تحقیق و توسعه مواد پرانرژی

سال هفتم- شماره ۳ - شماره پیاپی ۱۵- زمستان ۱۳۹۰

نانو حسگرهای گازی برای آشکارسازی مواد منفجره

مصطفی نجفی[۱*] ، امین اعظم باغبانان[۲]

تهران، دانشگاه جامع امام حسین(ع)

E-mail: mnajafi2000@yahoo.com*

(تاریخ وصول: ۹۰/۷/۴، تاریخ پذیرش: ۹۰/۹/۱۲)

چکیده

آشکارسازی مواد منفجره همواره به دلائلی مانند فشار بخار کم، استفاده از ترکیبات انفجاری جدید، پنهان بودن مواد منفجره و شیوه‌های جدید به کارگیری با چالش‌هایی روبرو است. نانو حسگرها با افزایش حساسیت و گزینش‌پذیری و توانایی عمل در حالت‌های مختلف، پتانسیل گسترش تعداد زیادی حسگر برای آشکارسازی را در اختیار می‌گذارند. در این مقاله ضمن بحث در خصوص دلایل نیاز به آشکارسازهای بسیار حساس مواد منفجره، پیشرفت‌های انجام گرفته اخیر در زمینه توسعه حسگرهای توانمند شده با نانو فناوری شامل حسگرهای مقاومت شیمیایی مبتنی بر نانوذرات طلای عامل‌دار، نانوکامپوزیت پلیمری حاوی نانولوله‌های کربنی، نانو حسگرهای گازی مبتنی بر نانو ذرات یا نانو لوله‌های اکسیدهای فلزات نیمه هادی و حسگرهای نانوالکترومکانیکی معرفی شده و کارایی و مزایای این حسگرها برای آشکارسازی مقادیر کم مواد منفجره بررسی شده است.

واژه‌های کلیدی: آشکارسازی، نانو حسگر، حسگر گاز، نانو فناوری، مواد منفجره.

۱- مقدمه

تحقیق در زمینه آشکارسازی مواد منفجره با توجه به موج رو به گسترش استفاده از مواد منفجره در حملات تروریستی سبب شده است تا دستگاه‌های امنیتی در سراسر جهان با آشکارسازی مواد منفجره پنهان در وسایل شخصی، بسته‌های پستی، وسائل نقلیه و هواپیما به عنوان یک چالش اصلی مواجه باشند. با توجه به اینکه اغلب مواد منفجره دارای فشار بخارهای بسیار پایین هستند، مولکول‌های آن‌ها نمی‌توانند در زمانی معقول در یک مکان مشخص جمع شده و اثراتی قابل کشف و ردیابی داشته باشند، این مطلب مشکل آشکارسازی مواد منفجره را بسیار جدی تر می‌سازد[۱]. به همین دلایل، آشکارسازی و اندازه‌گیری مقادیر کم بخارات مواد منفجره و توسعه روش‌های نوین در این زمینه یکی از موضوعات مهم و مورد

۱- دانشیار

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد شیمی تجزیه

Archive of SID

www.SID.ir

توجه مراکز تحقیقاتی است. روش‌های آشکارسازی مواد منفجره را می‌توان به سه دسته کلی زیر طبقه‌بندی کرد[۵-۲]:

الف) آشکارسازی مقادیر توده‌ای[۳]: این دسته از روش‌ها بر اساس آشکارسازی نسبت عناصر اتمی تشکیل‌دهنده اکثر مواد منفجره (نیتروژن، اکسیژن، کربن و هیدروژن) یا کشف مواد متراکم که اغلب با یک روش تصویربرداری جفت شده است عمل می‌کنند. روش‌های تصویربرداری اشعه ایکس، روش‌های مغناطیسی، طیف‌سنجی تراهرتز و موج میلی‌متری از جمله روش‌های آشکارسازی مقادیر توده‌ای مواد منفجره هستند. این روش‌ها خیلی گزینش‌پذیر نیستند و تنها احتمال تهدید را مشخص می‌کنند.

ب) آشکارسازی مقادیر بسیار کم[۱]: در این گروه از روش‌ها، آشکارسازی با جمع‌آوری و پیش تغلیظ بخارات یا ذرات بسیار ریز مواد منفجره انجام می‌گیرد. برای آشکارسازی مقادیر بسیار کم بخارات مواد منفجره روش استشمام حیوانی[۶]، روش‌های مختلف کروماتوگرافی[۱۰-۷]، بینی‌های الکترونیکی[۲][۱۲و۱۱]، روش‌های طیف‌سنجی از قبیل، طیف‌سنجی رامان[۱۳]، طیف‌سنجی تحرک یونی[۱۵و۱۴]، طیف‌سنجی جرمی[۱۶]، حسگرهای جرمی[۱۷] و نوری[۱۸] ارائه گردیده است.

ج) آشکارسازی دور ایستا[۳]: این روش‌ها شامل استفاده از تابش‌های لیزر، مادون قرمز و امواج تراهرتز و تحلیل نورهای بازتابش شده برای تشخیص وجود مواد منفجره از فواصل دور به کار گرفته می‌شوند که در مراحل اولیه توسعه قرار دارند.

