

# Detection of Explosives by Amplifying Fluorescence Polymers: Introduction, Mechanism and Future Trends

Abbas Kebritchi

Chemical Engineering Group (Mosem Research Center), Engineering Department,  
Imam Hossein Comprehensive University, Tehran, Iran

Received: 17 August 2015, Accepted: 16 October 2015

## Abstract

Fluorescence is an interesting phenomenon emanated in photo-electrical characteristics of polymers. This feature is used in making highly sensitive polymer sensors. In this study, as part of the introduction given on luminescence and its different types there is a discussion on the production of chemical sensors based on conjugated polymers (CP). This discussion focuses on polymer sensors based on fluorescence polymers, their detection mechanisms, various kinds, pros and cons, different systems of media and future trends. It has been asserted that the chemical sensors based on amplifying fluorescent polymers (AFPs) have suitable semi-conductivity and processability at the same time. Amplifying fluorescent polymers through shifting the excitons in three dimensions and formation of molecular wire show high sensitivity in detection of explosives. The field tests performed by these devices have proved that this technology can be successfully used for high-sensitive detection of explosives, land mines and under-water mines based on nitro-aromatic compounds.

## Key Words

polymeric sensors,  
amplifying fluorescent polymer,  
explosives,  
conjugated polymers,  
chemical sensor

(\*) To whom correspondence should be addressed.  
E-mail: a.kebritchi@ippi.ac.ir

# شناسایی مواد منفجره با استفاده از پلیمرهای فلئورسان تقویت کننده: معرفی، سازوکار و روندهای آینده

عباس کبریتچی

تهران، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، دانشکده و پژوهشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی شیمی  
(مرکز علم و فناوری موسم)

دریافت: ۱۳۹۴/۵/۲۶، پذیرش: ۱۳۹۴/۷/۲۳

فلئورسان از پدیده‌های جالب در رفتار نوری-الکتریکی پلیمرهاست که با بهره‌برداری از آن می‌توان به حسگرهای پلیمری با حساسیت زیاد دست یافت. هدف از این مطالعه، افزون بر معرفی مقدماتی درخشایی و انواع آن، معرفی حسگرهای شیمیایی با تأکید بر انواع بر پایه پلیمرهای مزدوج و با تمرکز بیشتر بر حسگرهای پلیمری بر پایه پلیمرهای فلئورسانی تقویت‌کننده است. در این راستا، به تعریف این حسگرها و توضیح سازوکار شناسایی، انواع، مزایا و معایب، سامانه‌های مختلف و روندهای آینده آن‌ها پرداخته شده است. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد، حسگرهای بر پایه پلیمرهای فلئورسان تقویت‌کننده، نیمه‌رساناهای الکتریکی بوده و از خواص فرایندی مناسبی برخوردارند. این پلیمرها با قابلیت جابه‌جایی اکسایتون در سه‌بعد و تشکیل سیم مولکولی، حساسیت بسیار زیادی را در شناسایی مواد منفجره نشان می‌دهند. همچنین، آزمون‌های میدانی با دستگاه‌های ساخته شده بر اساس این فناوری اثبات کرد که می‌توان آن را با دقت بسیار زیاد و با موفقیت برای شناسایی مواد منفجره، مین‌های زمینی و دریایی استفاده کرد.

بسیار ش  
فصلنامه علمی-ترویجی  
سال ششم، شماره ۳  
صفحه ۹۵-۸۶، ۱۳۹۵  
ISSN: 2252-0449

## چکیده



عباس کبریتچی

## واژگان کلیدی

حسگر پلیمری،  
پلیمر فلئورسانی تقویت‌کننده،  
مواد منفجره،  
پلیمرهای مزدوج،  
حسگر شیمیایی

## مقدمه

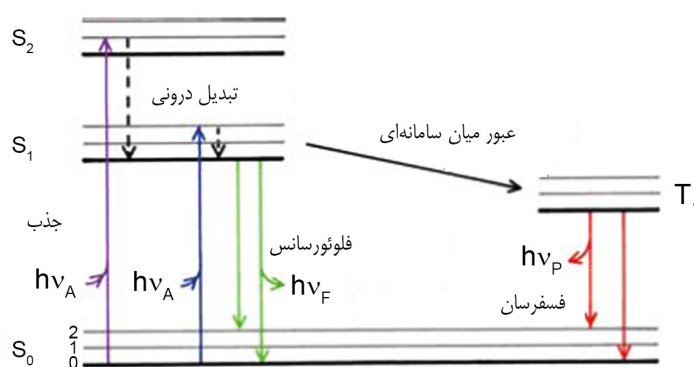
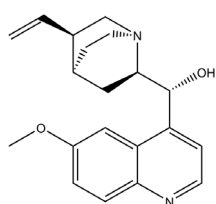
بیش از بیست سال از جنگ هشت ساله عراق علیه ایران می‌گذرد، اما هنوز آثار باقی‌مانده از جنگ، قربانی می‌گیرد. در حال حاضر، ایران در میان ۶۵ کشور دنیا که با مشکل میدان‌های مین در کشور خود دست به گریبان‌اند، پس از مصر، در جایگاه دوم قرار دارد [۱]. سالانه تعداد بسیار زیادی انسان، بر اثر انفجار مین‌های زمینی در مناطقی که درگیر جنگ بوده‌اند یا در اثر حملات تروریستی یا انتحاری با استفاده از مواد منفجره، جان خود را از دست می‌دهند. مواد منفجره و مین‌ها به‌طور عمده از ترکیبات آلی نیتروآروماتیکی، مانند تری‌نیتروتولون (TNT) ساخته می‌شوند. فرایندهای شناسایی مواد منفجره به‌طور معمول در فرودگاه‌ها، بندرها، جاده‌ها و همچنین در کنترل مرزها به‌کار برده می‌شوند. وقایع رخ داده در سال‌های اخیر، موجب افزایش نیاز به بهبود روش‌های شناسایی مواد منفجره شده است [۲]. این روش‌ها، با حساسیت زیاد، دقت مناسب و سرعت کافی می‌توانند فواید زیادی را برای امنیت ملی در داخل و خارج از مرزها، در مقوله پدافند غیرعامل داشته باشند. از جدیدترین روش‌های موفق در شناسایی مواد منفجره و مین‌ها

استفاده از پلیمرهای فلوروسانی تقویت‌کننده به‌عنوان حسگرهای پلیمری است.

