ساخته شده از نمونه‌ی شماره ۲، نانوکامپوزیت PEDOT:PSS/(0.6wt%)SnO<sub>2</sub> دارد.

همان‌گونه که مشاهده می‌شود، ابتدا با افزایش درصد جرمی نانوذرات SnO<sub>2</sub> درون پلیمر پاسخگویی حسگر افزایش یافته و سپس با افزایش درصد وزنی این نانوذرات مقدار پاسخگویی کاهش می‌یابد، که این پدیده می‌تواند ناشی از سازمان‌یافته‌ترین ساختار نسبت به سایر نانوکامپوزیت‌ها باشد. همان‌گونه که در بخش‌های بعد توضیح داده خواهد شد، ساز و کار این نوع کامپوزیت بر مبنای تشکیل پیوندگاه‌های p-n می‌باشد که بین نیمه هادی اکسیدی نوع n و نیمه هادی پلیمری نوع p برقرار می‌شود. افزایش غلظت نانوذرات اکسیدی در زمینه پلیمر هادی می‌تواند در تشکیل بهینه این پیوندگاه‌ها خلل ایجاد کند. بنابراین، افزایش درصد وزنی این نانوذرات باعث کاهش مقدار پاسخگویی می‌شود.

با استفاده از شکل ۶ می‌توان زمان پاسخگویی حسگرهای PEDOT:PSS و نانوکامپوزیت PEDOT:PSS/(0.4wt%)SnO<sub>2</sub>(#1) (تهیه شده از نمونه‌ی شماره ۱) و نانوکامپوزیت PEDOT:PSS/(0.6wt%)SnO<sub>2</sub>(#2) (تهیه شده از نمونه‌ی شماره ۲) را با یکدیگر مقایسه کرد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود علاوه بر افزایش مقدار پاسخگویی به گاز در نانوکامپوزیت‌های PEDOT:PSS/(0.4wt%)SnO<sub>2</sub>(#1) و PEDOT:PSS/(0.6wt%)SnO<sub>2</sub>(#2) نسبت به پلیمر خالص PEDOT:PSS، زمان پاسخگویی و زمان بازیابی نیز بهبود یافته است.

تغییرات در ضخامت لایه‌ی نانوکامپوزیتی PEDOT:PSS/SnO<sub>2</sub> بر روی مقاومت ابتدایی این لایه تأثیرگذار خواهد بود، در حالی که تأثیر ناچیزی بر روی نتایج آزمایش خواهد داشت [۱۸]، و از آنجا که در این پژوهش تغییرات نسبی مقاومت

تهیه شده از نانوذرات SnO<sub>2</sub> با اندازه‌ی متوسط (۲nm) داشت. علاوه بر این افزایش غلظت نانو ذرات اکسیدی در ساختار پلیمر هادی منجر به کاهش تأثیر رطوبت بر کامپوزیت حسگر می‌شود.

### References

1. G. Heiland, "Homogeneous Semiconducting", Sensors and Actuators, Vol. 2, pp. 343-361, 1982.
2. M. K. Ram, O. Yavuz, V. Lahsangah and M. Aldissi, "CO gas sensing from ultrathin nano-composite conducting polymer film", Sensors and Actuators B, Vol. 106, pp. 750-757, 2005
3. B. Bahrami, A. Khodadadi, M. Kazemeini and Y. Mortazavi, "Enhanced CO sensitivity and selectivity of gold nanoparticles-doped SnO<sub>2</sub> sensor in presence of propane and methane", Sensors and Actuators B, Vol. 133, pp. 352-356, 2008
4. H. Bai and G. Shi, "Gas Sensors Based on Conducting Polymers", Sensors, Vol. 7, pp. 267-307, 2007
5. D.F. Zhang, L.D. Sun, X. Gang and C.H. Yan, "Size-controllable one-dimensional SnO<sub>2</sub> nanocrystals: synthesis, growth", Physical Chemistry Chemical Physics, Vol. 8, pp. 4874-4880, 2006
6. I. Jimenez, J. Arbiol, G. Dezaneeu, A. Cornet and J.R. Morante, "Crystalline structure, defects and gas sensor response to NO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>S of tungsten trioxide nanopowders", Sensors and Actuators B, Vol. 93, pp. 475-485, 2003
7. B. Baruwati, D.K. Kumar and S.V. Manorama, "Hydrothermal synthesis of highly crystalline ZnO nanoparticles: A competitive sensor for LPG and EtOH", Sensors and Actuators B, Vol. 119, pp. 676-682, 2006
8. A.A. Athawale, S.V. Bhagwat and P.P. Katre, "Nanocomposite of Pd-polyaniline as a selective methanol sensor", Sensors and Actuators B, Vol. 114, pp. 263-267, 2006

