

آشکارسازی مقادیر کم مواد پُرانرژی مبتنی بر پلیمرهای فلورسانس کننده

عباس کبریتیچی^{۱*}، محمد الله قلی^۲

۱- دکترای مهندسی پلیمر ۲- کارشناسی ارشد
۱- دانشگاه جامع امام حسین (ع) ۲- دانشگاه تهران
*Email: a.kebritchi@ippi.ac.ir
(تاریخ وصول: ۹۴/۱۲/۱، تاریخ پذیرش: ۹۵/۵/۲۷)

چکیده

در سال‌های اخیر با رشد روزافزون اقدامات تروریستی در دنیا، شگردهای نوین در بسته‌بندی، استفاده و انتقال مواد منفجره، آشکارسازی و بالابردن ضریب امنیتی مناطق حساس از اهمیت ویژه‌ای برخوردار شده است. در میان معدود فناوری‌های موجود، جهت آشکارسازی مقادیر کم مواد منفجره، استفاده از پلیمرهای مزدوج با در نظر گرفتن مولفه‌های یک ابزار مناسب میدانی و عملیاتی (دقت و سرعت) توانسته دقت آشکارسازی سگ‌سانان را در قالب یک ابزار الکترواپتیکی بدون محدودیت و مشکلات این جانوران ارائه کند. در این روش آشکارسازی، یک سیسم ملکولی از مونومرهای فلورسانس تشکیل می‌شود که با حضور آنالیت مناسب (ماده منفجره شناسایی شونده) فلورسانس این پلیمر تضعیف یا خاموش می‌شود. دستگاه‌های تجاری ساخته شده براساس این پلیمرها دارای ساختار ساده، وزن کم، دقت و سرعت بالا هستند. در این مقاله حد الامکان تلاش شده گزارش جامع و کاملی از نحوه آشکارسازی مواد منفجره به وسیله پلیمرهای مزدوج، عوامل مؤثر در این فرایند، ابزارهای تولید شده در این حوزه و آخرین پژوهش‌های انجام شده ارائه شود. بررسی‌های انجام شده در این مقاله نشان می‌دهد حضور عوامل تأثیرگذار از جمله گروه‌های پنتیپتیسین و افزایش غلظت پلیمر (از محلول رقیق به فیلم) موجب افزایش میزان خاموشی و بالاتر رفتن دقت و حساسیت آشکارسازی می‌شود، همچنین نیترو آروماتیک‌ها، مخصوصاً TNT و DNT توسط بیشتر پلیمرها آشکارسازی می‌شوند. این پلیمرها بیشترین دقت آشکارسازی (ppq)، سریعترین زمان شناسایی (۱۰ ثانیه) و سبک‌ترین دستگاه‌ها (۱/۵ kg) را نسبت به سایر روش‌ها دارا می‌باشند، اگرچه از نظر فاصله آشکارسازی از هدف محدودیت‌هایی دارند.

کلمات کلیدی: آشکارسازی مقادیر کم مواد منفجره - پلیمرهای فلورسانس - پلیمرهای مزدوج - خاموش کننده فلورسانس - فیدو

Trace Detection Tools of Energetic Materials using Fluorescence Polymers

A. Kebritchi^{1*}, M. Allah Gholi²

1- Imam Hossein Comprehensive University, Tehran
2- Tehran University

(Received: 05/31/2015, Accepted: 17/8/2016)

Abstract: In recent years with the growing terrorist and subversive activities in the world, detection, prevent and already increasing the security factor of military and sensitive areas has become very important. Among the few existing technologies, to detect traces of explosives, use of conjugated polymers have better condition rather than other technology and can present canine sensitivity in frame of electro optic device. In this detection method a molecular wire of florescence monomers form which in the presence of analyte florescence of polymers will be quenched, this phenomenon converts to an electronic or optic response through transducer. Commercialized detection tools based on these polymers contain simple structure, low weight, high precision and detection speed. In this article it is tried to present a comprehensive report of explosive detection by means of conjugated polymers, effective factors in this process, manufactured tools and last published achievements. Studies in this article show the presence of Pentiptycene groups and increasing polymer concentration (from solution to film) cause more quenching and more precise detection. Also, Nitroaromatics such as TNT, DNT are usually detected by conjugated polymers. These polymers own highest detection precision (ppq), fastest detection time (10 s) and lightest tools (1.5 kg) in comparison to other methods, although there are some limitations in detection distance from the aim.

Keywords: Detection of Trace Explosives, Fluorescence Polymers, Conjugated Polymers, Fluorescence Quenching and FIDO.

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر با رشد سریع و متنوع گروهک‌های تروریستی و جریان‌های فکری خطرناک در جهان، تحقیقات و پژوهش‌ها در زمینه آشکارسازی مواد منفجره به صورت توده^۱ و مقادیر بسیار کم^۲ با سرعت بالا پیگیری شده و حاصل این تحقیقات ارائه فناوری‌های نوین و تولید ابزارهای عملیاتی و آزمایشگاهی مبتنی بر آن فناوری‌ها بوده است. در مبحث آشکارسازی مقادیر کم مواد منفجره، فناوری‌های متفاوتی نظیر طیف سنجی تحرک یون، استفاده از حیوانات آموزش دیده (سگ، موش و زنبور عسل)، روش‌های نوری و بینایی الکترونیکی ارائه شده است. همچنین تلاش‌های زیادی جهت ساخت ابزارهای عملیاتی با تکیه بر این فناوری‌ها صورت گرفته است [۱]. در این میان، تحقیقات در زمینه استفاده از پلیمرهای مزدوج فلورسانس^۳ برای آشکارسازی مواد منفجره از اوایل دهه ۱۹۹۰م با جدیت بیشتری دنبال شد. با پیشرفت تحقیقات در زمینه طراحی و سنتز پلیمرهای مزدوج فلورسانس و با در نظر گرفتن عوامل مؤثر بر آشکارسازی مواد منفجره پلیمرهای فلورسانس کننده‌ای به دست آمدند که قادر به آشکارسازی اکثر مواد منفجره در غلظت‌هایی حتی کمتر از حد آشکارسازی سگسانان (ppq)^۴ در زمان بسیار کوتاه و با دقت بسیار خوب می‌باشند [۲]. بر این اساس ابزار آشکارسازی مقادیر کم مواد منفجره، فیدو^۵، توسط ایالات متحده در قالب‌های مختلف متناسب برای شرایط مختلف طراحی و ساخته شدند که در ادامه علاوه بر بررسی مکانیزم آشکارسازی، این ابزارها نیز معرفی می‌شوند [۳].

۲- مفاهیم و تعاریف

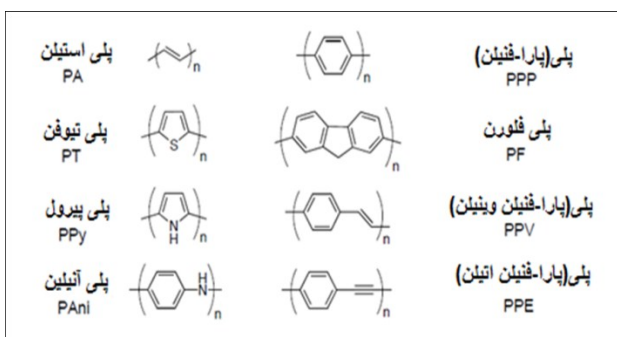
۲-۱- فشار بخار مواد منفجره

مقدار فشار بخار با قدرت نیروهای جاذبه بین ذرات تشکیل دهنده مواد نسبت عکس دارد. فشار بخار مواد منفجره در دمای محیط بسیار پایین (از ppm^۶ تا ppq) می‌باشد. به عنوان مثال، در گروه نیتروآروماتیک‌ها، تری‌نیتروتولون (TNT) دارای فشار بخار 10^{-6} torr و در گروه نیترات استرها، پنتا‌ترینیتول تترانیترات (PETN) $3/10^{-10}$ torr و در گروه نیتروآمین‌ها تری‌نیتروتتری‌آزاسیکلو‌هگزان (RDX) $1/4 \times 10^{-9}$ torr می‌باشد. فشار بخار بسیار کم بیانگر این موضوع می‌باشد که مولکول‌های این ماده به راحتی جذب سطح می‌شوند [۴، ۵]. از آنجائیکه در نمونه‌ی رسیده به حسگر تعداد مولکول‌های مواد منفجره بسیار کم است، ردیابی مواد منفجره کار بسیار دشواری است. به همین علت روش‌های آشکارسازی این‌گونه

مواد بسیار محدود است و یک حسگر ردیاب باید حساسیت بالایی داشته باشد. علاوه بر این به منظور عملیات ممتد آشکارسازی، حسگر باید مصرف انرژی کمی داشته باشد [۱].

۲-۲- پلیمرهای مزدوج و تئوری نوار

پلیمرهای مزدوج که در زمره پلیمرهای رسانا و نیمه‌رسانا قرار می‌گیرند، معمولاً ماکرو مولکول‌هایی هستند، که دارای زنجیره‌ی اصلی با پیوندهای یگانه و دوگانه می‌باشند. برهم‌کنش بین اوربیتال‌های مولکولی در طول زنجیره‌ی اصلی منجر به یک سیستم بسط داده‌شده با الکترون‌های پای غیرمستقر می‌شود. این سیستم‌های مزدوج الکترون پای، به علت خواص الکترونیکی و نوری بسیار مورد توجه می‌باشند. ساختار چند پلیمر مزدوج معمول در شکل (۱) نشان داده شده‌اند [۶].



شکل ۱- انواع پلیمرهای مزدوج [۷].