اغلب روش‌های دستگاهی ذکر شده گران قیمت، اندازه نسبتاً بزرگ، روش کار وقت‌گیر، نیاز به متصدی ماهر و مستلزم درجه‌بندی مکرر می‌باشند. به دلیل وجود این محدودیت‌ها، چنین سامانه‌هایی به طور پراکنده در برخی مکان‌های استراتژیک از قبیل فرودگاه‌ها و ساختمان‌های دولتی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در مکان‌هایی غیر از فرودگاه‌ها، از قبیل مکان‌های عمومی، شبکه‌های حمل و نقل، تأسیسات نظامی، و شبکه‌های جاده‌ای و به دلیل تعدد این مراکز، پیچیدگی استفاده از این سامانه‌ها افزایش یافته و هزینه‌های بسیار بالایی برای تأمین سامانه‌های آشکارسازی مورد نیاز خواهد بود. از مهم ترین ویژگی‌های آشکارساز مقادیر کم مواد منفجره در کاربردهای میدانی، حد تشخیص، حساسیت، گزینش‌پذیری و پایین بودن هزینه‌ی آن می‌باشد. حساسیت و گزینش‌پذیری بالا همراه با قابلیت تولید انبوه به دلیل هزینه پایین از جمله ویژگی‌هایی قابل انتظار از نانو حسگرها است. برای اجرای مداوم و پیوسته عملیات آشکارسازی، حسگر باید در دمای معمول دارای پاسخ سریع و برگشت‌پذیر باشد. حسگرهای فعلی نمی‌توانند برآورده کننده این الزامات باشند. با این وجود حسگرهای مبتنی بر نانوعلوم چشم‌انداز روشنی را برای دستیابی به این موارد مهم ارائه می‌دهند. بر همین اساس آشکارسازی مقادیر کم بخارات مواد منفجره با حسگرهای گازی مبتنی بر فناوری نانو طی چند سال اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است. در این تحقیق سعی شده است آخرین دستاوردهای ناشی از توسعه نانو حسگرها با قابلیت آشکارسازی بخارات مواد منفجره مورد بررسی و تحلیل قرار گیرد.

۲- انواع نانو حسگرهای گازی

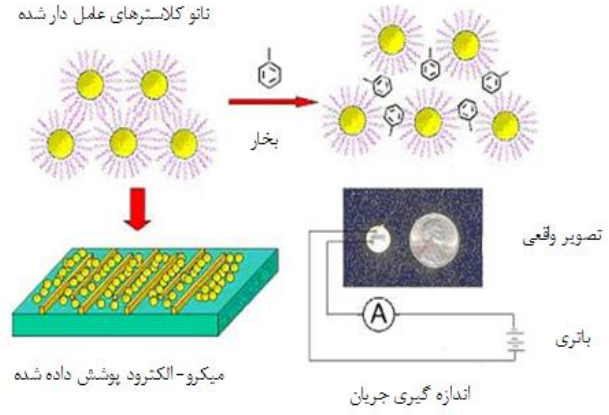
۲-۱- نانو حسگر مقاومت شیمیایی مبتنی بر نانو خوشه‌های طلا

حسگرهای مقاومت شیمیایی، میکرو حسگرهایی با قابلیت آشکارسازی ترکیبات آلی فرار در فاز بخار هستند. قسمت حساس این حسگرها شامل میکرو الکترودهای شانه‌ای پوشش داده شده با ترکیبات مختلف مانند فیلم‌های پلیمری، نانوذرات طلا یا پلاتین و یا نانو لوله‌های کربنی هستند. پاسخ دستگاه بر اساس اندازه‌گیری تغییر مقاومت بین میکرو الکترودها، طی عبور و جذب بخارات آنالیت از سطح میکرو الکترود و برهم‌کنش با لایه پوشش داده شده روی آن نسبت به عبور یک گاز شاخص مانند نیتروژن ثبت می‌شود. عملکرد این سامانه در شکل ۱ نشان داده شده است. جذب بخار آنالیت سبب تورم لایه حاوی نانو ذرات (یا سایر نانو مواد هادی پوشش دهنده سطح میکرو الکترود) شده و تغییر مقاومتی را ایجاد می‌کند که در محدوده‌های مختلفی به غلظت آنالیت وابسته است. مقالات متعددی از کاربرد نانو مواد در تهیه حسگرهای مقاومت شیمیایی برای تعیین بخارات آلی فرار منتشر شده است. اخیراً این نوع حسگر برای تعیین بخارات دی نیتروتولوئن **(رح‌پ)** و تری نیتروتولوئن **(رح‌ر)** در حضور پایدار

۱- گشم مخ‌رغ‌پ غ مجلا ر
۲- لغگل ح فعگ گلام مخ قپ
۳- گشم مخ‌رغ‌پ مغگ ء کم ذ

Archive of SID
www.SID.ir

کننده‌های آلکان تیولی مورد استفاده قرار گرفته است[۲۰و۱۹].



شکل ۱– مکانیسم عملکرد حسگرهای شیمیایی نوع مقاومتی مبتنی بر نانو خوشه‌های طلا[۲۰].

گزینش‌پذیری و حساسیت جذب بخار با تغییر ساختار شیمیایی پایدارکننده آلکان تیولی، قابل تنظیم و اصلاح می‌باشد. در مورد **رح‌پ** و **رح ر** مشخص شده است که حضور گروه‌های الکترون‌پذیر قوی در مولکول‌های بخار جذب شده با تغییر در دی الکتریک نانو خوشه‌های طلا منجر به تغییرات شدیدی در هدایت فیلم نشانده شده روی الکترودهای حسگر می‌شود. این نوع حسگر به دلیل اندازه کوچک، مصرف انرژی بسیار کم (زیر میکرو وات)، پاسخ سریع و هزینه کم قابلیت تبدیل به نسل جدیدی از حسگرهای قابل حمل آشکارساز عوامل سمی و بخارات مواد منفجره را دارد.

۲-۲- نانو حسگر گازی مبتنی بر نانو ذرات اکسیدهای فلزی نیمه هادی

اخیراً حسگرهایی شامل نانو ذرات اکسید روی دوپه شده[۱] با ترکیباتی مانند $_3$ **دچ‌ذ**، **چف ر**، $_5$ **دح‌ژ** و $_3$**حس** را برای بررسی چهار ماده منفجره آمونیوم نیترات ($_3$ **حح‌ث‌ح**)، مواد منفجره معدنی[۲] (**پچ**)، پیکریک اسید (**اخ**) و **رح‌پ** استفاده کرده‌اند[۲۱]. پس از تهیه نانو ذرات اکسید روی دوپه شده با ترکیبات مذکور مطابق با جدول ۱، فیلم نازکی از آن‌ها روی الکترودهای پلاتینی پوشش داده و در یک سامانه حسگر با قابلیت اندازه‌گیری مقاومت نصب می‌شود.