حسگرها رسم شده است. PEDOT:PSS دارای یک ساختار قطبی است که در آن PEDOT جزء مثبت و PSS جزء منفی است [۱۳]. بدین ترتیب این پلیمر پاسخگویی بهتری نسبت به گازهای قطبی مانند CO دارد [۱۸]. با توجه به شکل ۹ پاسخگویی این حسگرها نسبت به گاز CO به مراتب بیش‌تر از سایر گازهای موجود در هوا است و عملاً این حسگرها از به‌گزینی قابل قبولی در اتمسفرهای خانگی برای گاز CO برخوردارند.

پلیمر رسانا-SnO<sub>2</sub> یکی از مطلوب‌ترین مواد نانساختاری برای کارایی حسگری گازها است؛ چرا که این ماده در دمای اتاق تغییرات رسانایی خوبی از خود نشان می‌دهد، هم‌چنین دارای خواص اپتیکی (نوری) و شیمیایی خوبی است. SnO<sub>2</sub> نیمه رسانای نوع n، یک پیوندگاه p-n با پلیمر رسانای نوع p می‌سازد که این پیوندگاه یک ناحیه‌ی تخلیه تشکیل می‌دهد. گازهای گوناگون باعث تغییر پهنای ناحیه‌ی تخلیه و در نتیجه تغییر در رسانایی پیوندگاه می‌شود.

همان‌گونه که در شکل ۱۰ نشان داده شده است، وقتی که نانو کامپوزیت در معرض گاز CO قرار می‌گیرد، E<sub>C</sub>-E<sub>F</sub> در منطقه‌ی n افزایش یافته و پهنای ناحیه‌ی تخلیه کاهش می‌یابد و این منجر به افزایش رسانایی می‌شود [۱۹].

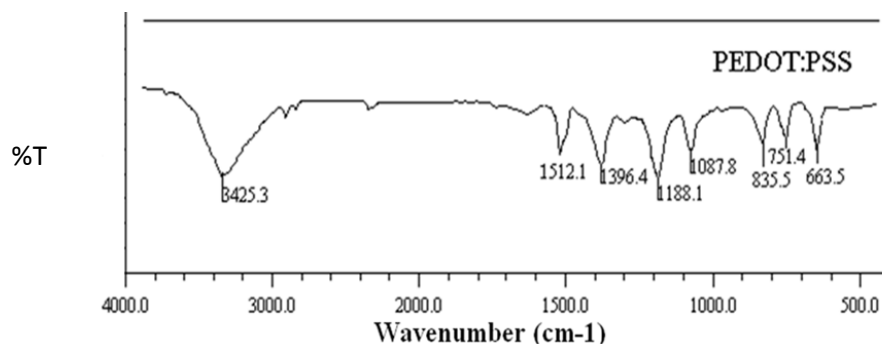
### نتیجه‌گیری

نانوکامپوزیت PEDOT:PSS/SnO<sub>2</sub> می‌تواند به‌عنوان یک ماده‌ی مناسب نانساختار جهت حسگری گاز CO مورد استفاده قرار گیرد؛ زیرا در دمای اتاق و در معرض گاز تغییرات محسوسی در مقاومت الکتریکی آن رخ می‌دهد.

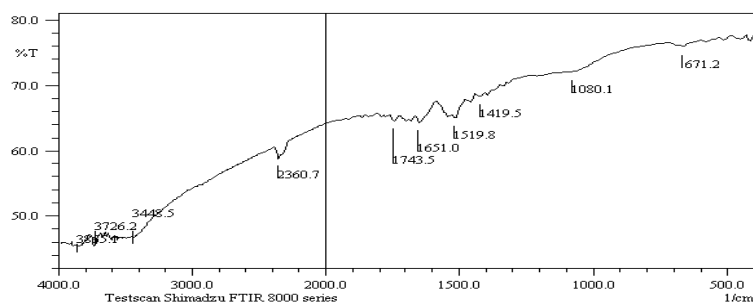
در میان نانوکامپوزیت‌های ساخته شده با درصدهای جرمی متفاوت نانوذرات SnO<sub>2</sub>، بهترین پاسخگویی نسبت به گاز CO را نانوکامپوزیت PEDOT:PSS/(0.4wt%)SnO<sub>2</sub> (تهیه شده از نانوذرات SnO<sub>2</sub> با اندازه‌ی متوسط ۴۵nm) و نانوکامپوزیت PEDOT:PSS/(0.6wt%)SnO<sub>2</sub>