در دهه پنجاه قرن بیستم پلیمرها با مقاومت سطحی بالاتر^۷ ۱۰ اهم-سانتیمتر، به عنوان مواد عایق الکتریکی به عنوان پوشش سیم‌های الکتریکی، دستکش‌های عایق، کلیدهای عایق و غیره استفاده شدند [۸]. پلیمرهای ذاتاً عایق در ساختار خود با زنجیره بلند و اشباع کووالانسی فاقد الکترون آزاد و در دسترس می‌باشند. پیوند یگانه در ترکیبات آلی توسط پیوند سیگما^۸ (اوربیتال سیگما) و پیوند دوگانه توسط هر دو پیوند سیگما و پای^۹ تشکیل می‌شود. پیوند دوگانه از هم‌پوشانی جانبی اوربیتال‌های پای^۹ جفت نشده عمودی هر دو اتم کربن تشکیل می‌شود. بر اساس تئوری اوربیتال مولکولی دو الکترون پای پیوند دوگانه که در اوربیتال اتمی^{۱۰} هستند (قبل از پیوند) (AO)، در اوربیتال پیوندی مولکولی پای^{۱۱} (MO) قرار می‌گیرند و اوربیتال ضد پیوندی^{۱۲} (π -MO) خالی می‌ماند. آخرین اوربیتال‌های پیوندی (MO) که پر شده هستند (هومو^{۱۳}) و پایین‌ترین اوربیتال‌های ضد

7- Sigma bonds (σ bonds)

8- Pi bonds (π bonds)

9- Atomic Orbital (p)

10- Atomic orbital

11- Bonding π -Molecular orbital (MO)

12- Antibonding π -MO (π -MO)

13- Highest Energy Occupied Molecular Orbital (HOMO)

1-Bulk

2- Trace

3- Fluorescence

4- Parts Per Quadrillion (ppq)

5- Fido

6- Part Per Million (ppm)

۲-۳- برانگیختگی و آسایش

الکترون‌ها که به صورت معمول در لایه ظرفیت قرار می‌گیرند، با جذب انرژی به لایه هدایت منتقل می‌شوند. به زوج الکترون-حفره ای که به این ترتیب ایجاد می‌شوند اکسایتون^{۱۱} گفته می‌شود. به تفاوت انرژی بین لایه ظرفیت و هدایت، باند گپ گفته می‌شود. مقدار باند گپ بسته به نوع ترکیب نیمه‌هادی متفاوت است. بنابراین الکترونی که با دریافت انرژی به لایه بالاتر رفته است، مایل است تا با از دست دادن انرژی به راه‌های مختلف به حالت پایه خود بازگردد و به آسایش برسد [۷]. یکی از این راه‌ها آزاد کردن انرژی به صورت نور می‌باشد که از آن با عنوان فوتولومینسانس^{۱۲} یاد می‌شود. حفره یا اکسایتون نیز حرکت کرده و برخلاف رسانایی در فلزات که فقط توسط الکترون‌های آزاد شکل می‌گیرد، در نیمه‌رساناها و پلیمرهای مزدوج حفره و الکترون با هم و به موازات هم (در لایه‌های رسانش و ظرفیت) حرکت می‌کنند و رسانش را موجب می‌شوند. اگرچه طول عمر الکترون برانگیخته محدود می‌باشد و الکترون به حفره شکل گرفته فرود آمده و به آسایش می‌رسد [۱۱-۱۲].

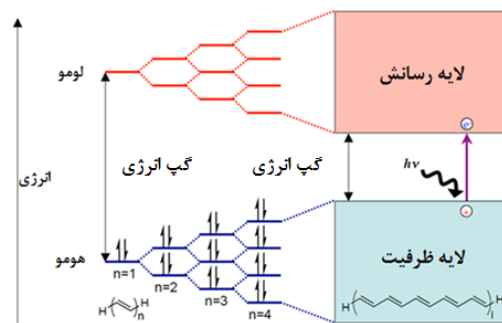
فلورسانس یکی از انواع فوتولومینسانس است که در آن اتم‌ها یا مولکول‌ها، امواج الکترومغناطیس (همان انرژی فوتون‌ها) را جذب کرده، برانگیخته می‌شوند و در بازگشت به حالت پایه نیز، انرژی اضافی خود را در قالب فوتون از دست می‌دهند. اگر به هر نحوی در به آسایش رسیدن الکترون توسط فلورسانس اختلالی ایجاد شود، شدت این نور ساطع شده کم شده و یا به‌طور کامل قطع می‌شود که به این پدیده خاموشی^{۱۳} می‌گویند. خاموشی نیز معلول چند پدیده از جمله حضور آنالیت‌ها با الکترون‌خواهی بالا در نقطه فرود الکترون به حفره می‌باشد که این مهم‌ترین و اصلی‌ترین نشانه جهت آشکارسازی این مواد می‌باشد. در واقع تغییر شدت فلورسانس یا خاموشی کامل آن مؤید حضور مواد و آنالیت‌هایی مدنظر می‌باشد [۷].

۳- خاموش‌سازی فلورسانس توسط آنالیت

انتقال غیرتابشی الکترون و انرژی، بین مولکول فلورسانس و یک نوع دیگر از مولکول (Q) می‌تواند حالت برانگیختگی را غیرفعال کند. این روش غیرفعال‌سازی با فلورسانس در غیرفعال کردن برانگیختگی رقابت کرده و شدت فلورسانس را تضعیف می‌کند. این مکانیسم خاموش‌سازی فلورسانس در حسگرهای شیمیایی استفاده می‌شود. پاسخ حسگرهای فلورسانس را می‌توان با استفاده از پلیمرهای مزدوج فلورسنت تقویت کرد. خاموش‌سازی فلورسانس در شکل (۳) قابل مشاهده می‌باشد [۱۳].

پیوندی که اشغال نشده‌اند (لومو^۱) نام دارند. پلیمرهای مزدوج الکترون-پای شامل پیوندهای متوالی یگانه و دوگانه هستند. از این قبیل پلیمرها می‌توان به پلی استیلن^۲، پلی آنیلین^۳، پلی پرول^۴، پلی تیوفن^۵، پلی فوران^۶، پلی فنیلن^۷ و پلی کربازول^۸ و غیره اشاره کرد [۹].

همانند پلیمرهای دیگر زنجیر پلیمرهای مزدوج از اتم کربن و یا اتم کربن با اتم‌های درشت تشکیل شده‌اند که همه اتم‌ها در پیکر زنجیر توسط اوربیتال‌های sp^2 جفت شده و به هم متصل شده‌اند. البته یک اوربیتال پی (جفت نشده) در هر اتم به صورت عمود بر زنجیر پلیمر باقی‌مانده است و همه‌ی این اوربیتال‌ها باهم موازی می‌باشند. سرانجام این اوربیتال‌های پی از طریق زنجیر پلیمر با اوربیتال‌های کناری خود همپوشانی جانبی می‌کنند و اصطلاحاً دچار عدم استقرار^۹ می‌شوند (یک لحظه با سمت راستی خود و لحظه‌ای دیگر با سمت چپی خود). در واقع عدم استقرار بدین معنی است که این اوربیتال‌ها در نقطه خاصی باهم همپوشانی نمی‌کنند و حالت رزونانس دارند. به علت تعداد بالای کربن در زنجیر بلند پلیمر توزیع انرژی هومو و لومو نهایی بسیار پیچیده و به هم نزدیک می‌باشد. درواقع گپ انرژی^{۱۰} با بیشتر شدن تعداد واحدهای پلیمری کمتر می‌شود. شکل (۲) شکافت انرژی در اثر اتصال واحدهای پلیمری (مونومر) به هم (مزدوج شدن) را نشان می‌دهد. با طراحی این دسته از پلیمرها و کم کردن فاصله لایه ظرفیت و رسانش در واقع پلیمر به حالت نیمه‌رسانا تا رسانا تبدیل می‌شود و این امکان را می‌دهد تا در صنایع الکترونیکی و شیمیایی به صورت گسترده‌ای از این پلیمرها استفاده شود. همچنین با مزدوج شدن این مونومرها و کاهش گپ انرژی پلیمرها، خواص نوری آن‌ها از جمله فلورسانس بهبود پیدا می‌کند (شکل ۲) [۷-۱۰].

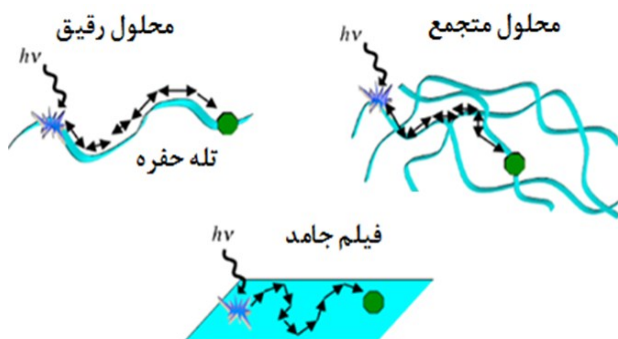


شکل ۲- افزایش تعداد واحدها، فشرده شدن سطوح انرژی، کاهش گپ انرژی با افزایش تعداد حلقه‌ها و طول پلیمر و توزیع نهایی لومو و هومو [۷].

- 1- Lowest Unoccupied Molecular Orbital (LUMO)
- 2- Polyacetylene
- 3- Polyaniline
- 4- Polypyrrole
- 5- Polythiophene
- 6- Polyfuran
- 7- Poly Phenylene
- 8- Polycarbazole
- 9- Delocalization
- 10- Band Gap

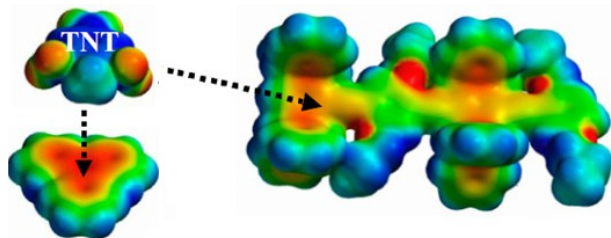
11- Exciton
12- Photoluminescence
13- Quenching

هم نزدیک شوند، خودشان برانگیختگی زنجیره‌های کناری را خنثی می‌کنند که به این حالت خود خاموشی^۱ می‌گویند. درواقع زمانی که حالت محلول این پلیمرها به صورت رقیق باشد، انتقال حفره تقریباً به صورت یک‌بعدی می‌باشد، وقتی محلول غلیظ باشد، انتقال تقریباً دو بعدی است و در حالت فیلم انتقال به صورت سه بعدی می‌باشد. افزایش ابعاد حرکتی حفره از حالت محلول رقیق به محلول غلیظ و فیلم در شکل (۴) نشان داده شده است [۷، ۱۹].

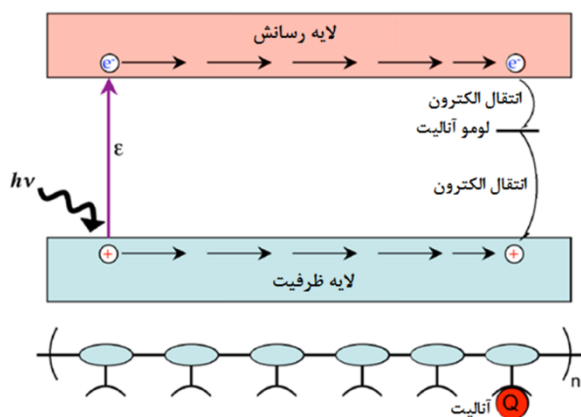


شکل ۴- افزایش ابعاد حرکتی در پلیمر از محلول رقیق به فیلم. در حالت های فیلم و محلول غلیظ پلیمرهای بیشتری اطراف یک شاخه پلیمر هستند و حرکت در ابعاد مختلف را ممکن می‌سازند [۷].