جدول۱– ترکیب درصد مواد خام سازنده فیلم حسگری در حسگرهای بهینه شده[۲۱]

شماره حسگر	ترکیب درصد موادخام
۱	($_2$ **قبح** ۱٪) نانوذرات **کشد**
۲	نانوذرات **کشد**
۳	(**چف ر** ۱٪) نانوذرات **کشد**
۴	($_3$**حس** ۱٪) نانوذرات **کشد**
۵	($_5$ **حد**$_2$ **ژ** ۵٪) نانوذرات **کشد**
۶	($_3$ **دچ‌ذ** ۵٪) نانوذرات **کشد**

ابتدا بخارات مواد منفجره روی یک رشته آلیاژی **غد م‌خ** که به یک منبع تغذیه متصل است به صورت کاتالیتکی به $_x$ **حد**، **حیث**، $_x$ **حح** و...، تجزیه می‌شوند. مواد منفجره مختلف مخلوط متفاوتی از این گازها را تولید می‌کنند به نحوی که مخلوط این گازها برای هر ماده منفجره مانند اثر انگشت عمل می‌کند. این مولکول‌های گازی اثر انگشتی سریعاً به اتاقک تست که حسگر در داخل آن قرار دارد منتقل می‌شوند. جذب سطحی این مولکول‌ها بر روی سطح حسگر باعث تغییر مقاومت شده که توسط سامانه اندازه‌گیری می‌شود.

بررسی پاسخ حسگرهای معرفی شده در جدول ۱ نشان می‌دهد که حسگر شماره ۴ (حسگر نانوذره‌ای **دکشد** دوپه شده با $_3$**حس**) بهترین حساسیت را برای سه ماده منفجره نیترات آمونیوم، ماده منفجره معدنی و اسید پیکریک دارد، اما برای **رح‌پ** حسگر شماره ۳ (حسگر نانوذره‌ای دوپه شده با **چف ر**) و حسگر شماره ۲ (حسگر نانوذره‌ای **دکشد**) بهترین حساسیت‌ها را نشان داده‌اند. حد تشخیص این نانو حسگرها برای این چهار ماده منفجره کمتر از **چ/غد** ۳/۴ گزارش شده است[۲۱].

۲-۳- نانو حسگر گازی مبتنی بر نانو لوله‌های تیتانیم اکسید (TiO_2)

طبیعت نیمه‌رسانا و مقاوم در برابر خوردگی نانو لوله‌های **چف ر**، آن‌ها را به عنوان ترکیبی ایده‌آل برای کاربردهای حسگری مطرح کرده است. نانو لوله‌های **چف ر** به طور وسیعی به عنوان حسگرها و آشکارسازهای نوری در کاربردهای بیوپزشکی، ذخیره سازهای هیدروژن و به عنوان الگو برای رشد نانو مواد تک بعدی استفاده می‌شوند[۲۲]. اخیراً تری استون تری پراکسید[۳] (**خ ر ار**) به عنوان

غ گ پ– ۱
ل ف گ د گ و ق ل غ ک چ– ۲

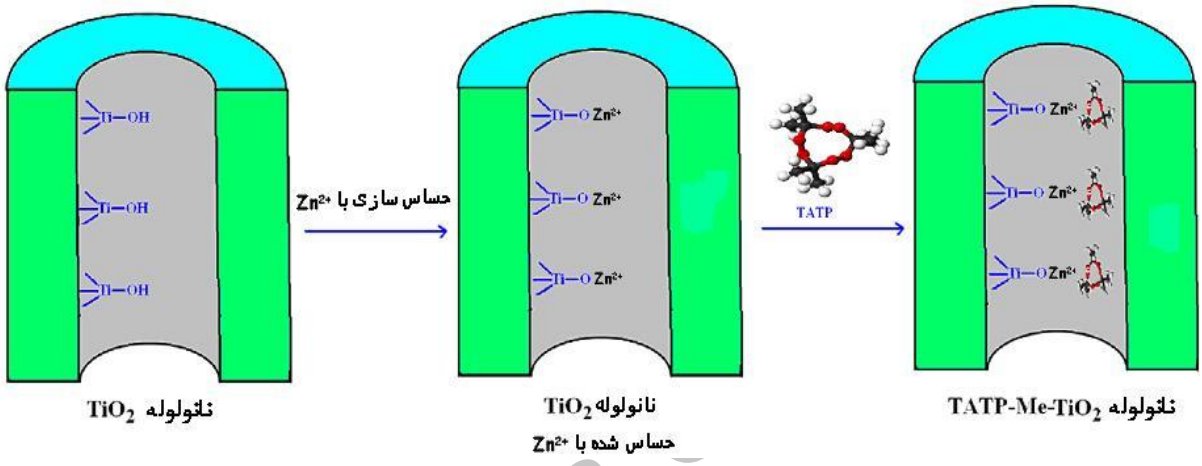
–۳ غ ه ق ه غ ک ع و غ ع– ۱،۲،٤،٥،٧،٨) غ ف گ ل غ گ ل م گ م غ غ ل ر
(غ ک گ گ و غ ع ۳،۳،۶،۶،۹،۹