## فلوروسانی

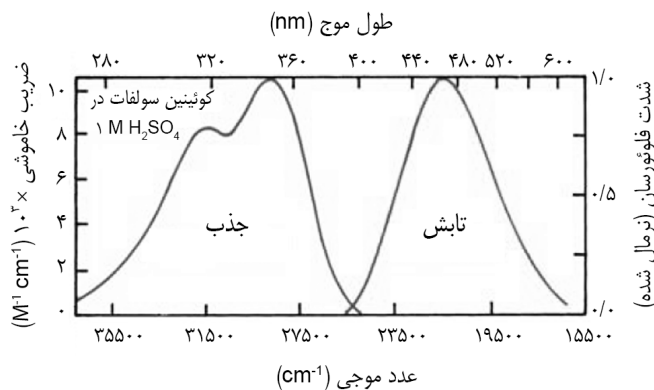
به تابش نور از هر جسمی، به‌نحوی که منشأ آن تابش حالت‌های برانگیخته الکترونی باشد، درخشایی (luminescence) گفته می‌شود. درخشایی بسته به ماهیت حالت برانگیخته، به دو دسته فلوروسانی (برانگیخته یگانه) و فسفرسانی (برانگیخته سه‌گانه) دسته‌بندی می‌شود.

در فلوروسانی الکترون در اوربیتال برانگیخته (با اسپین مخالف) با الکترون دوم در اوربیتال حالت پایه جفت می‌شود. در نتیجه، بازگشت به حالت پایه با چرخش اسپین و تابش یک فوتون به‌سرعت اتفاق می‌افتد. این تابش فوتون را فلوروسانی می‌نامند (شکل ۱-الف). از آنجا که سرعت‌های تابش فلوروسانی  $10^8 \text{ s}^{-1}$  است، طول عمر فلوروسانی، زمان متوسط میان برانگیختگی و بازگشت به حالت پایه است که به‌طور معمول نزدیک به  $10 \text{ ns}$  است. فلوروسانی معمولاً از مولکول‌های آروماتیک به‌وجود می‌آید [۳].



(ب)

(الف)



(ج)

شکل ۱- (الف) نمای فلوروسانی و فسفرسانی، (ب) ساختار ماده فلوروسان و (ج) طیف جذب و بازتابش ماده فلوروسان [۳].

این پلیمرها پیوندهای دوگانه مزدوج وجود دارد. پلیمرهای مزدوج به عنوان مواد آلی نیمه رسانا، به طور هم زمان از خاصیت نیمه رسانای الکتریکی و قابلیت شکل پذیری مناسب برخوردارند. مزیت اصلی حسگرهای بر پایه پلیمرهای مزدوج نسبت به حسگرهای شیمیایی کوچک مولکول، حساسیت زیاد آنها در پاسخ دهی به محرک های خارجی است. به بیان دیگر، حسگرهای پلیمری مزدوج از حساسیت افزایش یافته برخوردارند.

اکسایتون حالت مقید الکترون-حفره است که با نیروی الکتروستاتیک کولنی جذب یکدیگر می شوند. از سویی، آن را شبه ذره ای خشی می دانند که در عایق ها، نیمه رساناها و برخی مایعات وجود دارد. در همچنین، در حالت برانگیختگی ماده چگال است که با حرکت در ساختار شبکه و بدون انتقال بار الکتریکی خالص، انتقال انرژی را انجام می دهد. با جذب یک فوتون به وسیله ماده نیمه رسانا، الکترون از نوار ظرفیت به نوار رسانش برانگیخته می شود. در اثر این کار، حفره ای با بار مثبت ایجاد می شود. این الکترون در نوار رسانش به طور مؤثر جذب حفره می شود، زیرا در اثر نیروی دافعه کولنی، تعداد زیادی الکترون در اطراف نوار رسانش و حفره قرار دارد. این جذب تعادل انرژی پایداری را ایجاد می کند. در نتیجه، جفت الکترون-حفره مقید (اکسایتون) نسبت به نوع غیر مقید دارای انرژی کمتری است [۷،۸]. اکسایتون ها می توانند در امتداد زنجیر پلیمر یا جامد پلیمر فلئوروسان تقویت کننده نفوذ کنند و به وسیله سازوکار جفت شدن دوقطبی جابه جا شوند. قدرت درخشایی پلیمرهای مزدوج به قطبش و میزان نامستقری (delocalization) در ساختار الکترونیکی آنها بستگی دارد [۹،۱۰].