همچنین با حرکت از محلول رقیق به فیلم تجمع بیشتر می‌شود. به علت مزیت‌های فراوان فیلم نسبت به محلول دانشمندان تلاش کردند تا به مشکل تجمع غلبه کنند. بدین منظور تلاش شد تا با اضافه کردن گروه‌های بزرگ و سخت فضایی به ستون پلیمر از نزدیک شدن خیلی زیاد آن‌ها و ساخته شدن تجمع جلوگیری شود. یکی از گروه‌های مخصوصی بدین منظور گروه پنتیپتیسین^۲ می‌باشد. این گروه یک گروه بزرگ و سخت و سه‌بعدی می‌باشد که فضای اطراف پیکره پلیمر را به خوبی پر می‌کند. نیروی دافعه بین این گروه‌ها باعث می‌شود این پلیمرها به هم نزدیک نشوند، اما فاصله آن‌ها در حدی باقی می‌ماند که حفره بتواند انتقال سه‌بعدی بین زنجیره‌ها داشته باشند. گروه‌های پنتیپتیسین در شکل (۵) به صورت شماتیک و برجسته قابل مشاهده می‌باشند [۳، ۲۰].



شکل ۵- گستره ملکولی پلیمر به همراه گروه پنتیپتیسین. با حضور گروه‌های پنتیپتیسین در ستون پلیمر علاوه بر رعایت حداقل فاصله، فضای جدیدی برای نفوذ آنالیت به داخل پلیمر به وجود می‌آید [۳].



شکل ۳- حضور آنالیت در منطقه آسایش و خاموشی فلورسانس. در واقع آنالیت با حضور در مسیر آسایش آن را دو مرحله‌ای کرده و نور ناشی از تک مرحله‌ای بودن فلورسانس را حذف می‌کند [۷].

انتقال الکترون در خاموشی فلورسنت عملی ترین و کارآمدترین روش انتقال سیگنال برای تشخیص مواد منفجره است. زیرا مواد منفجره، به خصوص (TNT)، اغلب در مولکول خود با کمبود الکترون مواجه هستند که به راحتی الکترون از مواد فلورسنت برانگیخته شده می‌گیرند. همچنین مواد منفجره‌ای که TNT دارند، معمولاً حاوی مقداری DNT هستند. به طور کلی، تماس بین پذیرنده الکترون خوب و دهنده الکترون فلورسنت خاموشی فلورسانس می‌دهد. اگر انرژی لومو گیرنده کمتر از لومو دهنده نباشد انتقال الکترون از لحاظ انرژی نامطلوب بوده و خاموشی فلورسانسی رخ نمی‌دهد. در واقع برای انتقال مناسب بین دهنده الکترون و پذیرنده باید پتانسیل اکسایش دهنده، از اندازه (قدر مطلق) پتانسیل کاهش پذیرنده بیشتر باشد و هر چه این اختلاف بیشتر باشد انتقال بهتر شکل می‌گیرد [۳، ۱۶].

۴- عوامل مؤثر بر خاموش سازی فلورسانس توسط آنالیت

همه عواملی که منجر به دسترسی بهتر، بیشتر و آسان تر آنالیت به حفره شوند و همچنین میزان خاموشی فلورسانس توسط آنالیت را تقویت کنند، آشکارسازی این آنالیت‌ها را توسط خاموشی فلورسانس بهبود می‌بخشند.

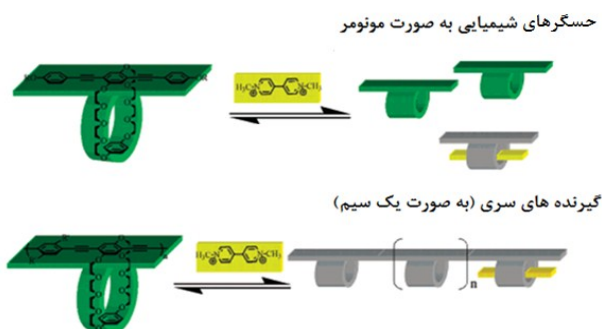
۴-۱- افزایش ابعاد حرکتی حفره

همان طور که گفته شد مواد منفجره دارای فشار بخار بسیار کمی هستند، به عبارت دیگر تعداد مولکول‌های مواد منفجره که باید در پلیمر نفوذ کنند و با پلیمر تعامل داشته باشند، بسیار کم می‌باشند، به همین علت برای آشکارسازی این مولکول‌های اندک که در پلیمر نفوذ می‌کنند باید حفره حداکثر فعالیت و حرکت خود را در جهت‌های مختلف داشته باشد. به همین منظور اگر زنجیره‌های پلیمر را به هم نزدیک شوند، الکترون و حفره این قابلیت را دارند که از یک زنجیره به زنجیره دیگر رفته و این گونه احتمال برخورد حفره با مولکول ماده منفجره بالاتر می‌رود [۱۷-۱۸]. البته اگر زنجیره‌ها بیش از اندازه به

1- Self-quenching
2- Pentyptecene

۴-۲- تقویت پلیمرها

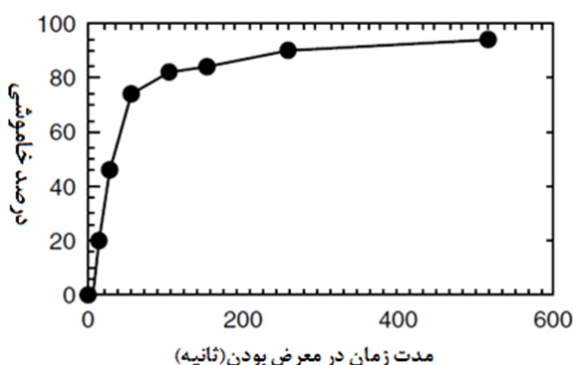
اگر مونومرهای فلورسانس که از لحاظ پتانسیل کاهش و اکسایش مناسب خاموش سازی فلورسانس توسط مواد منفجره باشند را تعداد زیادی لامپ روشن در یک سالن بزرگ در نظر گرفت که هیچ ارتباطی به همدیگر ندارند، با حضور یک مولکول ماده منفجره، تنها یکی از این لامپها خاموش شده و تأثیری بر روشنایی سالن ندارد. برای حل این مشکل و آشکار سازی همان یک مولکول و یا تعداد اندک مولکول ماده منفجره، باید تمام لامپهای سالن به صورت سری به هم متصل شوند تا با خاموشی یکی از آنها تمام سالن خاموش شود و متوجه حضور ماده منفجره شد. تقویت^۱ در پلیمرهای مزدوج نیز دقیقاً به این صورت انجام می‌شود. مونومرهای فلورسنت که هر کدام در نقش یک گیرنده ماده منفجره هستند، به صورت سیم مولکولی به هم متصل می‌شوند و مولکول منفجره که با هر کدام از مونومرها تعامل برقرار کند، فلورسانس کل سیم قطع می‌شود و با این کار میزان خاموشی از حضور یک مولکول منفجره چندین برابر می‌شود. این رویداد در شکل (۶) به وضوح قابل مشاهده است [۲].



شکل ۶- تقویت خاموشی به وسیله اتصال مونومرها [۲].

۴-۳- مدت زمان در معرض بودن آنالیت و پلیمر

همانطور که در شکل (۷) مشخص است، هر چه مدت زمان بیشتری پلیمرهای شناساگر در معرض مواد منفجره و آنالیت ها قرار بگیرند، خاموشی شکل گرفته بیشتر می‌شود، اگرچه بیشترین خاموشی به علت تقویت پلیمرهای مزدوج در همان زمان‌های ابتدایی مشاهده می‌شود [۱۹].



شکل ۷- رابطه مدت زمان حضور آنالیت در کنار پلیمر و درصد خاموشی [۱۸].

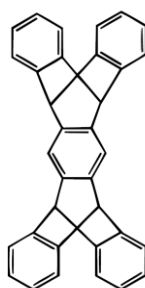
۵- مکانیزم‌های دیگر آشکار سازی

روش آشکار سازی مواد با خاموشی فلورسانس نه فقط برای مواد منفجره که برای مواد مختلف شیمیایی و بیوشیمیایی استفاده می‌شود. از آنجایی که اکثر مواد منفجره به‌ویژه TNT، DNT و RDX که تقریباً در تمام مواد منفجره کاربرد دارند دارای کمبود الکترون هستند، از مکانیزم آشکار سازی خاموشی استفاده می‌شود. اما بعضی از مواد که الکترون دهی بسیار بالاتری نسبت به حسگر پلیمر مزدوج دارند، با حضور خود در زنجیره‌های پلیمر ایجاد فلورسانس کرده و اصطلاحاً با مکانیزم روشنی^۲ آشکار سازی می‌شوند. لازم به ذکر است برای آشکار سازی این مواد باید تمام عوامل خاموش کننده از پلیمر حذف شوند که این کار بسیار مشکلی می‌باشد. اما گزینش پذیری^۳ (پیدا کردن یک مولکول خاص مدنظر) این روش از روش خاموشی بیشتر بوده، ولی حساسیت روش خاموشی به مراتب بالاتر است. در یک سطح تاریک یک سیگنال تازه را می‌توان به راحتی آشکار سازی کرد، اما آشکار سازی تغییر سیگنال (روشن به روشن تر) بسیار سخت می‌باشد. وقتی زمینه فلورسنت باشد از لحاظ حساسیت روش روشن شدن به خاموش شدن هیچ برتری ندارد. برای آشکار سازی رد مواد در محیط‌های پیچیده مکانیسم روشن شدن مزیت گزینش پذیری بیشتر را نیز دارد، چرا که به علت وجود مواد تداخل کننده در محیط که سبب ایجاد اختلال می‌شوند، فرایند خاموشی نایجا توسط این مواد برخلاف فرایند روشن شدن انجام می‌پذیرد و دقت و گزینش پذیری را کم می‌کند. در شکل (۸) نقش ابعاد حرکت و نوع مکانیسم که مربوط به حساسیت حسگر می‌باشد نشان داده شده است. همان طور که در شکل (۸) مشاهده می‌شود، حساسیت در هر دو مکانیزم از حالت محلول رقیق به فیلم افزایش می‌آید [۲].

2- Un-quenching
3- Selectivity

1- Amplification

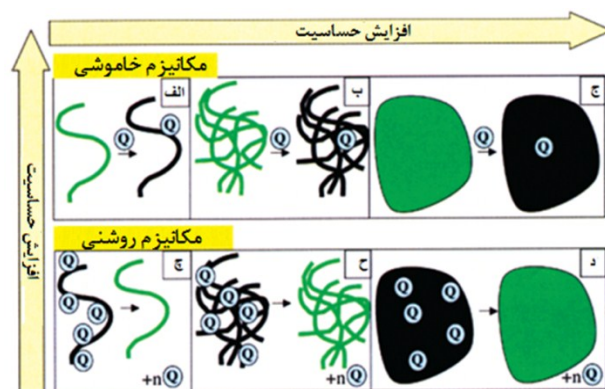
آشکار سازی می شوند، اگرچه پلیمر های خاصی برای آشکار سازی فقط PA و DMNB در جدول حضور دارند. چون بیشتر مواد منفجره در ترکیبات خود TNT و DNT را دارند، این موضوع مویید این است که قریب به اتفاق مواد منفجره توسط بیشتر پلیمر های سنتز شده آشکار سازی می شوند. البته فرای از بحث دقت و جامعیت در آشکار سازی یک پلیمر، موضوع سنتز آسان، کم هزینه و پایدار نیز به شدت مطرح است و تمام تلاش ها برای سنتز پلیمر های بهتر و جدید تر در این راستا بوده است.