Archive of SID
www.SID.ir

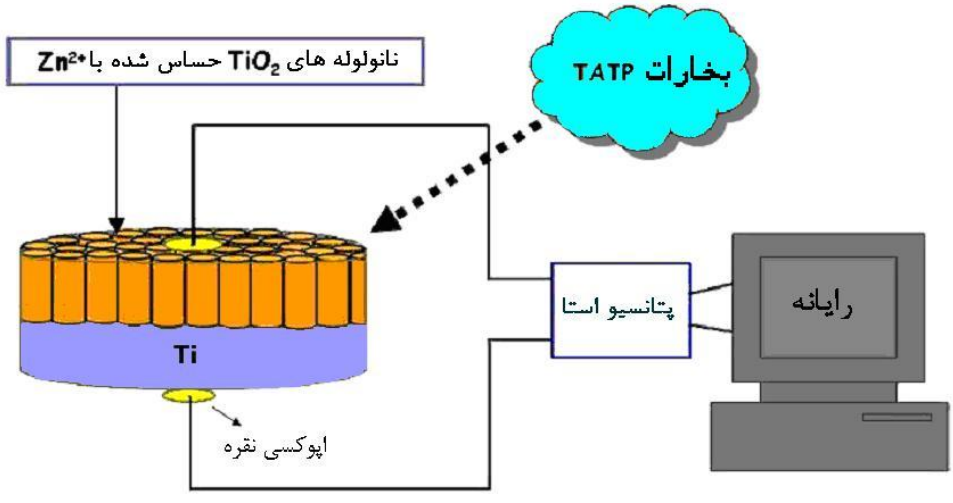
یک ماده منفجره دست ساز و بسیار قوی در عملیات‌های تروریستی در برخی کشورها به کار گرفته شده است. این ماده به آسانی تهیه می‌شود و از این رو تشخیص آن از اهمیت زیادی برخوردار است. روشی برای آشکارسازی بخارات **خ ر ار** بر مبنای اتصال **خ ر ار** به یون‌های فلزی و خواص نیمه‌رسانای آرایه‌هایی از نانو لوله‌های **جف ر** توسعه داده شده است[۲۳]. شکل ۲ شمایی از این مفهوم را نشان می‌دهد. پل بین نانو لوله‌های **جف ر** و اتصال **خ ر ار** به واسطه تعویض یون انجام گرفته (واکنش ۱) روی سطح نانو لوله‌های **جف ر** برقرار شده و آشکارسازی **خ ر ار** با استفاده از این آرایه‌های حسگری بوسیله سامانه‌ای که در شکل ۳ نشان داده شده است، انجام می‌گیرد.

واکنش ۱

$$۲Ti-OH + Zn^{+۲} \rightarrow ۲Ti-OZn + ۲H^{+}$$



شکل ۲- نمایی از فرایند حساس شدن نانو لوله‌ها با $^{2+}$**کش** و کوردینه شدن اکسیژن‌های **خ ر ار** با یون‌های روی[۲۳].



شکل ۳- سامانه آزمایشگاهی برای آشکارسازی **خ ر ار**[۲۳].

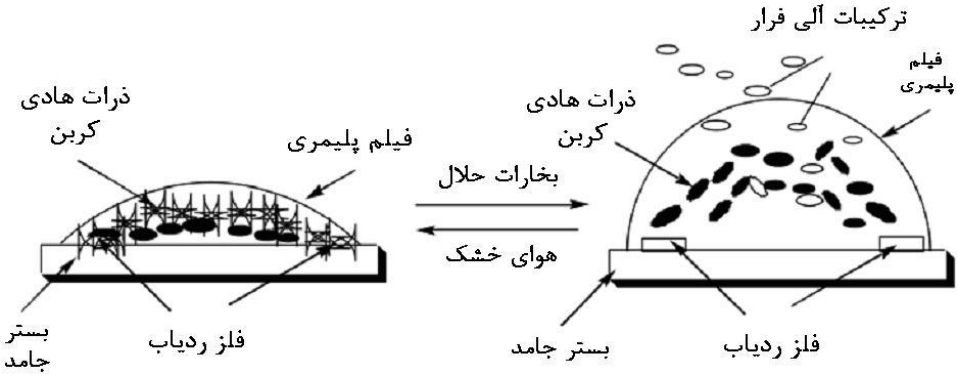
این نانو حسگر به یک پتانسیواستا متصل است و با اعمال پتانسیلی حدود ۰/۵ ولت، جریان پاسخی ایجاد می‌گردد که توسط دستگاه اندازه‌گیری می‌شود. پاسخ حسگر در غیاب بخارات **خ ر ار** در حدود $۱۰^{-۸}$ تا $۱۰^{-۹}$ آمپر است، اما هنگامی که بخارات **خ ر ار** در شرایط

www.SID.ir

آزمایشگاهی مشابه از حسگر عبور داده می‌شود تغییر تندی در جریان در حدود 10^{-3} تا 10^{-1} آمپر مشاهده می‌شود که نشان دهنده‌ی حساس بودن سامانه به بخارات **خ ر ا ر** می‌باشد. این آرایه حسگری می‌تواند هم به عنوان یک دستگاه کوچک دستی و هم به صورت سامانه‌های قابل حمل بزرگتر برای کاربردهای نظامی و امنیتی مورد استفاده قرار گیرد[۲۳].

۲-۴- نانو حسگر مقاومت شیمیایی کامپوزیتی MWNTs-PANI

نانو لوله‌های کربنی (**ا ر ح س چ**) به دلیل خواص منحصر به فرد مانند هدایت الکتریکی، انعطاف‌پذیری و سازگاری با انواع مواد آلی و معدنی به عنوان موادی با کاربردهای چندگانه مطرح شده‌اند. حسگرهای گازی ساخته شده با نانو لوله‌های کربنی در دمای اتاق کار می‌کنند [۲۴]، با این وجود به دلیل حساسیت پایین کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. پلیمرهای رسانا گروه مهم و جالب توجهی از رساناهای آلی برای دستگاه‌های الکترونیکی مولکولی می‌باشند. پلی‌آنیلین (**ژ خ ا خ**) یکی از رایج ترین پلیمرهای رساناست که به دلیل تهیه آسان، هزینه‌ی پایین تولید، پایداری محیطی بالا و هدایت الکتریکی به طور نسبی پایدار مورد توجه قرار گرفته است. با تلفیق خواص ویژه نانو لوله‌های کربنی و پلیمرهای رسانا و تهیه کامپوزیتی از این دو ترکیب (**ژ خ ا خ- ا ر ح س چ**)، نوعی حسگر گازی مقاومت شیمیایی حساس به بخارات مواد منفجره توسعه یافته است[۲۵]. شکل ۴ شمایی کلی از مکانسیم پاسخ نانو حسگر به بخارات آلی فرار (بخارات مواد منفجره) را نشان می‌دهد.