- System", *Revue Roumaine de Chimie*, Vol. 56, pp. 465-472, 2011
15. [15] X. Crispin, S. Marciniak, W. Osikowicz, G. Zotti, A.W. D. Van der Gon, F. Louwet, M. Fahlman, L. Groenendaal, F. De. Schryver and W.R. Salaneck, "Conductivity, Morphology, Interfacial Chemistry, and Stability of Poly(3,4-ethylene dioxothiophene) Poly(styrene sulfonate): A Photoelectron Spectroscopy Study", *Journal of Polymer Science B*, Vol. 41, pp. 2561-2583, 2003
  16. Y. Yang, Y. Jiang, J. Xu and J. Yu, "Conducting PEDOT-PSS composite films assembled by LB technique", *Colloids and Surfaces A*, Vol. 302, pp. 157-161, 2007
  17. W. S. Choi, "The Fabrication of Tin Oxide Films by Atomic Layer Deposition using Tetrakis (Ethylmethylamino) Tin Precursor", *Transaction on Electrical And Electronic Materials*, Vol. 10, pp. 200-202, 2009
  18. S. Javadpour, A. Gharavi, A. Feizpour, A.Khanehzar and F. Panahi, "Morpholine doped poly(3,4-ethylenedioxy) thiophene-poly (styrenesulfonate) as a low temperature and quick carbon monoxide sensor", *Sensors and Actuators B*, Vol. 142, pp. 152-158, 2009
  19. M.K. Ram, O. Yavuz and M. Aldissi, "NO<sub>2</sub> gas sensing based on ordered ultrathin films of conducting polymer and its nanocomposite", *Synthetic Metals*, Vol. 151, pp. 77-84, 2005
  9. X. Ma, G. Li, H.Z. Xu, M. Wang and H.Z. Chen, "Preparation of polythiophene composite film by in situ polymerization at room temperature and its gas response studies", *Thin Solid Film*, Vol. 515, pp. 2700-2704, 2006
  10. S.H. Hosseini and A.A. Entezami, "Chemical and electrochemical synthesis of homopolymer and copolymers of 3-methoxyethoxythiophene with aniline, thiophene and pyrrole for studies of their gas and vapour sensing", *Polymers for Advanced Technologies*, Vol. 19, pp. 524-534, 2001
  11. D.W. Hatchett and M. Josowicz, "Composites of Intrinsically Conducting Polymers as Sensing Nanomaterials", *Chemical Reviews*, Vol. 108, pp. 746-769, 2008
۱۲. ر. معمارزاده، س. جوادپور و ف. پناهی، "بهینه-سازی عوامل مؤثر بر اندازه نانوذرات اکسیدقلع به روش تاگوچی"، *مجله مواد نوین*، شماره ۷، ص ۱۱-۲۰، بهار ۱۳۹۱.
13. G.A. Sotzing, S.M. Briglin, R.H. Grubbs and N.S. Lewis, "Preparation and properties of vapor detector arrays formed from poly (3,4-ethylenedioxy)thiophene-poly(styrenesulfonate) /insulating polymer composites", *Analytical Chemistry*, Vol. 72, pp. 3181-3190, 2000
  14. S. Mihaiu, I. Atkinson, O. Mocioiu, A. Toader, E. Tenea and M. Zaharescu, "Phase Formation Mechanism in The ZnO-SnO<sub>2</sub> Binary