شکل ۹- ساختار شیمیایی گروه سه بعدی صلب پنتیپتیسین [۲۲]

۷- ساختار حسگر های مبتنی بر پلیمر های مزدوج فلورسانس تقویت شده

تحقیقات در زمینه استفاده از پلیمر های مزدوج در آشکار سازی مواد منفجره، مخدر و مولکول های زیستی مهم به طور جدی از اواسط دهه نود میلادی پیگیری شد و نتیجه این تحقیقات در سال های بین ۲۰۰۳ تا هم اکنون با تولید ابزار های مختلف آشکار سازی بر پایه پلیمر های مزدوج به ثمر نشست. در واقع این موضوع که هم اکنون با موضوعات محوری فناوری روز از جمله نانو آمیخته شده جز مباحث به روز علمی-کاربردی صنایع نظامی و پزشکی می باشد. حسگر هایی مختلفی که هسته اصلی آن ها پلیمر های مزدوج بوده و تضعیف در فلورسانس تولیدی پلیمر به علت حضور مواد منفجره را توسط حسگر های نوری به سیگنال الکترونیکی و غیره تبدیل می کنند، توسط محققین و شرکت های مختلف از اواخر دهه نود میلادی طراحی و آزمایش شدن که اولین بار شرکت ICx موفق به تولید ابزار دستی فیدو^۴ کرد که در غالب عملیات میدانی با موفقیت آزمایش شد و تاکنون نسخه های پیشرفته تر آن برای آشکار سازی مواد منفجر در شرایط مختلف تولید شده است. اما هسته اصلی همه این دستگاه ها شامل یک سیستم تحریک کننده نوری، یک سیستم هدایت کننده نور های منتشر شده فلورسانس به سمت حسگر نوری و یک فیلتر نوری که فقط امواج و نور های تولیدی با طول موج خاص از آن می توانند



شکل ۸- مقایسه حساسیت در مکانیزم های خاموشی و روشنی در حالت های محلول رقیق، غلیظ و فیلم. همان گونه که مشخص است برای مکانیزم روشنی باید تمام عوامل خاموش کننده (Q) از پلیمر جدا شوند که این کار، بسیار دشوار می باشد [۲].

۶- انواع پلیمر های مزدوج فلورسانس کننده

این پلیمر های مختلف که از دهه نود میلادی کار و تحقیقات بر روی آن ها شروع شده در سه حوزه پلی اتیلن فنیلین ها^۱، پلی فنیلین وینیلین ها^۲ و پلیمر های حاوی سیلول و سیلافلورن^۳ تقسیم بندی می شوند. در سال های اخیر بیشتر تحقیقات حول پلیمر های دسته سوم بوده است. تحقیقات بسیاری جهت طراحی و سنتز پلیمر هایی با خواص مناسب جهت آشکار سازی بهتر، دقیق و جامع مواد منفجره صورت گرفته و این موضوع هم اکنون نیز جزء موضوع های جذاب برای پژوهشگران می باشد. در جدول ۱ اطلاعات کلی پلیمر های مزدوج فلورسانسی که طی دو دهه گذشته طراحی و سنتز شده اند، گردآوری و تدوین شده است. مقایسه این پلیمر ها با یکدیگر در رابطه با میزان خاموشی و حساسیت در شرایط یکسان انجام شده است [۲۱].

همچنین این فناوری با فناوری های روز دنیا از جمله نانو و غیره همسو شده و پیشرفت شگرفی در ویژگی های عملیاتی این پلیمر ها از جمله حساسیت، گزینش پذیری، دقت، گستره مواد قابل آشکار سازی، زمان آشکار سازی، زمان شروع مجدد کار، نحوه پاک سازی ماده منفجره از پلیمر و همچنین ویژگی های عملیات ابزار از قبیل قابلیت ثبت و آنالیز داده ها، ساختار فیزیکی، ابعاد، وزن، طول عمر باتری، عمر قطعه های تعویضی ابزار حاصل شده است. با توجه به جدول (۱) می توان به صراحت اعلام کرد که مکانیزم خاموشی برای بیشتر پلیمر ها استفاده شده است و حضور عوامل تاثیر گذار از جمله گروه های سه بعدی صلب پنتیپتیسین (شکل ۹) [۲۲] و افزایش غلظت پلیمر (از محلول رقیق به فیلم) موجب افزایش میزان خاموشی و بالاتر رفتن دقت آشکار سازی می شود. همچنین در طیف مواد آشکار سازی شده نیترو آروماتیک ها و مخصوصاً TNT و DNT توسط بیشتر پلیمر ها

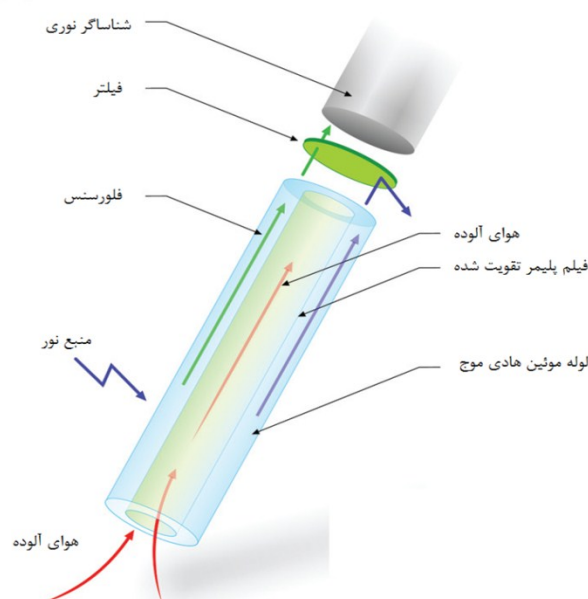
1- Poly(phenylene ethynylene)s
2- Polyphenylene Vinylenes
3- Si-Containing Polymers

مین‌های زمینی با موفقیت آزمایش شده است. فیدو XT با وزن ۱ kg، محدوده دمایی کاری °C ۶۰ تا ۲۰-، دارای دو بخش نمونه‌گیر و مشخص‌کننده و اندازه کمتر از ۲۵ cm می‌باشد. این دستگاه می‌تواند ترکیبات نیترو آروماتیک، RDX، ANFO، SEMTEX، C4 و چند ماده دیگر را در به صورت بخار، مایع و جامد با حساسیت ppq طی زمان ۱۰ آشکارسازی کند. فیدو NXT، دستگاه‌ای یکپارچه با وزن ۱/۴ kg دارای سیستم باتری، شارژر و ثبت تا دو هزار ساعت اطلاعات می‌باشد. این دستگاه در شرایط نظامی و عملیاتی با موفقیت آزمایش شده است. فیدو X3 که هم‌اکنون بهترین ابزار این حوزه می‌باشد، دارای قابلیت به‌روزرسانی و آشکارسازی مواد جدید را دارا می‌باشد. این دستگاه همانند دستگاه قبلی قابلیت آشکارسازی مواد به صورت نمونه و مقدار کم را داراست و در پزشکی قانونی نیز استفاده می‌شود. فیدو PAX، PIONT، جهت آشکارسازی مواد منفجره مایع از قبیل نیتروگلیسرین، نیترو متان و غیره جهت بالا بردن ضریب امنیت مکان‌های عمومی و مسافرتی از جمله راه‌آهن و غیره به دو صورت کابلی و متصل ساخته شده است که دقت و سرعت این دستگاه همانند دستگاه‌های قبلی می‌باشد. فیدو FAST GATE، جهت آشکارسازی کارت‌های آشکارسازی در مکان‌های فوق امنیتی همانند فیدو NXT و X3 استفاده می‌شود. این دستگاه در هر آشکارسازی کارت آلوده ۳۰ تا ۴۰ ثانیه زمان صرف می‌کند. اکثر فیدوهای موجود قابلیت این را دارند تا با سوار شدن بر ربات و اتصال به رایانه ربات قابل کنترل باشند و از حضور افراد نظامی در مناطق حساس و خطرناک جلوگیری به عمل آورند. در واقع مغز حسگر به ربات متصل می‌شود و اطلاعات به رایانه موجود رفته و تجزیه و تحلیل می‌شود، به این دسته فیدوهای ربات سوار می‌گویند. به این علت که در فرایند آشکارسازی مواد منفجره، آب یک ماده خنثی و بی‌اثر می‌باشد، حضور حسگر در آب هیچ خللی بر عملکرد این حسگر وارد نمی‌کند. به همین دلیل برای آشکارسازی مناطق آلوده به مواد منفجره و مین‌های دریایی فیدوهای زیردریایی استفاده می‌شود [۹۳، ۹۴، ۳۲].

۸- گزینش پذیری و مقایسه با سایر روش‌های آشکارسازی

درحالی که حساسیت برخی از فن‌آوری‌های نوظهور هم‌تراز سگ می‌باشند، اما هنوز سگ‌ها به علت گزینش پذیری استفاده می‌شوند. گزینش پذیری پاسخ بر اتصال قوی آنالیت‌ها به پلیمرهای غنی از الکترون نسبت به سایر ترکیبات تداخل‌کننده استوار است. در آزمایش میدانی بر روی مین‌های دفن شده، مشخص شده است که این دستگاه حساسیت و گزینش پذیری قابل قیاس با سگ‌های تعلیم‌دیده دارد. ثابت اتصال عاملی است که بر گزینش پذیری اثر می‌گذارند. وابستگی رفتار تجمع پلیمر به تعداد محل بار آنالیت می‌تواند گزینش پذیری را در حسگرهای شیمیایی ایجاد کند. برای

عبور کنند. در این دستگاه‌ها با ورود هوای دارای آنالیت مدنظر میزان فلورسنت تغییر می‌کند و این میزان تغییر توسط حسگرهای نوری به تشخیص آنالیت مدنظر منجر می‌شود. شماتیک ساختمان این حسگرها در شکل (۱۰) قابل مشاهده است [۳، ۹۳].