شکل ۴- مدل ساختاری **ژ خ ا خ- ا ر ح س چ** و چگونگی ایجاد پاسخ[۲۵].

نانو حسگر مقاومت شیمیایی در این تحقیق شامل یک میکرو الکترود شانه‌ای دارای ۱۲ جفت از الکترود طلا بر روی بستری از **ژ ف ذ** می‌باشد که توسط نانوکامپوزیت **ژ خ ا خ- ا ر ح س چ** پوشش داده شده و تغییرات مقاومت آن در حضور بخارات مواد منفجره اندازه‌گیری می‌شود. همان طور که در شکل ۴ ملاحظه می‌شود، یک سری شبکه‌های هادی در داخل فیلم نانوکامپوزیت پلیمری وجود دارد. زمانی که فیلم پلیمری در معرض بخارات مواد منفجره قرار می‌گیرد، مولکول‌های آنالیت روی فیلم پلیمری جذب سطحی می‌شوند. پیوند هیدروژنی اکسیژن گروه نیترو مولکول‌های مواد منفجره با هیدروژن‌های زنجیره‌های پلی آنیلین باعث تورم فیلم پلیمری شده که نتیجه آن افزایش حجم فیلم پلیمری، تغییر فاصله بین شبکه‌های هادی و نهایتاً کاهش رسانایی یا افزایش مقاومت فیلم پلیمری می‌باشد. مقاومت نمونه‌های فیلم حسگری در مقابل غلظت‌های [۱] **ک گ گ** ۱۰۰، ۲۵۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ بخارات مواد منفجره شامل پیکریک اسید، دی نیتروتولوئن و تری نیتروتولوئن مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که ترکیبی از ۱٪ وزنی S **ا ر ح س چ** و ۱، ۵ و ۱۰٪ وزنی **ژ خ ا خ**، فیلم‌های پلیمری با حساسیت بالا، گزینش‌پذیری عالی، ثبات و پایداری زیادی برای بخارات **ا خ** و **ر ح پ** فراهم کرده است. حد تشخیص این نانو حسگر حساس به بخار در حد **ک گ گ** و زمان- پاسخ آن حدود چند ثانیه می‌باشد. به طور کلی نتایج این مقاله نشان داده است که آشکارسازی برخی از مواد منفجره توسط نانوکامپوزیت پلیمری **ژ خ ا خ- ا ر ح س چ** با روش الکتریکی امکان‌پذیر است[۲۵].

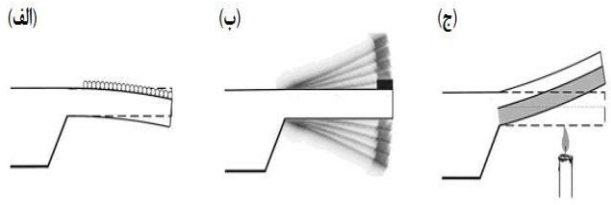
۱- گ ف ف ک لا گ م لا خ

www.SID.ir

۲- ۵- حسگرهای نانوالکترومکانیکی

در ادامه توسعه سامانه‌های میکروالکترومکانیکی[1] (ذ چ چ) روش نسبتا جدید دیگری برای آشکارسازی مقادیر کم بخارات مواد منفجره، استفاده از سامانه‌های نانوالکترومکانیکی[2](ذ چچ) می‌باشد. انتظار می‌رود سامانه‌های نانوالکترومکانیکی(ذ چچ(با استفاده از فرایندهای ساخت بالا به پایین، عملکرد فیزیکی بهتری برای انواع مشخصی از مبدل‌های علائم نشان دهند[۲۶]. ریزتیرک‌ها[3] به عنوان یکی از سامانه‌های مبتنی بر ذ چ چ و ذ چچ اساس دسته‌ی نسبتاً جدیدی از حسگرهای گازی و مایع را تشکیل می‌دهند. ریزتیرک قطعه‌ای بسیار نازک است که یک انتهای آن به تکیه‌گاه متصل است و ضخامتی کمتر از یک میکرومتر دارد. ریزتیرک‌ها معمولاً از سیلیکون، سیلیکون نیترید و یا سیلیکون اکسید ساخته می‌شوند. در سال‌های اخیر ریزتیرک‌ها به دلیل داشتن ویژگی‌هایی از قبیل حساسیت جرمی بالا، اندازه بسیار کوچک، دقت بالا، برگشت‌پذیری خوب در میکروسکوپ نیروی اتمی[4] (چ ا)، میکروربات‌ها، اندازه‌گیری سرعت امواج صوتی، اسکنر نوری، تصویربرداری از زمین، ذخیره‌سازی داده‌ها، حسگر سیالات، حسگرهای شیمیایی و حسگرهای نانومکانیکی برای آشکارسازی واکنش‌های شیمیایی و بیوشیمیایی در هر دو فاز گازی و مایع، استفاده شده‌اند. ریزتیرک‌ها دارای سه مد عملیاتی مختلف، استاتیکی، دینامیکی و حرارتی می‌باشند که در شکل ۵ نشان داده شده‌اند. حسگرهای مبتنی بر ریزتیرک می‌توانند در محیط‌های مختلف از قبیل، خلا، هوا و مایعات عمل کنند. مزیت‌های مهم این حسگرها، اندازه بسیار کوچک، زمان پاسخ بسیار کم و حساسیت بالا می‌باشد[۲۷].

این نوع از نانو حسگرها به دو نوع دارای گیرنده[5] و بدون گیرنده[6] طبقه‌بندی می‌شوند. حسگرهای بدون گیرنده بر اساس اندازه‌گیری خواص فیزیکی، ترمودینامیکی، شیمیایی یا نوری عمل می‌کنند. حسگرهای دارای گیرنده به دلیل یک برهم‌کنش خاص بین مولکول گیرنده و آنالیت (مواد منفجره) دارای گزینش‌پذیری بهتری هستند.