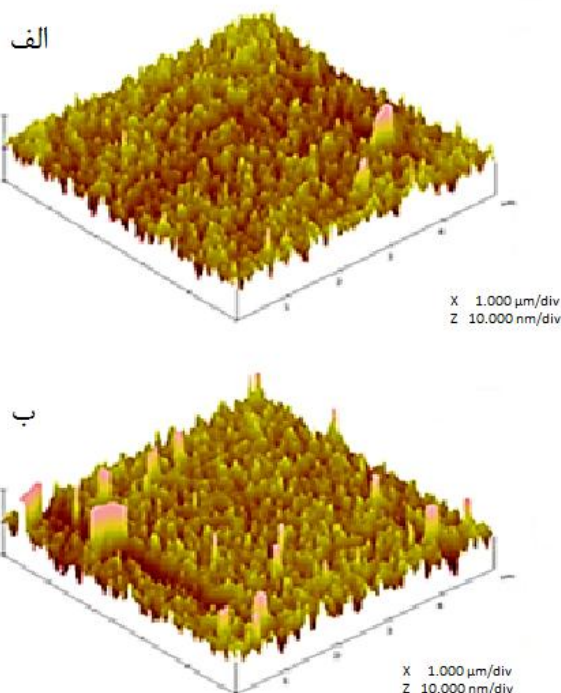
پیوست‌ها



شکل ۱- طیف FTIR پلیمر PEDOT:PSS خالص.

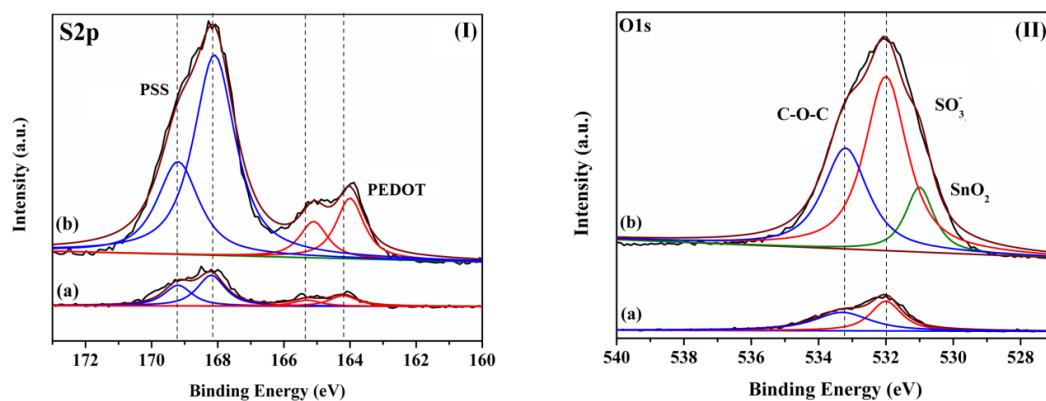


شکل ۲- طیف FTIR نانوکامپوزیت PEDOT:PSS/(0.5wt%)SnO<sub>2</sub>

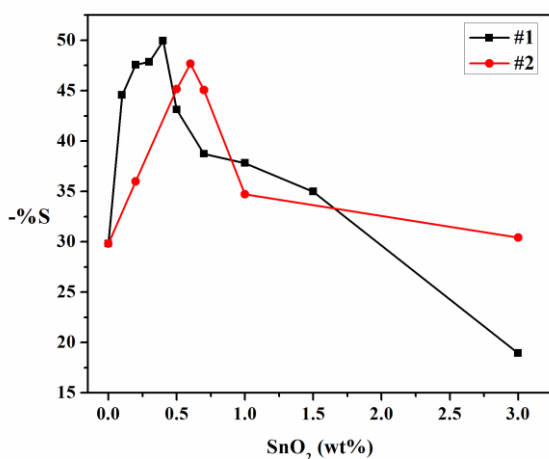


شکل ۳- تصویر AFM لایه PEDOT:PSS (الف) و نانوکامپوزیت PEDOT:PSS/(0.5wt%)SnO<sub>2</sub> (ب)