شکل ۱۰- شماتیک ساختار حسگر دستگاه‌های فیدو. لوله موئین هادی موج در دستگاه‌های طراحی شده عمر محدودی دارد و قابل تعویض می‌باشد [۳] این ابزارهای تولیدشده می‌توانند مواد مختلف منفجره از قبیل مواد نیترو آروماتیک‌ها (TNT-DNT,...) و RDX و چند ماده دیگر را در غلظت ppq آشکارسازی کنند. همچنین این ابزارها قابلیت کارکرد مداوم و ثبت مستقیم داده‌ها در کامپیوتر را دارند. از دیگر ویژگی‌های این دستگاه‌ها می‌توان به قابلیت کار در شرایط سخت دمایی و رطوبتی اشاره کرد. همچنین مهم‌ترین ویژگی این دستگاه‌ها وزن کم آن‌ها (بین یک و نیم تا دو کیلو) و اندازه مناسب (طول کمتر از سی سانتیمتر) می‌باشد که حمل‌ونقل و استفاده از آن در شرایط سخت را ممکن کرده است. این ابزارها قادرند پس از مدت بسیار کمی (حدود یک دقیقه) از آشکارسازی ماده منفجره به کار خود ادامه دهند و توسط جریان هوا تمیز شده و نیازی به پاک‌سازی ندارند. نمونه‌ای از ابزارهای تولیدی از این دسته جهت آشکارسازی مواد منفجره و مین‌های زیردریایی در آب کاربرد دارد. همچنین جهت بالا بردن ضریب امنیتی سربازان و مأموران نظامی بعضی از این ابزارها قابلیت سوارشدن بر روی ربات‌های مختلف را دارند و نمونه‌ای جعبه شکل از این دستگاه برای چک کردن کارت‌های آشکارسازی افراد در محیط‌های فوق امنیتی استفاده می‌شود. لازم به ذکر است که تمامی ابزارهای زیر که معرفی می‌شوند، دارای مکانیزم آشکارسازی مشابهی می‌باشند و تفاوت آن‌ها در نوع پلیمر مصرفی در حسگر می‌باشد [۹۳].

فیدو XT، اولین ابزار تولیدی در این حوزه می‌باشد که در سال ۲۰۰۳ توسط شرکت ICx تولید شده است. این دستگاه در آشکارسازی

آشکارسازی مقادیر کم مواد در محیط های پیچیده مکانیسم روشن شدن مزیت گزینش پذیری بیشتری نسبت به خاموش شوندگی دارد [۳].

۸-۱- محدودیت ها و معایب

علیرغم مزایای ذکر شده در مورد شناسایی رداثر مواد منفجره به کمک روش پلیمرهای فلورسانس این روش دارای معایب و محدودیت هایی نیز می باشد که مهم ترین آن ها در ذیل ارائه می شود:

- بیشتر مواد منفجره قابل شناسایی توسط این روش به نیتروآروماتیک ها محدود می شوند.

- فاصله دستگاه از هدف مورد نظر محدود می باشد (۲ متر) و برای شناسایی مین های زمینی در عمق ۲۰ cm زمین و شعاع m ۱۱ پاسخگو می باشد.

- شرایط جوی باید دارای باد ملایم (۲ m/s) باشد.

- سامانه های الکترواپتیکی نسبت به ضربه مقاومت بالایی ندارند و به همین دلیل به صورت محدود عملیاتی می شوند [۹۵].

۹- نتیجه گیری

این پژوهش نشان داد پلیمرهای فلورسانس به علت اندازه مناسب گپ انرژی، قابلیت این را دارند که توسط نور طبیعی، لیزر و یا امواج الکترومغناطیسی دیگر تحریک شده و توسط رهاسازی فلورسانس و حالات دیگر به حالت پایه خود بازگردند. با اضافه شدن آنالیت (مواد پرانرژی مانند مواد منفجره) شرایط طبیعی برگشت از برانگیختگی (فلورسنت یا حالت دیگر) تغییر می کند که این تغییر معیاری برای آشکارسازی آنالیت موردنظر می باشد. بیشتر مواد منفجره، الکترون خواهی بالایی دارند و با توجه به الکترون دهی پلیمرهای مزدوج، تبادل با الکترون برانگیخته شده، ماهیت آشکارسازی اکثر مواد منفجره می باشد. با استفاده از پلیمریزاسیون مونومرها، میزان خاموش شدگی با یک مولکول ماده منفجره توسط پلیمر مزدوج، بسیار بیشتر از مونومر پلیمریزه نشده و به این ترتیب حساسیت شناسایی افزایش می یابد (تقویت شدگی). مکانیسم آشکارسازی مواد پرانرژی توسط پلیمرهای فلورسانسی به این صورت است که با برانگیختگی پلیمر مزدوج، یک الکترون از بالاترین اوربیتال پرشده لایه ظرفیت، به پایین ترین اوربیتال پر نشده لایه رسانش منتقل شده و اوربیتال خالی (حفره) و زوج الکترون ایجاد شده، هر دو در طول زنجیر پلیمر حرکت می کنند. پس از طی یک مسیر محدود حفره و الکترون که طول و اندازه این حرکت به خواص پلیمر مربوط است و در اثر برهمکنش با

ماده منفجره، الکترون با آزاد کردن انرژی (به صورت فلورسانس) به حالت پایه خود باز می گردند. برای این منظور باید پتانسیل کاهش و اکسایش پلیمر و ماده منفجره باهم متناسب باشد. مکانیسم روشن شدن برای آشکارسازی مواد منفجره به ندرت استفاده می شود. زیرا معمولاً الکترون خواهی مواد منفجره بیشتر از پلیمر می باشد؛ اما با این حال برای آنالیت های دیگر این روش یک مکانیسم آشکارسازی می باشد. حساسیت این پلیمرها از حالت محلول رقیق به فیلم برای هر دو مکانیسم روشنی و خاموشی افزایش یافته و در مجموع مکانیسم خاموشی حساسیت بیشتری نسبت به مکانیسم روشنی دارد.

بررسی انواع دستگاه های تجاری شده براساس این روش نشان داد این روش جهت آشکارسازی نمونه های مختلف مواد پرانرژی، مین های زمینی و دریایی، کارت های شناسایی و نمونه های مایع، جامد و گاز مواد منفجره قابل بکارگیری عملیاتی می باشد. همچنین این دستگاه ها با وزن کم، اندازه کوچک، گستره دمایی قابل استفاده، قابلیت به روز رسانی می تواند مواد پرانرژی را با حساسیت ppq در زمان ۱۰ s آشکارسازی نماید. این دستگاه ها قابلیت اتصال به ربات و کنترل از دور را دارند تا از حضور افراد نظامی در مناطق حساس و خطرناک جلوگیری به عمل آید. این روش اگر چه نسبت به سایر روش های آشکارسازی مواد منفجره بالاترین دقت و وزن سبکی را دارا می باشد، اما همچنان محدودیت هایی در فاصله آشکارسازی و گستره مواد پرانرژی قابل آشکارسازی را دارا می باشد که در روند استفاده عملیاتی آن ها محدودیت هایی را ایجاد می کند. پیش بینی می گردد با توجه به این که این فناوری به نسبت نوظهور می باشد؛ با توجه به سرعت بالای رشد علمی و تجاری سازی آن در آینده به تدریج با رفع محدودیت ها در کنار سامانه های عملیاتی فعلی همچون IMS بتواند به عنوان سامانه تکمیلی سبب بهبود دقت آشکارسازی آن ها گردد.

جدول ۱- طبقه‌بندی پلیمرهای استفاده شده جهت آشکارسازی مواد منفجره، مرتب شده براساس سیر زمانی مقالات