پلیمرهای مزدوج در حالت خالص از نظر رسانش الکتریکی میان گستره مواد نیمه رسانا تا عایق الکتروسیسته قرار می گیرند. با استفاده از فن دوپه کردن (تزریق بار) می توان رسانش الکتریکی آنها را افزایش داد. دوپه کردن در پلیمرهای مزدوج شامل اکسایش یا کاهش پیوندهای الکترونی  $\pi$  است. بر اساس مطالعات انجام شده، مقدار جابه جایی اکسایتون در پلیمرهای مزدوج به طول ۷ تا ۱۳ مونومر در راستای زنجیر پلیمر محدود می شود [۱۱،۱۲]. دوپه کردن در زمان اکسایش یا کاهش می تواند سبب ایجاد موضعی کاتیون، کاتیون رادیکال، آنیون، آنیون رادیکال، دی کاتیون یا دی آنیون شود. زنجیر پلیمر پس از باردار شدن موضعی، در اطراف محل بار شروع به آسایش می کند. این حرکت های زنجیری اطراف محل بار را شبه ذره (quasiparticle) می نامند. این شبه ذرات که به سه شکل کاتیون، رادیکال کاتیون و دی کاتیون وجود دارند، به ترتیب سولیتون (soliton)، پولارون (polaron) و بی پولارون (bipolaron)

به بیان دیگر، فلئوروسانی تابش نور از جسمی است که نور یا تابش الکترومغناطیس را جذب کرده و در اثر آن به حالت برانگیخته یگانه تغییر وضعیت داده است. به عنوان نمونه، اگر تابش جذب شده در ناحیه فرابنفش قرار دارد که برای انسان قابل مشاهده نیست، نور بازتاب شده در محدوده نور مرئی و قابل مشاهده قرار می گیرد (شکل ۱-ب). در بیشتر مواقع، نور بازتاب شده نسبت به تابش جذب شده، طول موج زیادتر و در نتیجه انرژی کمتری دارد (شکل ۱-ج) [۴].

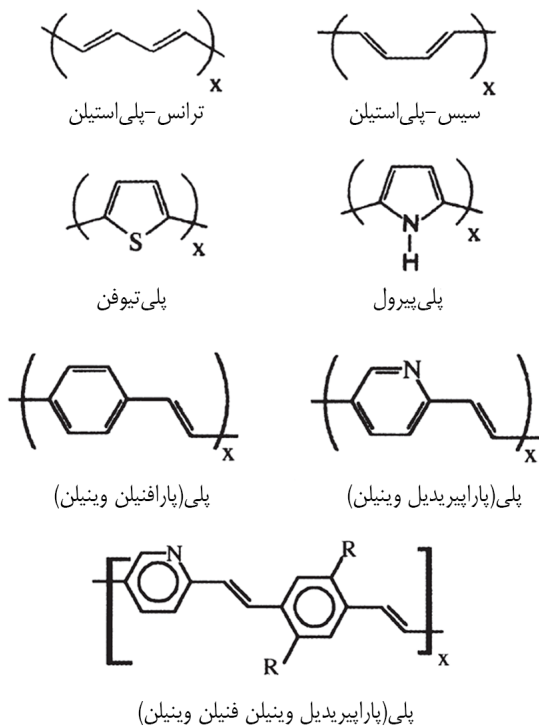
از آنجا که فسفرسانی، تابش نور ناشی از حالت های برانگیخته سه گانه است که در آن الکترون اوربیتال برانگیخته، با الکترون حالت پایه جهت اسپین یکسانی دارد (شکل ۱-الف)، بنابراین بازگشت به حالت پایه به سختی و با سرعت های تابش کم ( $10^0 s^{-1}$  تا  $10^3 s^{-1}$ ) انجام می شود. در نتیجه، زمان عمر فسفرسانی به طور معمول چند میلی ثانیه تا چند ثانیه است [۳].

### حسگری شیمیایی

محدوده حسگری شیمیایی به طور عمده، با تکیه بر مواد پیشرفته، مانند پلیمرها، بلورها و شیشه ها رشد یافته است. پلیمرهای الکترونیکی، دسته ای از پلیمرها هستند که قابلیت تبدیل سیگنال شیمیایی را به پاسخ الکتریکی یا نوری دارند. از مهم ترین انواع پلیمرهای الکترونیکی پلیمرهای مزدوج (CPS) هستند. این مواد گروهی از حسگرهای مهم شیمیایی را تشکیل می دهند که حساسیت زیادی دارند. به بیان دیگر، این حسگرها از قابلیت تشخیص تغییرات غلظت ماده شیمیایی در مقادیر بسیار کم برخوردارند. افزایش تقویت پلیمرهای مزدوج ناشی از بازده زیاد آنها در جابه جایی بار است. از پرکاربردترین پلیمرهای مزدوج در شناسایی مواد منفجره و مین ها، پلیمرهای فلئوروسان تقویت کننده (AFPS) هستند. این مواد، پلیمرهای با حساسیت افزایش یافته اند که به دلیل قابلیت عمل ویژه آنها به عنوان محیط گذار با بازده زیاد، حساس نامیده می شوند. به بیان دیگر، این پلیمرها در اثر برهم کنش با محرک (بخارهای مواد منفجره)، با جذب قوی سیگنال، پاسخ می دهند. پلیمرهای فلئوروسان تقویت کننده، برخلاف مدارهای سیلیکونی که الکترون ها یا حفره ها را جابه جا می کنند، حالت برانگیختگی الکترونی را انتقال می دهند [۵،۶].

### حسگرهای پلیمری مزدوج

پلیمرهای مزدوج به پلیمرهایی گفته می شود که در زنجیر اصلی دارای رزونانس الکترونی هستند. به بیان دیگر، در زنجیر اصلی



شکل ۲- ساختار چند پلیمر مزدوج [۱۴].