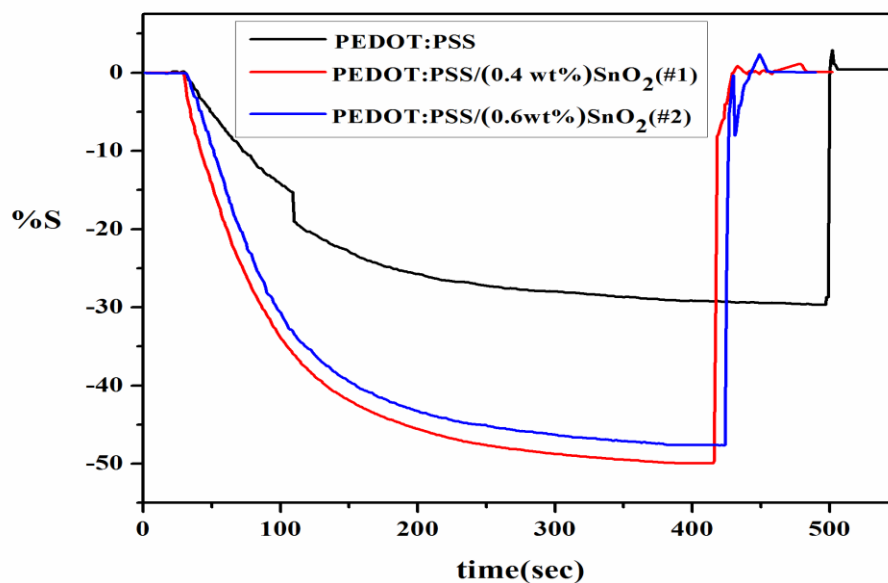




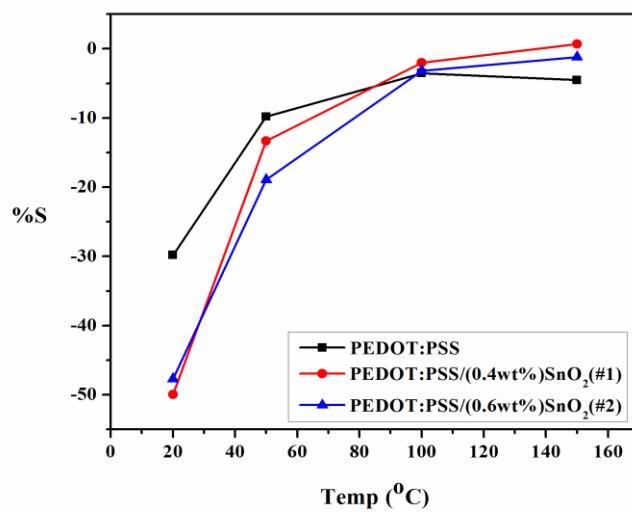
شکل ۴- طیف XPS مربوط به S2p (I) و O1s (II) برای PEDOT:PSS(a) و PEDOT:PSS/(1% wt)SnO<sub>2</sub> (b)



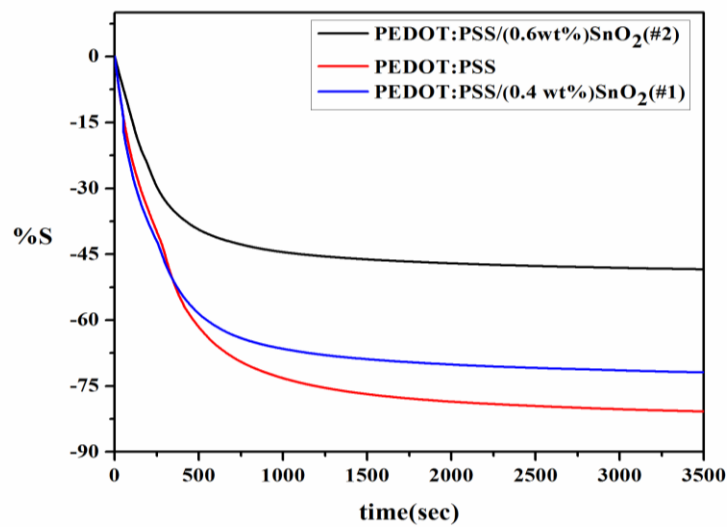
شکل ۵- پاسخگویی به گاز CO نانوکامپوزیت‌های PEDOT:PSS/SnO<sub>2</sub>(#1) و PEDOT:PSS/SnO<sub>2</sub>(#2) بر حسب درصد وزنی SnO<sub>2</sub>