ردیف	سال	نوع پلیمر	ویژگی خاص	عملکرد	ماده تشخیص دهنده	طول موج (nm)	مرجع
۱	۱۹۹۸	پلی اتیلن فنیل‌ها	برای تشخیص مین‌های زمینی، دارای انتیپیتسین	مکانیزم خاموشی	TNT/2,4,DNT	۴۶۳، ۴۹۷	[۲۰-۲۳]
۲	۱۹۹۹	پلیمرهای حاوی سیلیسیم	محلول تولون-فیلم	مکانیزم خاموشی	نیتروآروماتیک‌ها	۴۹۳، ۴۹۲، ۳۶۲	[۳۸-۳۹]
۳	۲۰۰۰	پلی فنیل وینیل	دارای گروه اپتیسین	مکانیزم خاموشی	TNT	۴۷۷	[۳۳]
۴	۲۰۰۱	پلیمرهای حاوی سیلیسیم	نفوذپذیری بالا گاز سبک، بازدهی بالا انتقال الکترون	آشکارسازی تا ppb	DNB / DNT, NT, NB and DNT in water	۳۳۵	[۴۴-۴۵]
۵	۲۰۰۳	پلیمرهای حاوی سیلیسیم	حاوی تترافنیل سیلول	مکانیزم خاموشی	TNT-2,4,DNT-PA-NB	۵۱۰-۴۸۰	[۳۷]
۶	۲۰۰۴	پلی فنیل وینیل	تعامل قطبی-قطبی آنالیت و پلیمر	۹۰٪ خاموشی	TNT/ 2,4-DNT/ 2,6-DNT and 4-NT	۵۷۴	[۳۱]
۷	۲۰۰۵	پلی اتیلن فنیل‌ها	دارای پیوند هیدروژنی قوی، کلروفرم-فیلم	۵-۲۸٪ خاموشی	2,4-DNT, TNT, DMNB, 4NT	۴۳۰-۴۲۰	[۲۵-۲۷]
۸	۲۰۰۵	پلی فنیل وینیل	افزایش ۳۰ برابری حساسیت فیلم با لیزر نیتروژنی	مکانیزم خاموشی	TNT-2,4,DNT-DNT	۵۰۰	[۲۴]
۹	۲۰۰۵	پلیمرهای حاوی سیلیسیم	محلول THF، محلول THF و فیلم	آشکارسازی تا ۲۰ ppb	TNT, 2,4-DNT and PA	-	[۴۶]، [۳۵]
۱۰	۲۰۰۶	پلی اتیلن فنیل‌ها	خاموش شدگی مجتمع ۱۵ برابر رقیق	۷۵٪ خاموشی، ۱۰ ppq	TNT-DNT	۴۷۵	[۲۴]
۱۱	۲۰۰۷	پلی فنیل وینیل	-	مکانیزم خاموشی	TNT/2,4-DNT/ 2,6-DNT and 4-NT	۵۱۷، ۴۸۸	[۳۲]
۱۲	۲۰۰۸	پلیمرهای حاوی سیلیسیم	با اکسایش فوتوشیمیایی فلورونیل	خاموشی، روشنی	TNT, Tetryl, PETN, RDX, TNG, HMX	۴۴۸-۴۷۵	[۴۰-۴۱]، [۴۷]
۱۳	۲۰۰۹	پلی اتیلن فنیل‌ها	محلول کلروفرم، فیلم	الکترواسپینینگ ۵۰٪	TNT, 2,4-DNT	۶۲۰، ۵۰۰، ۴۵۳	[۲۸-۳۰]
۱۴	۲۰۱۰	پلیمرهای حاوی سیلیسیم	تقویت شدید فلورسانس با افزودن آب به THF	خاموشی، ۱ ppm	PA	۵۰۷، ۵۰۰، ۵۰۹	[۴۲-۴۳]
۱۵	۲۰۱۱	-	اصلاح پتانسیل‌های کاهش و اکسایش	خاموشی	TNT and Picric	-	[۴۸]
۱۶	۲۰۱۱	پلی اتیلن فنیل‌ها	متیل فنیل جهت کاهش خود خاموشی با نانو	خاموشی	TNT and 2,4-DNT, DNT	-	[۴۹]، [۵۳]
۱۷	۲۰۱۱	پلی فنیل وینیل	بهبود تشخیص با حضور پیرین در فیلم	خاموشی	سیانید، نیتروآروماتیک‌ها، TNT	-	[۵۰-۵۱]، [۵۶]
۱۸	۲۰۱۱	پلی کربوزیل	استفاده مجدد پلیمر شناساگر با گرما دادن	خاموشی	TNT, DNT and DMNB	-	[۵۲]
۱۹	۲۰۱۱	پلیمرهای حاوی سیلیسیم	-	خاموشی	nitro explosive, TNT and Picric acid	-	[۵۴-۵۵]
۲۰	۲۰۱۲	polystyrene	تلفیق با ساختار و فناوری نانو	مکانیزم خاموشی (ppt)	nitroaromatic explosive vapors	-	[۵۷-۵۸]
۲۱	۲۰۱۲	پلی اتیلن فنیل‌ها	پایداری حرارتی بالا، تلفیق با ساختار و فناوری نانو	مکانیزم خاموشی	nitroaromatic, picric acid	-	[۶۷-۶۸]، [۶۳]
۲۲	۲۰۱۲	پلی کربوزیل	کاهش برهم‌کنش بین زنجیری با زنجیر صلب‌تر	خاموشی	TNT	-	[۵۹]
۲۳	۲۰۱۲	پلی فنیل وینیل	تلفیق با ساختار و فناوری نانو	خاموشی	TNT	-	[۶۰]
۲۴	۲۰۱۲	-	زنجیرهای جانبی مانع به هم‌چسبی می‌شود	خاموشی	2,4-DNT	-	[۶۱]
۲۵	۲۰۱۲	پلیمرهای حاوی سیلیسیم	حالت‌های مجتمع و محلول THF	خاموشی	PA and TNT	-	[۶۵]، [۶۹]، [۶۲]
۲۶	۲۰۱۲	-	بهبود سیگنال‌دهی، هدایت پذیری میکروویو	خاموشی، روشنی	DNT and TNT	-	[۶۴]، [۶۶]
۲۷	۲۰۱۳	پلیمرهای حاوی سیلیسیم	سنتز از طریق جفت شدن عرضی، فیلم نازک با ساختار پلی‌اتر سولفون دوپ پیرین، حساسیت بالا برای فیلم با ضخامت ۹۰ nm	خاموشی	TNT, DNT, Nitroaromatic, RDX, PETN	-	[۶۹-۷۳]
۲۸	۲۰۱۳	-	پلیمر سنتز شده در DMF، قوی‌ترین پاسخ به TNT	آشکارسازی تا ۰/۱ ppb	TNT, Nitroaromatic	-	[۶۹]، [۷۴]، [۷۶]
۲۹	۲۰۱۳	پلی کربوزیل	تلفیق با ساختار و فناوری نانو	-	DNT and TNT	-	[۷۵]
۳۰	۲۰۱۳	پلی تیوفن	محلول اتانول	-	Nitroaromatic, PA and PYX	-	[۷۷-۸۰]
۳۱	۲۰۱۴	پلی فنیل وینیل	فیلم و محلول تولون تلفیق با ساختار و فناوری نانو	آشکارسازی تا ۶/۳ ppm	DNT, TNT, PA, DNB and Nitroaromatic	-	[۸۱]، [۸۸-۸۹]
۳۲	۲۰۱۴	پلی اتیلن فنیل‌ها	فیلم و محلول تولون	-	TNB, PA, DNT, TNT, RDX and PETN	-	[۸۲]، [۸۴-۸۵]
۳۳	۲۰۱۴	پلی استرین	تلفیق با ساختار و فناوری نانو	-	Nitroaromatic	-	[۸۵-۸۷]
۳۴	۲۰۱۴	پلیمرهای حاوی سیلیسیم	TCPC EP films	-	DNT, TNT, RDX, PA, Nitroaromatic	-	[۹۰-۹۱]
۳۵	۲۰۱۵	پلیمر آل-کوآلانی	دو COP یا پایداری حرارتی بالا و خاموشی زیاد	-	Nitroaromatic explosives	-	[۹۲]
۳۶	۲۰۱۶	پلی فلورون	سنتز کوپلیمریزاسیون جفت‌شدنی Suzuki	تشخیص سریع و خاص	Nitroexplosive, picric acid	-	[۹۶]

مراجع

- [1] Harper, R. J.; Almirall, J. R.; Furton, K. G. "Identification of Dominant Odor Chemicals Emanating From Explosives for Use in Developing Optimal Training Aid Combinations and Mimics for Canine Detection," *Talanta*, 2005, 67 (2), 313-327.
- [2] Thomas, S. W.; Joly, G. D.; Swager, T. M. "Chemical Sensors Based On Amplifying Fluorescent Conjugated Polymers," *Chem. Rev.*, 2007, 107 (4), 1339-1386.

- [3] Marshall, M.; Oxley, J. C. "Aspects of Explosives Detection". Elsevier, 2011.
- [4] Jimenez, A.M.; Navas, M.J. "Chemiluminescence Detection Systems For The Analysis Of Explosives", J. Hazard. Mater., 2004, 106, 1-8.
- [5] Wang, D. "Trace Explosive Sensor Devices Based on Semiconductor Nanomaterials" University of Washington, 2014.
- [6] Barford, W. "Electronic And Optical Properties Of Conjugated Polymers"; Oxford University Press, 2005.
- [7] Satrijo, A. "Controlling The Architectures And Optical Of Conjugated Polymer Aggregates And Films" PHD Thesis, MIT, Massachusetts Institute of Technology, 2007.
- [8] Skotheim, T. A. "Handbook Of Conducting Polymers", CRC press, 1997.
- [9] Salzner, U.; Lagowski, J. B.; Pickup, P. G.; Poirier, R. A. "Comparison Of Geometries And Electronic Structures Of Polyacetylene, Polyborole, Polycyclopentadiene, Polypyrrole, Polyfuran, Polysilole, Polyphosphole, Polythiophene, Polyselenophene And Polytellurophene", Synth. Met., 1998, 96 (3), 177-189.
- [10] Kar, P. "Doping In Conjugated Polymers", John Wiley & Sons, 2013.
- [11] Turro, N. J. "Modern Molecular Photochemistry", University Science Books, 1991.
- [12] Hennebicq, E.; Pourtois, G.; Scholes, G. D.; Herz, L. M.; Russell, D. M.; Silva, C.; Setayesh, S.; Grimsdale, A. C.; Müllen, K.; Brédas, J. L. "Exciton Migration In Rigid-Rod Conjugated Polymers: An Improved Förster Model" J. Am. Chem. Soc., 2005, 127 (13), 4744-4762.
- [13] Czarnik, A. W. "Fluorescent Chemosensors For Ion And Molecule Recognition", American Chemical Society, 1993.
- [14] Brédas, J. L.; Beljonne, D.; Coropceanu, V.; Cornil, J. "Charge-Transfer And Energy-Transfer Processes In π -Conjugated Oligomers And Polymers: A Molecular Picture" Chem. Rev., 2004, 104 (11), 4971-5004.