شکل ۵- نمایی از مدهای عملیاتی ریزتیرک‌ها، (الف) مد استاتیکی، (ب) مد دینامیکی و (ج) مد حرارتی[۲۷].

اخیراً آشکارسازی مقادیر م[7]گگ ۳۰-۱۰ از پنتااریتریتول تترانیترات (ح رخ) و هگزاهیدرو-۱و۳و۵-تری آزین (سپد) در طی ۲۰ ثانیه توسط ریزتیرک سیلیکونی انجام شده است. لایه نازکی از طلا روی سطح ریزتیرک سیلیکونی قرار دارد که توسط لایه‌ای از مرکاپتو بنزوییک اسید[8](٤ اب چ-) به روش خود تجمعی[9] اصلاح شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد آشکارسازی مستقیم سپد و ح رخ در حد م[7]گگ و در مدت چند ۱۰ ثانیه امکان‌پذیر است و می‌توان بر این اساس دستگاه‌های قابل حمل بسیار حساس و گزینش‌پذیری برای آشکارسازی بخارات این مواد منفجره طراحی نمود[۲۸].

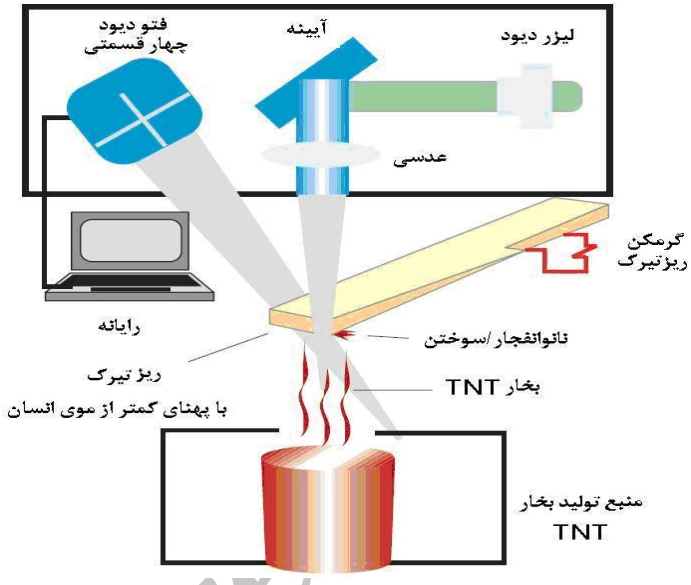
نوعی دیگری از نانو حسگر الکترومکانیکی بر اساس مد عملیاتی حرارتی برای آشکارسازی بخارات مواد منفجره توسط محققین آزمایشگاه ملی آک ریج[10] در حال توسعه است[۲۹]. در این حسگر یک ریزتیرک با یک فیلم فلزی پوشش داده شده و ترکیبی دو فلزی را تشکیل می‌دهد که به تغییرات دما بسیار حساس است (شکل ۶). در این سامانه، هوای شامل بخارات مواد منفجره به درون اتاقکی که ریزتیرک در آن قرار دارد کشیده می‌شود. طی نمونه برداری مولکول‌های بخار مواد منفجره روی سطح ریزتیرک که قبلاً تا دمای بالا بوسیله یک سامانه ویژه حرارت داده شده جذب سطحی می‌شوند. به دلیل دمای جرمی پایین ریزتیرک می‌توان آنرا طی چند ثانیه تا چند صد درجه سانتی‌گراد حرارت داده و تا دمای اتاق سرد کرد. چون ریزتیرک قبلاً حرارت داده شده، مولکول‌های جذب سطحی شده‌ی ماده منفجره متحمل سوختن (نانو انفجار) می‌شوند و سبب تغییر و

۱- [illegible]
۲- [illegible]
۳- [illegible]
٤- [illegible]
۵- [illegible]
۶- [illegible]
۷- [illegible]
۸- [illegible]
۹- [illegible]
۱۰- [illegible]

Archive of SID
www.SID.ir

انحراف زیاد و ناگهانی تیرک می‌گردند، که به عنوان پاسخ حسگر قابل ثبت است. این ریزتیرک‌های سیلیکونی یک دهم موی انسان پهنا دارند و یک دیود نوری، نیروهای بسیار کوچک ایجاد شده توسط نانو انفجارهای القا شده توسط حرارت را تشخیص می‌دهد. افزایش خطی دمای ریزتیرک نسبت به زمان اجازه تشخیص مواد منفجره مختلف را مطابق با دمای احتراق آنها نشان می‌دهد.

به عنوان مثال اگر **رح ر** حضور داشته باشد وقتی ریزتیرک تا ۵۷۰ درجه سانتی‌گراد حرارت داده شده و به مدت ۰/۱ ثانیه در این دما نگه داشته شود یک انفجار کوچک صورت می‌گیرد که بیانگر حضور **رح ر** است. با توسعه این سامانه حساسیتی در دامنه چند **م‌گگ** برای آشکارسازی **رح ر** حاصل می‌شود.



شکل ۶– طرح شماتیک آشکارسازی با سامانه ریزتیرک مبتنی بر نانو انفجار[۱۱].