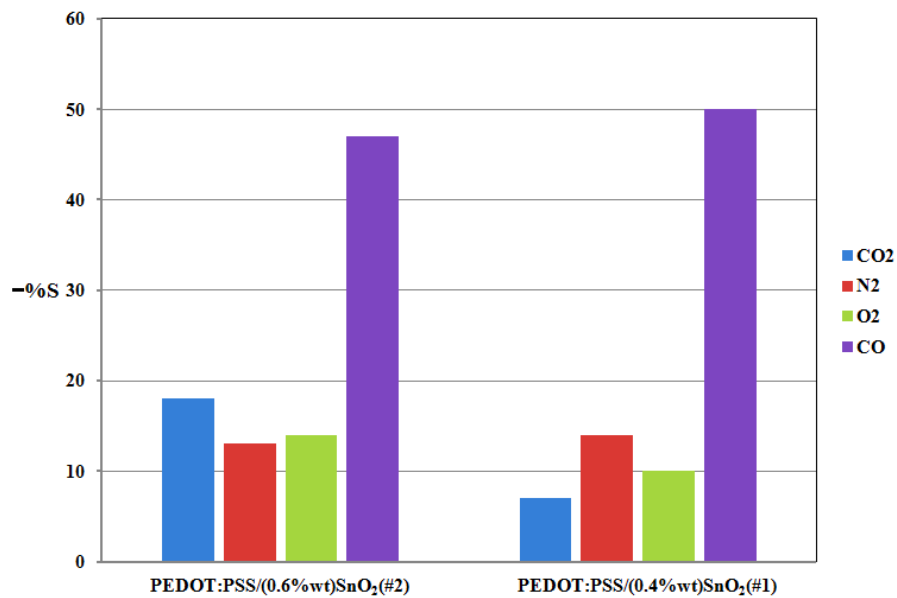
شکل ۶- پاسخگویی حسگرهای PEDOT:PSS و PEDOT:PSS/(0.4wt)SnO<sub>2</sub>(#1) و PEDOT:PSS/(0.6wt)SnO<sub>2</sub>(#2) به گاز CO نسبت به زمان.



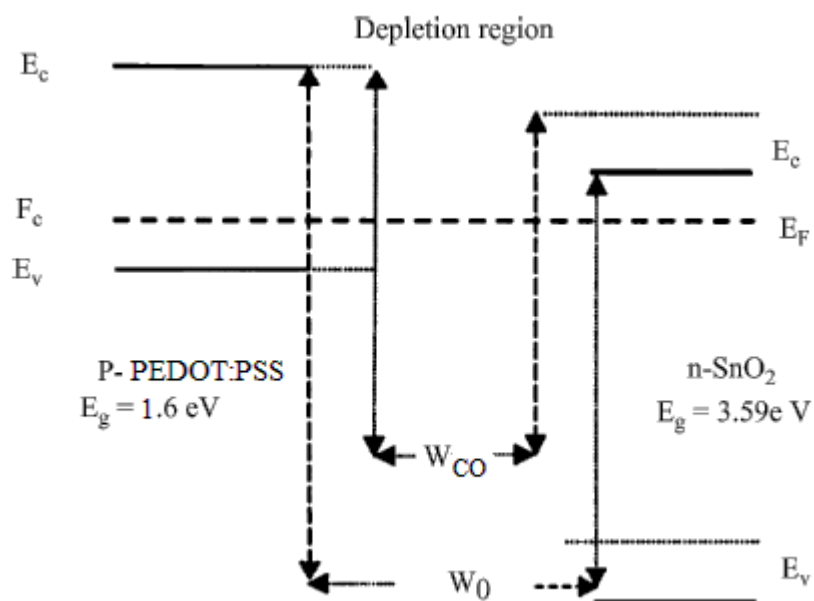
شکل ۷- پاسخگویی به گاز CO حسگرهای PEDOT:PSS و PEDOT:PSS/(0.4wt)SnO<sub>2</sub>(#1) و PEDOT:PSS/(0.6wt)SnO<sub>2</sub>(#2) نسبت به تغییرات دما.



شکل ۸- تاثیر از بین بردن رطوبت بر حسگرهای PEDOT:PSS و PEDOT:PSS/(0.4wt%)SnO<sub>2</sub>(#1) و PEDOT:PSS/(0.6wt%)SnO<sub>2</sub>(#2) نسبت به زمان.



شکل ۹- حساسیت به گازهای موجود در هوا برای حسگرهای نانوکامپوزیتی PEDOT:PSS/(0.4wt%)SnO<sub>2</sub>(#1) و PEDOT:PSS/(0.6wt%)SnO<sub>2</sub>(#2).



شکل ۱۰- سطوح انرژی پیوندگاه p-n. خط چین‌ها سطوح انرژی در مواجهه با گاز CO است [۱۹].