- [15] Cornil, J.; Dos Santos, D. A.; Crispin, X.; Silbey, R.; Brédas, J. L. "Influence Of Interchain Interactions On The Absorption And Luminescence Of Conjugated Oligomers And Polymers: A Quantum-Chemical Characterization" J. Am. Chem. Soc., 1998, 120 (6), 1289-1299.
- [16] Rehm, D.; Weller, A. "Kinetics Of Fluorescence Quenching By Electron And H-Atom Transfer" Isr. J. Chem., 1970, 8 (2), 259-271.
- [17] Zhou, Q.; Swager, T. M. "Method For Enhancing The Sensitivity Of Fluorescent Chemosensors: Energy Migration In Conjugated Polymers" J. Am. Chem. Soc., 1995, 117 (26), 7017-7018.
- [18] Zhou, Q.; Swager, T. M. "Fluorescent Chemosensors Based On Energy Migration In Conjugated Polymers: The Molecular Wire Approach To Increased Sensitivity" J. Am. Chem. Soc., vol. 117, no. 50, pp. 12593-12602, 1995.
- [19] McQuade, D. T.; Kim, J.; Swager, T. M. "Two-Dimensional Conjugated Polymer Assemblies: Interchain Spacing For Control Of Photophysics" J. Am. Chem. Soc., 2000, 122 (24), 5885-5886.
- [20] Yang, J. S.; Swager, T. M. "Fluorescent Porous Polymer Films As TNT Chemosensors: Electronic And Structural Effects" J. Am. Chem. Soc., 1998, 120 (46), 11864-11873.
- [21] Salinas, Y.; Martínez-Mañez, R.; Marcos, M. D.; Sancenón, F.; Costero, A. M.; Parra, M.; Gil S. "Optical Chemosensors And Reagents To Detect Explosives" Chem. Soc. Rev., 2012, 41 (3), 1261-1296.
- [22] Yang, J. S.; Swager, T. M. "Porous Shape Persistent Fluorescent Polymer Films: An Approach To TNT Sensory Materials" J. Am. Chem. Soc., 1998, 120 (21), 5321-5322.
- [23] Yamaguchi, S.; Swager, T. M. "Oxidative Cyclization Of Bis (Biaryl) Acetylenes: Synthesis And Photophysics Of Dibenzo [G, P] Chrysene-Based Fluorescent Polymers" J. Am. Chem. Soc., 2001, 123 (48), 12087-12088.
- [24] Ajayaghosh, A.; Varghese, R.; Praveen, V. K.; Mahesh, S. "Evolution Of Nano-To Microsized Spherical Assemblies Of A Short Oligo (P-Phenyleneethynylene) Into Superstructured Organogels" Angew. Chem. Int. Ed., 2006, 45 (20), 3261-3264.
- [25] Amara, J. P.; Swager, T. M. "Synthesis And Properties Of Poly (Phenylene Ethynylene) S With Pendant Hexafluoro-2-Propanol Groups" Macromolecules, 2005, 38 (22), 9091-9094.
- [26] Zhao, D.; Swager, T. M. "Sensory Responses In Solution Vs Solid State: A Fluorescence Quenching Study Of Poly(Iptycenebutadiynylene)s" Macromolecules, 2005, 38 (22), 9377-9384.
- [27] Thomas Iii, S. W.; Amara, J. P.; Bjork, R. E.; Swager, T. M. "Amplifying Fluorescent Polymer Sensors For The Explosives Taggant 2, 3-Dimethyl-2, 3-Dinitrobutane (DMNB)" Chem. Commun., 2005, 36, 4572-4574.
- [28] Zhou, H.; Ye, Q.; Neo, W. T.; Song, J.; Yan, H.; Zong, Y.; Tang, B. Z.; Hor, T. A.; Xu, J. "Electrospun Aggregation-Induced Emission Active Poss-Based Porous Copolymer Films For Detection Of Explosives" Chem. Commun., 2014, 50 (89), 13785-13788.
- [29] Chen, S.; Zhang, Q.; Zhang, J.; Gu, J.; Zhang, L. "Synthesis Of Two Conjugated Polymers As TNT Chemosensor Materials" Sens. Actuators B Chem., 2010, 149 (1), 155-160.
- [30] Long, Y.; Chen, H.; Yang, Y.; Wang, H.; Yang, Y.; Li, N.; Li, K.; Pei, J.; Liu, F. "Electrospun Nanofibrous Film Doped With A Conjugated Polymer For DNT Fluorescence Sensor" Macromolecules, 2009, 42 (17), 6501-6509.
- [31] Chang, C. P.; Chao, C. Y.; Huang, J. H.; Li, A. K.; Hsu, C. S.; Lin, M. S.; Hsieh, B. R.; Su, A. C. "Fluorescent Conjugated Polymer Films As TNT Chemosensors" Synth. Met., 2004, 144 (3), 297-301.
- [32] Levitsky, I. A.; Euler, W. B.; Tokranov, A. N.; Rose, A. "Fluorescent Polymer-Porous Silicon Microcavity Devices For Explosive Detection" Appl. Phys. Lett., 2007, 90 (4), 041904.
- [33] Chen, L.; McBranch, D.; Wang, R.; Whitten, D. "Surfactant-Induced Modification Of Quenching Of Conjugated Polymer Fluorescence By Electron Acceptors: Applications For Chemical Sensing" Chem. Phys. Lett., 2000, 330 (1), 27-33.
- [34] Rose, A.; Zhu, Z.; Madigan, C. F.; Swager, T. M.; Bulovic, V. "Sensitivity Gains In Chemosensing By Lasing Action In Organic Polymers" Nature, 2005, 434 (7035), 876-879.
- [35] Sohn, H.; Calhoun, R. M.; Sailor, M. J.; Trogler, W. C. "Detection Of Tnt And Picric Acid On Surfaces And In Seawater By Using Photoluminescent Polysiloles" Angew. Chem. Int. Ed., 2001, 40 (11), 2104-2105.
- [36] Toal, S. J.; Magde, D.; Trogler, W. C. "Luminescent Oligo (Tetraphenyl) Silole Nanoparticles As Chemical Sensors For Aqueous TNT" Chem. Commun., 2005, 43, 5465-5467.
- [37] Sohn, H.; Sailor, M. J.; Magde, D.; Trogler, W. C. "Detection Of Nitroaromatic Explosives Based On Photoluminescent Polymers Containing Metalloles" J. Am. Chem. Soc., 2003, 125 (13), 3821-3830.
- [38] Sohn, H.; Huddleston, R. R.; Powell, D. R.; West, R.; Oka, K.; Yonghua, X. "An Electroluminescent Polysilole And Some Dichlorooligosiloles" J. Am. Chem. Soc., 1999, 121 (12), 2935-2936.
- [39] Ohshita, J.; Kunai, A. "Polymers With Alternating Organosilicon And π -Conjugated Units" Acta Polym., 1998, 49 (8), 379-403.
- [40] Sanchez, J. C.; Urbas, S. A.; Toal, S. J.; DiPasquale, A. G.; Rheingold, A. L.; Trogler, W. C. "Catalytic Hydrosilylation Routes To Divinylbenzene Bridged Silole And Silafluorene Polymers. Applications To Surface Imaging Of Explosive Particulates" Macromolecules, 2008, 41 (4), 1237-1245.
- [41] Sanchez, J. C.; Trogler, W. C. "Efficient Blue-Emitting Silafluorene-Fluorene-Conjugated Copolymers: Selective Turn-Off/Turn-On Detection Of Explosives" J. Mater. Chem., 2008, 18 (26), 3143-3156.
- [42] Liu, J.; Zhong, Y.; Lam, J. W.; Lu, P.; Hong, Y.; Yu, Y.; Yue, Y.; Faisal, M.; Sung, H. H.; Williams, I. D. "Hyperbranched Conjugated Polysiloles: Synthesis, Structure, Aggregation-Enhanced Emission, Multicolor Fluorescent Photopatterning, And Superamplified Detection Of Explosives" Macromolecules, 2010, 43 (11), 4921-4936.
- [43] Lu, P.; Lam, J. W.; Liu, J.; Jim, C. K.; Yuan, W.; Xie, N.; Zhong, Y.; Hu, Q.; Wong, K. S.; Cheuk, K. K. "Aggregation-Induced Emission In A Hyperbranched Poly (Silylenevinylene) And Superamplification In Its Emission Quenching By Explosives" Macromol. Rapid Commun., 2010, 31 (9-10),