گرما، در اثر آسایش بار (بازگشت به لایه پایین)، به شکل تابش یا حرکت زنجیر، ایجاد می شود [۱۱، ۲۲]. سازوکار حسگری پلیمرهای مزدوج در شکل ۳ آمده است [۲۳]. دو حالت در نظر گرفته شده و فرض می شود، ورود محرک (PQ) سبب حذف کامل فلئورسان می شود:

- پذیرنده های فلئورسان به حالت جداگانه قرار دارند. ورود

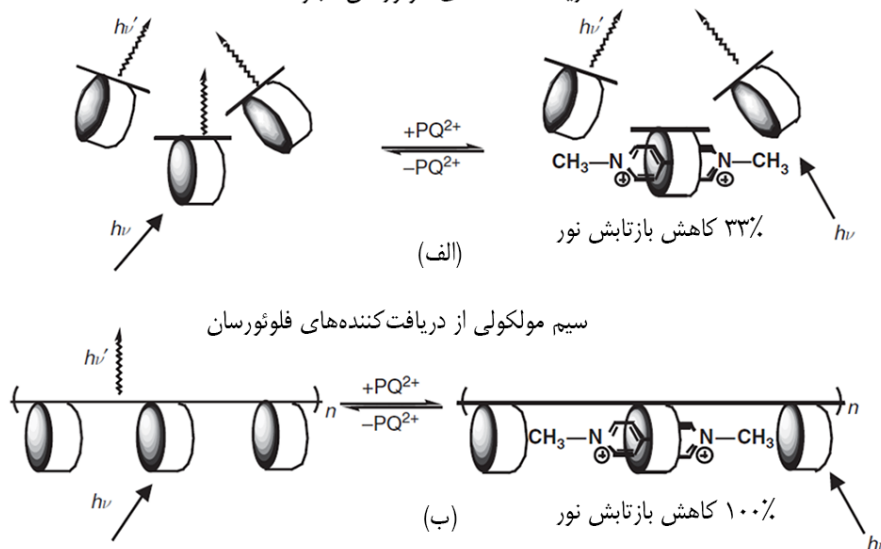
نامیده می شوند [۱۳].

به طور کلی، با تغییر غلظت آنالیت (analyte)، رسانش الکتریکی پلیمر تغییر می کند. این تغییرات را می توان به راحتی با اتصال فیلم پلیمر به دو میکروالکتروود اندازه گیری کرد. اولین بار در سال ۱۹۷۷ پژوهشگران با تزریق بار در پلی استیلین توانستند به رسانش الکتریکی قابل قبولی دست یابند. مطالعات اولیه نشان داد، خاصیت کلیدی در پلیمرهای الکترونیکی، وجود پیوندهای مزدوج در زنجیر اصلی پلیمر است. این پیوندها سبب ایجاد شکاف انرژی کوچک و در نتیجه، ایجاد خاصیت نیمه رسانا در پلیمر می شوند. شکل ۲ چند نمونه از پلیمرهای مزدوج با ساختار پیوندهای مزدوج را نشان داده است [۱۴].

### سازوکار حسگری پلیمری

در پلیمرهای مزدوج برخلاف پلیمرهای عادی، مونومرها از نظر الکتریکی نیز به یکدیگر متصل شده اند، به عبارتی سیم مولکولی تشکیل داده اند. انحلال پذیری یا فراورش این پلیمرها در کنار ویژگی نیمه رسانایی، سبب کاربرد گسترده آنها در ابزار و زمینه های مختلف، مانند تصویربرداری سلولی [۱۵]، سلول های خورشیدی [۱۶]، زیست پزشکی [۱۷]، زیست شناسی [۱۸]، نورالکترونیک [۱۹]، حسگرهای الکتروشیمیایی [۲۰] و فوتولتایی [۲۱] می شود. برای ایجاد فلئورسان، بسامدی از نور فرابنفش با طول موج مرئی (۴۰۰-۸۰۰ nm) تابانده می شود. این نور سبب انتقال الکترون از لایه ظرفیت به لایه بالای شده و اکسایتون ایجاد می کند. نور یا

#### دریافت کننده های فلئورسان مجزا شده



شکل ۳- سازوکار حسگری: (الف) شیمیایی کوچک مولکول و (ب) پلیمری [۲۳].

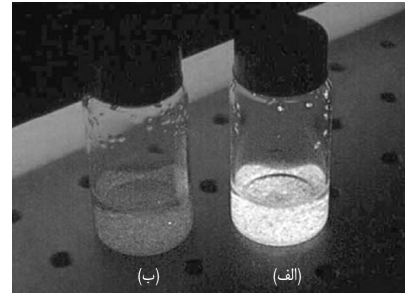
آمده است [۲۴].

### القای انتقال الکترون

سازوکار کاهش بازتابش نور در اثر جذب محرک به وسیله پلیمر مزدوج، ترانسانی سیگنال (signal transduction) نامیده می‌شود. در این سازوکار، شناسایی مواد منفجره با کمک حسگرهای پلیمری، به شکل القای انتقال الکترون (FQ) انجام می‌شود. زیرا بیشتر مواد منفجره مانند تری‌نیتروتولون دارای کمبود الکترون در ساختار خود هستند. افزون بر این، محصول جانبی مانند دی‌نیتروتولون (DNT) تولید می‌کنند که به شدت دارای کمبود الکترون است. نمایی از این سازوکار بسیار مؤثر و کاربردی در شکل ۵ نشان داده شده است [۲۳، ۲۵].

هنگامی که دو مولکول در وضعیت پایه خود قرار دارند، هیچ نیروی محرکی برای انتقال الکترون وجود ندارد. زمانی که الکترون‌دهنده در اثر تاباندن یک فوتون برانگیخته می‌شود، یک الکترون به پایین‌ترین اوربیتال مولکولی اشغال شده (LUMO) آن می‌رود. از آنجا که LUMO الکترون‌گیرنده دارای سطح انرژی کمتری نسبت به LUMO الکترون‌دهنده است، نیروی محرک برای انتقال الکترون از الکترون‌دهنده به الکترون‌گیرنده وجود دارد. این عمل به معنای اکسایش الکترون‌دهنده و کاهش الکترون‌گیرنده است که سبب کاهش انرژی سامانه می‌شود [۲۶].