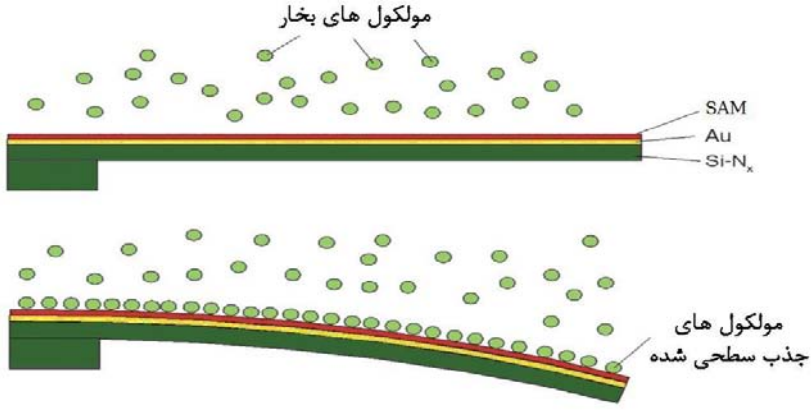
نوعی دیگری از نانو حسگرهای مبتنی بر ریزتیرک بدون پوشش برای آشکارسازی **رح ر** به واسطه جرم حرارتی[1] کم ریزتیرک براساس فرایندهای حرارتی بنا نهاده شده است[۳۱و۳۰]. هنگامی که ریزتیرکی که مواد منفجره‌ی روی آن جذب سطحی شده با سرعت)$^{-1}$ر .گ(10^5 حرارت داده می‌شود، ماده‌ی منفجره متحمل سوختن و تجزیه می‌شود. حرارت دادن ریزتیرک در چنین سرعت بالایی، بوسیله‌ی عبور یک جریان پالسی از ریزتیرک (**ن ۱۰و لک ۱۰**) کامل می‌گردد. در طی حرارت دادن، دمای ریزتیرک از دمای اتاق تا نزدیک) **گ°** ۵۰۰ افزایش می‌یابد. خمش تفاضلی ریزتیرک با و بدون ماده‌ی منفجره‌ی جذب سطحی شده، منجر به یک پاسخ مربوط به سوختن[2] از **رح ر** می‌گردد. میزان حساسیت ۴۰ پیکو گرم برای حسگرهای ریزتیرکی مبتنی بر سوختن **رح ر** بدست آمده است. در این روش، ریزتیرک در انتهای هر چرخه کاری به طور خود به خودی تمیز می‌گردد. همچنین این روش به صورت بالقوه قابلیت کوچک سازی را دارد.

اثرات القایی- جذب سطحی- مولکولی، فرصت‌های بی نظیری را برای اندازه‌گیری مقادیر کم مواد منفجره ارائه می‌دهد. حسگرهای نانوالکترومکانیکی مبتنی بر ریزتیرک‌ها که بر اساس جذب سطحی عمل می‌کنند[۳۴-۳۲] می‌توانند برای آشکارسازی مقادیر کم بخارات مواد منفجره نیز به کار روند. در این روش وقتی ریزتیرک در معرض بخارات مواد منفجره قرار می‌گیرد، مولکول‌های مواد منفجر بر روی سطح ریزتیرک جذب سطحی می‌شوند، اگر جذب سطحی مولکولی به یک طرف ریزتیرک محدود شود، ریزتیرک به خاطر نیروهای جذب سطحی متحمل خمش می‌شود. ریزتیرک با ثابت‌های فنری بسیار پایین (بسامد همنوای[3] پایین) برای مد عملیاتی خمش حساسیت

۱- لاع کقع کلاغ غر
۲- غ‌اگ گلاغ گشم‌غلا غ‌غقغ‌پ
۳- ه‌کغ مل‌غلاغ غ‌ه‌کغ گ‌لاغلا

www.SID.ir

بالایی را نشان می‌دهد. شکل ۷ مکانیسم خمش یک نانو حسگر مبتنی بر ریزتیرک که بر اساس جذب سطحی عمل می‌کند را نشان می‌دهد[۳۵]. بسامد همنوای یک ریزتیرک با جذب سطحی تغییر می‌کند، حساسیت اندازه‌گیری به بسامد همنوای ریزتیرک بستگی دارد. نیرویی که باعث خم شدن ریزتیرک می‌شود مستقل از جرم ماده‌ی جذب سطحی شده است و فقط به انرژی اتصال برهم‌کنش ماده جذب شده- سطح بستگی دارد.



شکل ۷- مکانیسم پاسخ یک ریزتیرک با پوشش پلیمری مبتنی بر جذب سطحی جرمی[۳۵].

در سال ۲۰۰۴ پینادویج و همکارانش نانو حسگری مبتنی بر جذب سطحی را برای آشکارسازی بخارات دی نیترو تولوئن (**رح‌پ**) با حساسیت بالا، پاسخ برگشت‌پذیر و حد تشخیص **م‌گگ** ۳۰۰ و زمان-پاسخ حدود چند ثانیه ارائه دادند[۳۶]. این ریزتیرک دارای پوشش پلیمری پلی [۱- (۴- هیدروکسیل-۴- ری فلوئورو متیل- ۵، ۵، ۵- تری فلوئورو) پنت-۱- انیل) متیل سیلوکسان][۱] (**ث‌سذ**) می‌باشد. ریزتیرک به محض جذب بخارات **رح‌پ** خم می‌شود. برای ایجاد پاسخ، ریزتیرک در طی یک چرخه ابتدا برای ۵ ثانیه در معرض مخلوط هوا**رح‌پ** قرار می‌گیرد و سپس برای ۱۵ ثانیه با همان سرعت جریان در معرض هوا قرار می‌گیرد. پاسخ خمشی این نانو حسگر بر حسب نانومتر نسبت به زمان (ثانیه) اندازه‌گیری می‌شود. حساسیت این نانو حسگر معادل با **ع‌گگک‌ک** ۴/۵ برای **رح‌پ** بدست آمده است.

در سال ۲۰۱۱ آقای ویبین ژئو[۲] و همکارانش نانو حسگری ترکیبی، مبتنی بر ریزتیرک و گیرنده‌های رنگ سنجی[۳] ارائه دادند. در این حسگر از گیرنده‌های مولکولی که به عنوان حسگر شیمیایی برای آشکارسازی مواد منفجره نیترو آروماتیکی عمل می‌کند استفاده شده و حساسیت این حسگر برای بخارات تری نیترو بنزن **ع‌گگ** ۱۰ بدست آمده است[۳۷].