834-839.

- [44] Liu, Y.; Mills, R. C.; Boncella, J. M.; Schanze, K. S. "Fluorescent Polyacetylene Thin Film Sensor For Nitroaromatics" *Langmuir*, 2001, 17 (24), 7452-7455.
- [45] Toy, L. G.; Nagai, K.; Freeman, B. D.; Pinnau, I.; He, Z.; Masuda, T.; Teraguchi, M.; Yampolskii, Y. P. "Pure-Gas And Vapor Permeation And Sorption Properties Of Poly [1-Phenyl-2-[P-(Trimethylsilyl) Phenyl] Acetylene](PTMSDPA)" *Macromolecules*, 2000, 33 (7), 2516-2524.
- [46] Saxena, A.; Fujiki, M.; Rai, R.; Kwak, G. "Fluoroalkylated Polysilane Film As A Chemosensor For Explosive Nitroaromatic Compounds" *Chem. Mater.*, 2005, 17 (8), 2181-2185.
- [47] Toal, S. J.; Sanchez, J. C.; Dugan, R. E.; Trogler, W. C. "Visual Detection Of Trace Nitroaromatic Explosive Residue Using Photoluminescent Metallole-Containing Polymers" *J. Forensic Sci.*, 2007, 52 (1), 79-83.
- [48] Xu, B.; Wu, X.; Li, H.; Tong, H.; Wang, L. "Selective Detection Of TNT And Picric Acid By Conjugated Polymer Film Sensors With Donor-Acceptor Architecture" *Macromolecules*, 2011, 44 (13), 5089-5092.
- [49] Nie, H.; Zhao, Y.; Zhang, M.; Ma, Y.; Baumgarten, M.; Müllen, K. "Detection Of TNT Explosives With A New Fluorescent Conjugated Polycarbazole Polymer" *Chem. Commun.*, 2011, 47 (4), 1234-1236.
- [50] Wu, X.; Xu, B.; Tong, H.; Wang, L. "Highly Selective And Sensitive Detection Of Cyanide By A Reaction-Based Conjugated Polymer Chemosensor" *Macromolecules*, 2011, 44 (11), 4241-4248.
- [51] He, G.; Yan, N.; Yang, J.; Wang, H.; Ding, L.; Yin, S.; Fang, Y. "Pyrene-Containing Conjugated Polymer-Based Fluorescent Films For Highly Sensitive And Selective Sensing Of TNT In Aqueous Medium" *Macromolecules*, 2011, 44 (12), 4759-4766.
- [52] Tang, G.; Chen, S. S.; Shaw, P. E.; Hegedus, K.; Wang, X.; Burn, P. L.; Meredith, P. "Fluorescent Carbazole Dendrimers For The Detection Of Explosives" *Polym. Chem.*, 2011, 2 (10), 2360-2368.
- [53] Suresh, V. M.; Chatterjee, S.; Modak, R.; Tiwari, V.; Patel, A. B.; Kundu, T. K.; Maji, T. K. "Oligo (P-Phenyleneethynylene)-Derived Porous Luminescent Nanoscale Coordination Polymer Of Gdiii: Bimodal Imaging And Nitroaromatic Sensing" *J. Phys. Chem. C*, 2014, 118 (23), 12241-12249.
- [54] Cho, J.; Anandakathir R.; Kumar, A.; Kumar, J.; Kurup, P. U. "Sensitive And Fast Recognition Of Explosives Using Fluorescent Polymer Sensors And Pattern Recognition Analysis" *Sens. Actuators B Chem.*, 2011, 160 (1), 1237-1243.
- [55] Zhao, Z.; Liu, J.; Lam, J. W. Y.; Chan, C. Y.; Qiu, H.; Tang, B. Z. "Luminescent Aggregates Of A Starburst Silole-Triphenylamine Adduct For Sensitive Explosive Detection" *Dyes Pigments*, 2011, 91 (2), 258-263.
- [56] Chu, F.; Yang, J. "Study Of Nitro Aromatic Explosives Sensor Based On Fluorescence Quenching" *Opt. Int. J. Light Electron Opt.*, 2011, 122 (24), 2246-2248.
- [57] Long, Y.; Chen, H.; Wang, H.; Peng, Z.; Yang, Y.; Zhang, G.; Li, N.; Liu, F.; Pei, J. "Highly Sensitive Detection Of Nitroaromatic Explosives Using An Electrospun Nanofibrous Sensor Based On A Novel Fluorescent Conjugated Polymer" *Anal. Chim. Acta*, 2012, 744, 82-91.
- [58] Hu, R.; Lam, J. W.; Liu, J.; Sung, H. H.; Williams, I. D.; Yue, Z.; Wong, K. S.; Yuen, M. M.; Tang, B. Z. "Hyperbranched Conjugated Poly (Tetraphenylethene): Synthesis, Aggregation-Induced Emission, Fluorescent Photopatterning, Optical Limiting And Explosive Detection" *Polym. Chem.*, 2012 3 (6), 1481-1489.
- [59] Nie, H.; Sun, G.; Zhang, M.; Baumgarten, M.; Müllen, K. "Fluorescent Conjugated Polycarbazoles For Explosives Detection: Side Chain Effects On TNT Sensor Sensitivity" *J. Mater. Chem.*, 2012, 22 (5), 2129-2132.
- [60] Feng, L.; Li, H.; Qu, Y.; Lü, C. "Detection Of TNT Based On Conjugated Polymer Encapsulated In Mesoporous Silica Nanoparticles Through FRET" *Chem. Commun.*, 2012, 48 (38), 4633-4635.
- [61] Leng, H.; Wu, W. "Synthesis Of A Novel Fluorene-Based Conjugated Polymer With Pendent Bulky Caged Adamantane Moieties And Its Application In The Detection Of Trace DNT Explosives" *React. Funct. Polym.*, 2012, 72 (3), 206-211.
- [62] Shu, W.; Guan, C.; Guo, W.; Wang, C.; Shen, Y. "Conjugated Poly (Aryleneethynylsiloles) And Their Application In Detecting Explosives" *J. Mater. Chem.*, 2012, 22 (7), 3075-3081.
- [63] Wu, W.; Ye, S.; Tang, R.; Huang, L.; Li, Q.; Yu, G.; Liu, Y.; Qin, J.; Li, Z. "New Tetraphenylethylene-Containing Conjugated Polymers: Facile Synthesis, Aggregation-Induced Emission Enhanced Characteristics And Application As Explosive Chemosensors And Pleds" *Polymer*, 2012, 53 (15), 3163-3171.
- [64] Liu, X.; Xu, Y.; Jiang, D. "Conjugated Microporous Polymers As Molecular Sensing Devices: Microporous Architecture Enables Rapid Response And Enhances Sensitivity In Fluorescence-On And Fluorescence-Off Sensing" *J. Am. Chem. Soc.*, 2012, 134 (21), 8738-8741.
- [65] Zhao, Z.; Jiang, T.; Guo, Y.; Ding, L.; He, B.; Chang, Z.; Lam, J. W.; Liu, J.; Chan, C. Y.; Lu, P. "Silole-Containing Poly (Silylenevinylene) S: Synthesis, Characterization, Aggregation-Enhanced Emission, And Explosive Detection" *J. Polym. Sci. Part Polym. Chem.*, 2012, 50 (11), 2265-2274.
- [66] Balan, B.; Vijayakumar, C.; Tsuji, M.; Saeki, A.; Seki, S. "Detection And Distinction Of DNT And TNT With A Fluorescent Conjugated Polymer Using The Microwave Conductivity Technique" *J. Phys. Chem. B*, 2012, 116 (34), 10371-10378.
- [67] Costa, A. I.; Prata, J. V. "Substituted P-Phenylene Ethynylene Trimers As Fluorescent Sensors For Nitroaromatic Explosives" *Sens. Actuators B Chem.*, 2012, 161 (1), 251-260.
- [68] Costa, A. I.; Pinto, H. D.; Ferreira, L. F.; Prata, J. V.; "Solid-State Sensory Properties Of CALIX-Poly (Phenylene Ethynylene) S Toward Nitroaromatic Explosives" *Sens. Actuators B Chem.*, 2012, 161 (1), 702-713.
- [69] Novotney, J. L.; Dichtel, W. R. "Conjugated Porous Polymers For TNT Vapor Detection" *ACS Macro Lett.*, 2013, 2 (5), 423-426.
- [70] Vu, A.; Phillips, J.; Bühlmann, P.; Stein, A. "Quenching Performance Of Surfactant-Containing And Surfactant-Free Fluorophore-Doped Mesoporous Silica Films For Nitroaromatic Compound Detection" *Chem. Mater.*, 2013, 25 (5), 711-722.
- [71] Demirel, G. B.; Daglar, B.; Bayindir, M. "Extremely Fast And Highly Selective Detection Of Nitroaromatic Explosive Vapours Using Fluorescent Polymer Thin Films" *Chem. Commun.*, 2013, 49 (55), 6140-6142.
- [72] Xu, B.; Xu, Y.; Wang, X.; Li, H.; Wu, X.; Tong, H.; Wang, L. "Porous Films Based On A Conjugated Polymer Gelator For Fluorescent Detection Of Explosive Vapors" *Polym. Chem.*, 2013, 4 (19), 5056-5059.
- [73] Gopalakrishnan, D.; Dichtel, W. R. "Direct Detection Of RDX Vapor Using A Conjugated Polymer Network" *J. Am. Chem. Soc.*, 2013, 135 (22), 8357-8362.
- [74] Yang, X.; Shen, B.; Jiang, Y.; Zhao, Z.; Wang, C.; Ma, C.; Yang, B.; Lin, Q. "A Novel Fluorescent Polymer Brushes Film As A Device For Ultrasensitive Detection Of TNT" *J. Mater. Chem. A*, 2013, 1 (4), 1201-1206.
- [75] Ding, Z.; Zhao, Q.; Xing, R.; Wang, X.; Ding, J.; Wang, L.; Han, Y. "Detection Of Explosives With Porous Xerogel Film From Conjugated Carbazole-Based Dendrimers" *J. Mater. Chem. C*, 2013, 1 (4), 786-792.
- [76] Shanmugaraju, S.; Jadhav, H.; Karthik, R.; Mukherjee, P. S. "Electron Rich Supramolecular Polymers As Fluorescent Sensors For Nitroaromatics" *Rsc Adv.*, 2013, 3 (15), 4940-4950.
- [77] Rochat, S.; Swager, T. M. "Conjugated Amplifying Polymers For Optical Sensing Applications" *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2013, 5 (11), 4488-4502.
- [78] Liu, T.; Zhao, K.; Liu, K.; Ding, L.; Yin, S.; Fang, Y. "Synthesis, Optical Properties And Explosive Sensing Performances Of A Series Of Novel II-Conjugated Aromatic End-Capped Oligothiophenes" *J. Hazard. Mater.*, 2013, 246, 52-60.
- [79] Chu, F.; Tsiminis, G.; Spooner, N. A.; Monro, T. M. "Explosives Detection By Fluorescence Quenching Of Conjugated Polymers In Suspended Core Optical Fibers" *Sens. Actuators B Chem.*, 2014, 199, 22-26.

- [80] Dong, W.; Fei, T.; Palma-Cando, A.; Scherf, U. "Aggregation Induced Emission And Amplified Explosive Detection Of Tetraphenylethylene-Substituted Polycarbazoles" *Polym. Chem.*, 2014, 5 (13), 4048–4053.
- [81] Zhou, H.; Li, J.; Chua, M. H.; Yan, H.; Tang, B. Z.; Xu, J. "Poly (Acrylate) With A Tetraphenylethene Pendant With Aggregation-Induced Emission (AIE) Characteristics: Highly Stable AIE-Active Polymer Nanoparticles For Effective Detection Of Nitro Compounds" *Polym. Chem.*, 2014, 5 (19), 5628–5637.
- [82] Patil, S. J.; Duragkar, N.; Rao, V. R. "An Ultra-Sensitive Piezoresistive Polymer Nano-Composite Microcantilever Sensor Electronic Nose Platform For Explosive Vapor Detection" *Sens. Actuators B Chem.*, 2014, 192, 444–451.
- [83] Wu, X.; Li, H.; Xu, B.; Tong, H.; Wang, L. "Solution-Dispersed Porous Hyperbranched Conjugated Polymer Nanoparticles For Fluorescent Sensing Of TNT With Enhanced Sensitivity" *Polym. Chem.*, 2014, 5 (15), 4521–4525.
- [84] Ghosh, K. R.; Saha, S. K.; Wang, Z. Y. "Ultra-Sensitive Detection Of Explosives In Solution And Film As Well As The Development Of Thicker Film Effectiveness By Tetraphenylethene Moiety In AIE Active Fluorescent Conjugated Polymer", *Polym Chem*, 2014, 5 (19), 5638–5643.
- [85] Sun, X.; Brückner, C.; Nieh, M. P.; Lei, Y. "A Fluorescent Polymer Film With Self-Assembled Three-Dimensionally Ordered Nanopores: Preparation, Characterization And Its Application For Explosives Detection", *J. Mater. Chem. A*, 2014, 2 (35), 14613–14621.
- [86] Dedeoğlu, B.; Aviyente, V.; Özen, A. S. "Computational Insight Into The Explosive Detection Mechanisms In Silafluorene-And Silole-Containing Photoluminescent Polymers" *J. Phys. Chem. C*, 2014, 118 (12), 6385–6397.
- [87] Nie, H.; Lv, Y.; Yao, L.; Pan, Y.; Zhao, Y.; Li, P.; Sun, G.; Ma, Y.; Zhang, M. "Fluorescence Detection Of Trace TNT By Novel Cross-Linking Electropolymerized Films Both In Vapor And Aqueous Medium" *J. Hazard. Mater.*, vol. 264, pp. 474–480, 2014.
- [88] Zhang, H.; Feng, L.; Liu, B.; Tong, C.; Lü, C. "Conjugation Of PPV Functionalized Mesoporous Silica Nanoparticles With Graphene Oxide For Facile And Sensitive Fluorescence Detection Of TNT In Water Through FRET" *Dyes Pigments*, 2014, 101, 122–129.
- [89] Duniho, T. L.; Laughlin, B. J.; Buel, A. A.; Baker, W. F.; Conrad, C. A.; Smith, R. C. "Conjugated Polymers For The Fluorescent Detection Of Nitroaromatics: Influence Of Side-Chain Sterics And π -System Electronics" *J. Polym. Sci. Part Polym. Chem.*, 2014, 52 (10), 1487–1492.
- [90] Dedeoğlu, B.; Monari, A.; Etienne, T.; Aviyente, V.; Özen, A. S. "Detection Of Nitroaromatic Explosives Based On Fluorescence Quenching Of Silafluorene-And Silole-Containing Polymers: A Time-Dependent Density Functional Theory Study", *J. Phys. Chem. C*, 2014, 118 (41), 23946–23953.
- [91] Kumar, A.; Robinson, A.; Kumar, J. "Comparing Conjugated Polymer Thin Film And Electrospun Nanofiber Sensing Elements For Detection Of Explosives" *J. Nanosci. Nanotechnol.*, 2014, 14 (9), 6781–6785.
- [92] Sang, N.; Zhan, C.; Cao D. "Highly Sensitive And Selective Detection Of 2, 4, 6-Trinitrophenol Using Covalent-Organic Polymer Luminescent Probes" *J. Mater. Chem. A*, 2015, 3 (1), 92–96.
- [93] "FLIR Systems Thermal Imaging, Night Vision and Infrared Camera Systems", <http://www.flir.eu/home>, 2015.
- [94] "Colorimetric (COLOR).", <http://www.cbrmetechindex.com/Explosives-Detection/Application-ED/Trace-Analysis-ED-A/Ion-trap-Mobility-Spectrometry-ED-TA>, 2015.
- [95] Woodfin, L. "Trace chemical sensing of explosives". John Wiley & Sons, 2006.
- [96] Tanwar, A.S.; Hussain, S.; Malik, A.H.; Afroz, M.A.; Iyer, P.K.; "Inner Filter Effect Based Selective Detection Of Nitroexplosive-Picric Acid In Aqueous Solution And Solid Support Using Conjugated Polymer". *ACS Sensors*, 2016, 1(8), 1070-1077.