در این حالت، چون وضعیت برانگیختگی الکترون‌دهنده با تشکیل یون-رادیکال از بین رفته است، الکترون‌دهنده دیگر امکان تابش ندارد. سریع‌ترین واکنش در این شرایط بازگشت الکترون از LUMO الکترون‌گیرنده به بالاترین اوربیتال مولکولی اشغال شده (HOMO) الکترون‌دهنده است که عملی غیرتابشی است. بیشتر مولکول‌ها قابلیت اکسایش مثبت و کاهش منفی دارند. بنابراین، تنها الکترون‌دهنده‌ها و الکترون‌گیرنده‌های قوی، در حلال‌های قطبی قابلیت انجام این جابه‌جایی الکترون را دارند. به‌طور کلی، تری‌نیتروتولون در اثر فشار بخار کم (ppb) و مخفیانه‌بودن تهدیدهای انفجاری، بسیار سخت شناسایی می‌شود [۲۶].

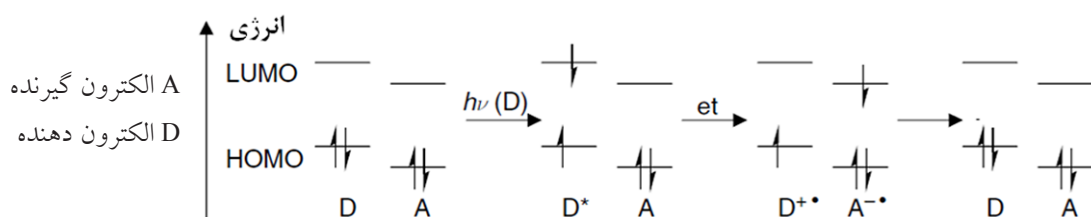


شکل ۴- دو ظرف دارای پلیمر فلئوروسان تقویت‌کننده (AFP) به‌منظور شناسایی مواد منفجره نیتروآروماتیک: (الف) فلئوروسانی در اثر تابش طول موج خاص و (ب) بخارهای تری‌نیتروتولون که سبب جذب فلئوروسانی AFP شده است [۲۴].

محرک (PQ) تنها سبب تغییر اندکی در شدت تابش می‌شود. به بیان دیگر، در اثر ورود محرک برهم‌کنش تنها با بخش کوچکی از پذیرنده‌ها برقرار می‌شود که به علت جدابودن آن‌ها، تنها بازتابش آن بخش متوقف می‌شود.

پذیرنده‌های فلئوروسان با سیم مولکولی به هم متصل‌اند. از آنجا که اکسایتون روی پذیرنده ثابتی قرار ندارد و می‌تواند روی موقعیت سایر پذیرنده‌ها نیز حرکت کند، سبب حذف کامل شدت تابش می‌شود. درحقیقت، در این حالت با جذب محرک روی پذیرنده، به علت اتصال کوالانسی پذیرنده‌ها، بازتابش به‌طور کامل حذف می‌شود [۲۳].

زمانی که پذیرنده‌ها با سیم مولکولی به هم متصل‌اند، اکسایتون قابلیت حرکت در راستای زنجیر را دارد. اگر اکسایتون در زمان حرکت با ماده شیمیایی محرک جذب شده به سیم مولکولی مواجه شود، تابش اکسایتون از بین می‌رود. این سازوکار سبب حساسیت زیاد شناسایی می‌شود، زیرا تابش کل زنجیر با جذب اکسایتون در یکی از پذیرنده‌های متصل به محرک، قطع می‌شود. این حالت مانند لامپ‌های رشته‌ای است که با خاموش شدن یکی همه خاموش می‌شوند. این اتفاق در حالت مجزا رخ نمی‌دهد. عدم تابش در حسگر، به‌عنوان پیام وجود آن ماده شیمیایی تلقی می‌شود [۲۳]. در شکل ۴ نمونه آزمایشگاهی پدیده نشان داده شده در شکل ۳



شکل ۵- نمای یک میکرواوربیتال برای انتقال بار ناشی از القای نور [۲۶].



شکل ۷- شناساگر دستی مواد منفجره بر اساس فناوری پلیمر فلئورسان تقویت‌کننده، با نام تجاری Fido ساخت شرکت ICx Technologies [۲۳].

کلوخه شدن انجام شده است [۲۷]. یکی از راه‌ها، افزودن گروه جانبی پنتی‌پتین (pentiptycene) به پلیمر شناساگر است. این گروه سه‌بعدی صلب حجیم، با حفظ امکان حرکت اکسایتون‌ها در سه‌بعد، در اثر ایجاد نیروی دافعه  $\pi-\pi$  میان دو زنجیر مانع از ایجاد کلوخه می‌شود. حذف گروه‌های حجیم در ساختار پلیمر اولیه، نتایج نامناسبی در پی دارد (شکل ۶) [۲۸].

#### ابزار شناسایی مواد منفجره

سامانه فیلم نازکی از پلیمرهای فلئورسان تقویت‌کننده در مقیاس آزمایشگاهی پاسخ مناسبی برای شناسایی ارائه کرده است. اکنون باید این سامانه در میدان عمل و در قالب دستگاه شناساگر ارزیابی شود.

اجزای اصلی دستگاه، شامل منبع نور برای برانگیختگی فیلم پلیمر فلئورسان تقویت‌کننده و شناساگر نور، به‌منظور تعیین شدت تابش بر زمان هستند. ترکیبی از چند قطعه نوری و الکترونیکی این دستگاه را سبک (۹۰۰ g) و قابل حمل برای افراد و وسایل نقلیه قرار داده است (شکل‌های ۷ و ۸).