۳- نتیجه گیری

اخیراً حسگرهای توانمند شده با فناوری نانو برای آشکارسازی مواد منفجره به دلیل حساسیت و گزینش‌پذیری مناسب بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. این مقاله پیشرفت‌های گزارش شده اخیر در زمینه نانو حسگرهای آشکارساز بخارات مواد منفجره را ارائه کرده و کارایی آن‌ها را مورد بررسی قرار داده است. با توجه به اینکه فشار بخار اکثر مواد منفجره بسیار پایین است نیاز به آشکارسازهایی بسیار حساس یک ضرورت انکار ناپذیر است. نانو حسگرهای معرفی شده در این مقاله دارای خواص بسیار خوب حسگری شامل حساسیت بسیار بالا (حد تشخیص‌های بسیار پایین در حد **م‌گگ** بویژه در مورد حسگرهای مبتنی بر ریزتیرک)، اندازه کوچک، مقدار آنالیت مورد نیاز کم برای آنالیز (میکرولیتر)، زمان پاسخ نسبتاً کم، نیاز به توان پایین، کاربرد برای مواد منفجره مختلف هستند. انتخاب نانوحسگر با توجه به نوع

۱- ۱م کغ گلگ مقلام-۵،۵،۵-قه غغ کگگ مقلام-٤-ه گلاعه غ-٤)-۱)گقمق- ث‌سذ
ض‌غ کغ گقف‌قه غغ ک(قه کغ
۲- مغشقکفخغس
۳- لگم کغ مغلافعلاغ کفلگگ ب

Archive of SID
www.SID.ir

انتظار از فرایند حسگری می‌تواند انجام گیرد. به طور کلی هنگامی‌که زمان پاسخ سریع و اندازه کوچک آشکارساز سادگی عملکرد و هزینه پایین مورد نیاز باشد حسگرهای مقاومت شیمیایی می‌توانند به عنوان گزینه برتر مورد توجه باشند. از طرف دیگر زمانی که حد تشخیص‌های بسیار پایین مورد نیاز باشد حسگرهای نانو الکترومکانیکی می‌توانند گزینه برتر باشد. به طور کلی همه این نانو حسگرها به دلیل داشتن مجموعه ایی از ویژگی‌های فوق می‌توانند برای آشکارسازی مقادیر بسیار کم بخارات مواد منفجره به صورت سامانه‌های قابل حمل در محیط‌های عملیاتی استفاده شوند. به همین دلیل تحقیق و توسعه چنین حسگرهایی در مراکز علمی و تحقیقاتی بسیار معتبر در حال انجام است.

مراجع

[illegible] J. [illegible] ۲۰۰۷, ۱۴۴, ۱۵-۲۸.

[illegible] ۲۰۰۶. [illegible]

[illegible] ۲۰۰۳, ۸۳, ۳۱-۵۵.

[illegible] ۲۰۰۴ [illegible] ۲۰۰۵, ۸۸۶۱ [illegible] ۲۳-۶۹.

[illegible]

[illegible] ۲۰۰۵, ۶۷, ۳۱۳-۳۲۷.

[illegible] ۲۰۰۷, ۷۲, ۱۵۸۱-۱۵۸۵.

[illegible] ۲۰۰۷, ۱۴۷, ۶۹۱-۶۹۷.

[illegible] ۱۹۹۴, ۶۷۴, ۳۰۹-۳۱۸.

[illegible] ۲۰۰۱, ۵۴, ۴۲۷-۴۳۸.

[illegible] ۲۰۰۳, ۷۵, ۹۸-۱۰۵.

[illegible] ۲۰۰۰, ۶۹, ۴۱۰-۴۱۹.

[illegible] ۲۰۰۵, ۳۸, ۱۷-۲۸.

[illegible] ۲۰۱, ۵۴, ۵۱۵-۵۲۹.

[illegible] ۱۰۰, ۱۷۶, ۶۹۲-۶۹۶.

[illegible] ۲۰۰۶, ۷۰, ۴۵۵-۴۵۹.

[illegible] ۲۰۰۹, ۱۳۵, ۳۹۹-۴۱۰.

[illegible] ۲۰۰۰, ۷۲, ۱۹۴۷-۱۹۵۵.

www.SID.ir

[illegible] ۲۰۰۱, ۶۳۹-۶۴۷.

[illegible] ۲۰۰۸, ۱۱, ۲۸-۳۷.

[illegible] s."; J. [illegible] ۲۰۰۹, ۱۶۴, ۱۰۳۰-۱۰۳۵.

[illegible] ۲۰۰۸, ۲۴, ۱۱۲۷۶-۱۱۲۸۱.

[illegible] ۲۰۰۹, ۲۰, ۱-۶.

[illegible] ۲۰۰۵, ۱۰۵, ۲۰۹-۲۱۴.

[illegible] s."; M [illegible] ۲۰۰۹, ۲۷, ۵۰۹-۵۲۰.

[illegible] ۲۰۰۴, ۷۶, ۱۸۸۵-۱۸۹۵.

[illegible] s." [illegible] ۲۰۰۵, ۳۰-۳۶.

[illegible] ۲۰۰۰, ۸۲, ۱۱-۱۶.

[illegible] ۲۰۰۱, ۳۳۲.

[illegible] s."; P [illegible] ۲۰۰۶, ۶۲۲۳.

[illegible] ۲۰۰۴, ۹۵, ۵۸۷۱-۵۸۷۶.

[illegible] ۲۰۰۳, ۸۳, ۱۲۴۰-۱۲۴۲.

[illegible] s."; Rev. [illegible] ۲۰۰۴, ۷۵, ۲۲۲۹-۲۲۵۲.

[illegible] ۲۰۰۶, ۶, ۵۸۳-۵۸۶.

[illegible] ۲۰۰۸, ۱۱, ۲۸-۳۶.

[illegible] s."; S [illegible] ۲۰۰۴, ۹۹, ۲۲۳-۲۲۹.

[illegible] ۲۰۱۱, ۹۸, ۱۲۳۵۰۱-۱۲۳۵۰۳.

Archive of SID

www.SID.ir