#### کاربرد پلیمر فلئورسان تقویت‌کننده در مین‌یابی

قابل حمل بودن دستگاه شناساگر مواد منفجره، آن را برای مین‌یابی نیز مناسب ساخته، زیرا جزء اصلی مین‌ها TNT است. به دلیل دفن شدن مین‌ها در خاک، فشار بخار بسیار کمی از DNT وجود دارد. نکته مهم، گزینش‌پذیری مناسب و پایداری زیاد این وسیله در شرایط محیطی مختلف، به‌منظور مین‌یابی است (شکل ۹). این ابزار برای شناسایی ترکیبات آروماتیک دارای استخلاف نیترو و گروه‌های مشابه به‌کار می‌رود. آزمون‌های میدانی نشان می‌دهد،

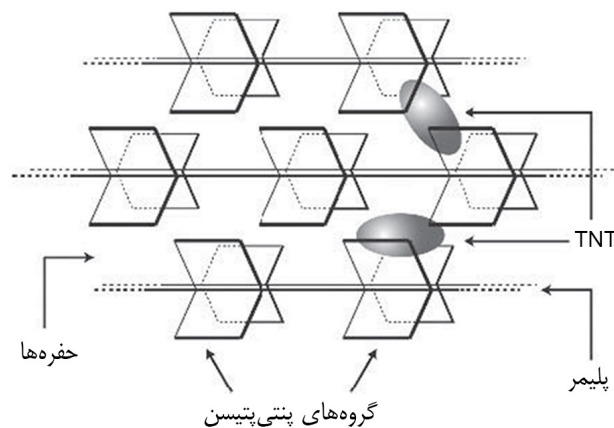
سامانه‌های شناسایی پلیمرهای فلئورسان تقویت‌کننده به دو دسته سامانه‌های شناسایی پلیمر-حلال و فیلم نازک حسگر پلیمری تفکیک می‌شوند.

#### عیوب سامانه شناسایی پلیمر-حلال

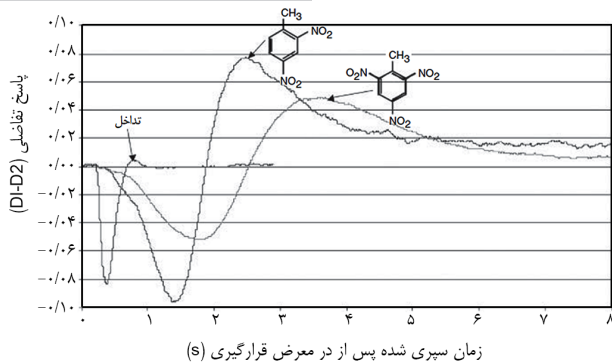
در این سامانه، پلیمر در حلالی مناسب قرار دارد. از نقص‌های شناسایی با کمک سامانه پلیمر-حلال تک‌بعدی بودن حساسیت حسگری پلیمر است. این مشکل به دلیل برهم‌کنش‌های ضعیف میان زنجیرهای پلیمر، در وضعیت محلول رقیق ایجاد می‌شود. به بیان دیگر، اکسایتون‌ها تنها در جهت زنجیر اولیه خود می‌توانند حرکت کنند و امکان حرکت از زنجیری به زنجیر دیگر فراهم نیست. عیب دیگر این که بازده جذب نور، که به سرعت جذب محرک به پلیمر محلول بستگی دارد، به‌علت رقابت حل شدن خود محرک، کم است. درنهایت، ابزارهای حالت محلولی برای کاربران فنی و غیرفنی، ابزارهای آسانی نیستند [۲۳].

#### فیلم نازک حسگرهای پلیمری مزدوج

سامانه دیگر استفاده از فیلمی نازک و بدون حلال از پلیمر فلئورسان تقویت‌کننده است. برخلاف حالت محلول، فیلم نازک پلیمر مزدوج از مزایای زیادی مانند سادگی ابزار، حذف رقابت حلال، بهبود سرعت جذب و اتصال قوی برخوردار است. امکان تقویت در سه‌بعد، افزون بر حرکت اکسایتون در خود زنجیر، امکان پرش از زنجیری به زنجیر مجاور را فراهم می‌کند. این موضوع سبب افزایش حساسیت حسگر می‌شود. کاستی‌های این سامانه احتمال کلوخه شدن زنجیرها، چسبیدن به یکدیگر و کاهش سطح انرژی سامانه است. تلاش‌های زیادی به‌منظور جلوگیری از



شکل ۶- نمای خلل و فرج ایجاد شده در ساختار مولکولی فیلم نازک پلیمری در اثر افزودن گروه پنتی‌پتین [۲۸].



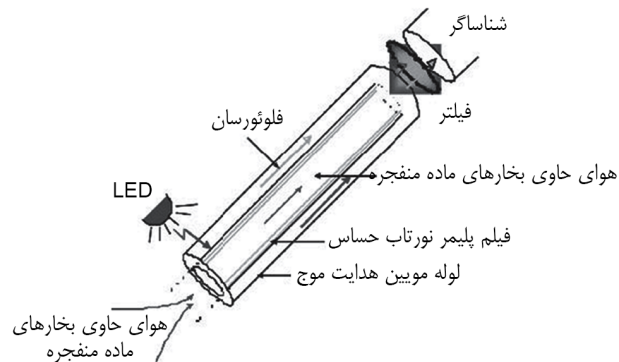
شکل ۱۰- پاسخ‌های متفاوت TNT و DNT در شناساگر دارای دوکانالی بر اساس فناوری پلیمر فلئورسان تقویت‌کننده [۲۳].

افزایش دقت و امکان استفاده از آن‌ها برای کاربر غیرفنی است. از عوامل مهم در شناسایی ماده منفجره، فشار بخار آن است. نکته جالب این که، مواد منفجره با فشار بخار کم به آرامی از سطح جدا می‌شوند و به سطح شناساگر نیز بهتر می‌چسبند. بنابراین، با وجود فشار بخار کم به خوبی شناسایی می‌شوند. در مقابل، مواد منفجره با فشار بخار زیاد، راحت‌تر از حسگر جدا می‌شوند [۵].

از دستگاه‌های آینده، دستگاه‌های دوکانالی (dual channel) هستند. از آنجا که شناسایی ماده منفجره به ساختار پلیمر مربوط است، با استفاده هم‌زمان از دو نوع فیلم پلیمری می‌توان در یک زمان مواد منفجره متفاوت را شناسایی کرد. برای نمونه با ورود هم‌زمان TNT و DNT و عبور آن‌ها در راستای دو فیلم پلیمری، TNT به علت فشار بخار کمتر و چسبندگی مناسب‌تر از دی‌نیتروتولون آهسته‌تر حرکت می‌کند. پاسخ متفاوت کانال ۱ و کانال ۲ با توجه به زمان اقامت بخارهای متفاوت در آن‌ها، معیاری برای شناسایی آن بخارهاست. تفاوت پیک جذب بر زمان در این دو ماده مشابه، فنی مناسب به منظور تشخیص تفاوت بخارهای ماده منفجره است (شکل ۱۰). این فن، مشابه فن استفاده شده در رنگ‌نگاری گازی (GC) است [۵].

### نتیجه‌گیری

در این مطالعه حسگرهای پلیمری بر پایه پلیمرهای فلئورسان تقویت‌کننده و کاربرد آن‌ها در آشکارسازی مواد منفجره و مین‌ها به دقت بررسی شدند. نتایج به دست آمده از این بررسی نشان داد، حسگرهای پلیمری بر پایه پلیمرهای فلئورسان تقویت‌کننده قابلیت استفاده به دو شکل سامانه محلولی و فیلم نازک را دارند.



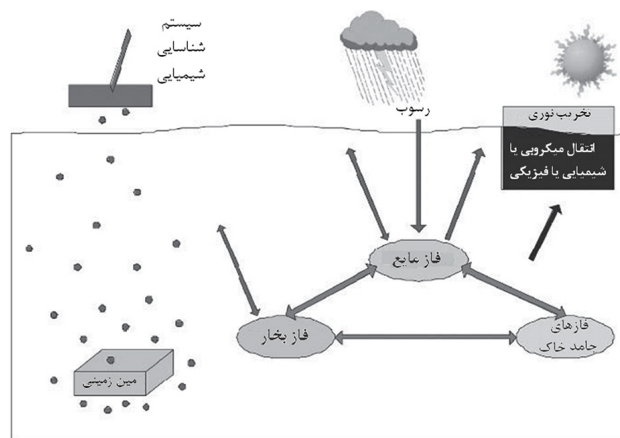
شکل ۸- ساختار شناساگر Fido ساخت شرکت ICx Technologies [۲۳].

این وسیله دست‌کم به اندازه سگ‌های آموزش دیده حرفه‌ای مطمئن است [۲۹].

سگ‌های آموزش دیده نیز می‌توانند ترکیبات آروماتیک دارای استخلاف نیترو و برخی سیکلوهاگزان‌ها را شناسایی کنند. سامانه‌های پلیمری در مقایسه با سگ‌ها از مزایای نسبی، مانند صرفه‌جویی در هزینه و زمان آموزش، خوراک و درمان سگ‌ها برخوردارند. همچنین، از این سامانه‌ها برای مین‌یاب‌های زیر آب نیز می‌توان استفاده کرد. کاستی این سامانه‌ها در شناسایی مواد منفجره پلاستیکی (plastic bonded explosives, PBXs) است که بخارهای HMX (اکتاهیدرو-۱،۳،۵،۷-تترانیترو-۱،۳،۵،۷-تترازوسین) و RDX (هگزاایدرو-۱،۳،۵-تری‌نیترو-۱،۳،۵-تری‌آزین) آن‌ها کمتر از ۲۹۰۳۰ ppb است [۲۹،۳۰].

### روندهای آینده

گام‌های آینده برای بهبود دستگاه‌های شناسایی مواد منفجره بر پایه پلیمرهای فلئورسان تقویت‌کننده کاهش وزن، بهبود کارایی،



شکل ۹- عوامل موثر بر شناسایی مین‌ها با استفاده از روش‌های شیمیایی [۲۳].



ماده منفجره را شناسایی کرد. شناسایی با این حسگرها نسبت به سگ‌های حرفه‌ای آموزش دیده، افزون بر برخورداری از دقتی برابر یا بیشتر، سبب صرفه‌جویی در هزینه‌های خرید، خوراک، نگهداری، آموزش و درمان سگ‌ها نیز می‌شود. عیب حسگرهای پلیمری نیز ناکارآمدی در شناسایی مواد منفجره پلاستیکی دارای HMX و RDX است.

## مراجع

- Demining C.A., Sleeping is Always Awake, <http://www.hamshahronline.ir/details/186115/Defence/security>, available in 29 September 2012.
- Bagheripour M.J., Hajizadeh A., and Nazarian S., Using Bioluminescence of Microorganisms in Detection of Explosives, *Second Conference on Explosive Detection*, Tehran, January 14, 2015.
- Lakowicz J.R., *Principles of Fluorescence Spectroscopy*, Springer, Singapore, Ch. 1, 2006.
- Demchenko A.P., *Introduction to Fluorescence Sensing*, Springer, Ukraine, Ch. 3, 2009.
- Kim H.N., Guo Z., Zhu W., Yoon J., and Tian H., Recent Progress on Polymer-Based Fluorescent and Colorimetric Chemosensors, *Chem. Soc. Rev.*, **40**, 79-93, 2011.
- Li Z., Wang Y., Ni Y., and Kokot S., A Sensor Based on Blue Luminescent Graphene Quantum Dots for Analysis of a Common Explosive Substance and an Industrial Intermediate, 2,4,6-Trinitrophenol, *Spectrochim. Acta A*, **137**, 1213-1221, 2015.
- Knox, R.S., *Theory of Excitons*, Academic, New York, Ch. 1, 1963.
- Couto O.D.D. (Jr.), Puebla J., Chekhovich E.A., Luxmoore I.J., Elliott C.J., Babazadeh N., Skolnick M.S., Tartakovskii A.I., and Krysa A.B., Charge Control InInp/(Ga, In) P Single Quantum Dots Embedded in Schottky Diodes, *Phys. Rev. B*, **84**, 125301, 2011.
- Dou J.H., Zheng Y.Q., Lei T., Zhang S.D., Wang Z., Zhang W.B., Wang J.Y., and Pei J., Conjugated Polymers: Systematic Investigation of Side-Chain Branching Position Effect on Electron Carrier Mobility in Conjugated Polymers, *Adv. Funct. Mater.*, **24**, 6404, 2014.
- McQuade D.T., Pullen A.E., and Swager T.M., Conjugated Polymer-Based Chemical Sensors, *Chem. Rev.*, **100**, 2537-2574, 2000.
- Swager T.M., The molecular Wire Approach to Sensory Signal Amplification, *Accounts Chem. Res.*, **31**, 201-207, 1998.
- Coble P.G., Lead J., Baker A., Reynolds D.M., and Spencer R.G., *Aquatic Organic Matter Fluorescence*, Cambridge University, United Kingdom, Ch. 1, 2014.
- Kar P., *Doping in Conjugated Polymers*, John Wiley and Sons, Canada, Ch. 4, 2013.
- Farchioni R. and Grosso G., *Organic Electronic Materials: Conjugated Polymers and Low Molecular Weight Electronic Solids*, **41**, Springer, Ch. 1, 2013.
- Li J., Liu J., Wei C.W., Liu B., O'Donnell M., and Gao X., Emerging Applications of Conjugated Polymers in Molecular Imaging, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **15**, 17006-17015, 2013.
- Cheng Y.J., Yang S.H., and Hsu C.S., Synthesis of Conjugated Polymers for Organic Solar Cell Applications, *Chem. Rev.*, **109**, 5868-5923, 2009.
- Smela E., Conjugated Polymer Actuators for Biomedical Applications, *Adv. Mater.*, **15**, 481-494, 2003.
- Chen L., McBranch D.W., Wang H.L., Helgeson R., Wudl F., and Whitten D.G., Highly Sensitive Biological and Chemical Sensors Based on Reversible Fluorescence Quenching in a Conjugated Polymer, *P. Natl. Acad. Sci. USA*, **96**, 12287-12292, 1999.
- Moliton A. and Hiorns R.C., Review of Electronic and Optical Properties of Semiconducting  $\Pi$ -Conjugated Polymers: Applications in Optoelectronics, *Polym. Int.*, **53**, 1397-1412, 2004.
- Rahman M.A., Kumar P., Park D.S., and Shim Y.B., Electrochemical Sensors Based on Organic Conjugated Polymers,

- Sensors*, **8**, 118-141, 2008.
21. Zhu Z., Waller D., Gaudiana R., Morana M., Mühlbacher D., Scharber M., and Brabec C., Panchromatic Conjugated Polymers Containing Alternating Donor/Acceptor Units for Photovoltaic Applications, *Macromolecules*, **40**, 1981-1986, 2007.
  22. Masai H., Terao J., Seki S., Nakashima S., Kiguchi M., Okoshi K., Fujihara T., and Tsuji Y., Synthesis of One-Dimensional Metal-Containing Insulated Molecular Wire with Versatile Properties Directed Toward Molecular Electronics Materials, *J. Am. Chem. Soc.*, **13**, 1742-1745, 2014.
  23. Marshall M. and Oxley J.C., *Aspects of Explosives Detection*, Elsevier, UK, Ch. 10, 2011.
  24. Woodfin R.L., *Trace Chemical Sensing of Explosives*, John Wiley and Sons, USA, Ch. 9, 2006.
  25. Zhou Q. and Swager T.M., Fluorescent Chemosensors Based on Energy Migration in Conjugated Polymers: The Molecular Wire Approach to Increased Sensitivity, *J. Am. Chem. Soc.*, **117**, 12593-12602, 1995.
  26. Suppan P. and Vauthey E., The Energy Balance of Photoinduced Electron Transfer Reactions, *J. Photochem. Photobiol.*, **49**, 239-248, 1989.
  27. Singh S., Sensors-An Effective Approach for the Detection of Explosives, *J. Hazard. Mater.*, **144**, 15-28, 2007.
  28. Yang J.S., Huang Y.T., Ho J.H., Sun W.T., Huang H.H., Lin Y.C., Huang S.J., Huang S.L., Lu H.F., and Chao I., A Pentip-tycene-Derived Light-Driven Molecular Brake, *Org. Lett.*, **10**, 2279-2282, 2008.
  29. Cumming C.J., Aker C., Fisher M., Fok M., La Grone M.J., Reust D., Rockley M.G., Swager T.M., Towers E., and Williams V., Using Novel Fluorescent Polymers as Sensory Materials for Above-Ground Sensing of Chemical Signature Compounds Emanating from Buried Landmines, *IEEE T. Geosci. Remote*, **39**, 1119-1128, 2001.
  30. Fu X., Benson R.F., Wang J., and Fries D., Remote Underwater Electrochemical Sensing System for Detecting Explosive Residues in the Field, *Sensor Actuat. B-Chem.*, **106**, 296-301, 2005.