

Colorimetric Sensors: A Fast and Simple Response to the Threat of Nerve Agents in Military Medicine

Ramin Karimian^{1*}

¹ Chemical Injuries Research Center, Systems Biology and Poisonings Institute, Baqiyatallah University of Medical Sciences, Tehran, Iran

Received: 11 February 2025 Accepted: 25 March 2025

Abstract

Background and Aim: Nerve agents, one of the most deadly chemical agents that inhibit the acetylcholinesterase enzyme, are considered a serious threat in battlefields and terrorist attacks. Given the limitations of accurate laboratory methods in critical situations, this study aimed to systematically investigate the capabilities of colorimetric sensors as a rapid and practical solution for field detection of nerve agents.

Methods: In this review, articles related to the design and application of colorimetric sensors for the detection of nerve agents were examined by systematically searching reputable databases. Types of sensors, including sensors based on small organic molecules, polymers, metal complexes, and nanomaterials, were analyzed in terms of mechanisms of action, sensitivity, selectivity, and application capabilities.

Results: Colorimetric sensors with various mechanisms, including nucleophilic reactions, ring opening, and changes in nanoparticle aggregation, are capable of detecting nerve agents with low detection limits (in the nanomolar range) and short response times (less than a second). These sensors can be converted into paper strips and integrated into combat clothing, allowing for low-cost mass production. However, challenges in the fields of selectivity, environmental stability, and mass production still require further research.

Conclusion: Colorimetric sensors are considered a strategic and transformative solution in the military field. The development and localization of this technology, utilizing advanced nanomaterials and artificial intelligence, will play a vital role in enhancing defense capabilities and national security.

Keywords: Nerve Agents, Colorimetry, Chemical Sensor, Military Medicine.

* Corresponding Author: Ramin Karimian

Address: Chemical Injuries Research Center, Systems Biology and Poisonings Institute, Baqiyatallah University of Medical Sciences, Tehran, Iran.

E-mail: Karimian.r@gmail.com



حسگرهای رنگ‌سنجی: پاسخی سریع و ساده به تهدید عوامل اعصاب در طب نظامی

رامین کریمیان*

^۱ مرکز تحقیقات آسیب‌های شیمیایی، پژوهشکده سیستم بیولوژی و مسمومیت‌ها، دانشگاه علوم پزشکی بقیه الله (عج)، تهران، ایران

دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۱۱/۲۳ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۱/۰۵

چکیده

زمینه و هدف: عوامل اعصاب یکی از مرگبارترین عوامل شیمیایی با مهار آنزیم استیل کولین‌استراز، تهدیدی جدی در صحنه‌های نبرد و اقدامات تروریستی محسوب می‌شوند. با توجه به محدودیت روش‌های آزمایشگاهی دقیق در شرایط بحرانی، این مطالعه با هدف بررسی سیستماتیک قابلیت‌های حسگرهای رنگ‌سنجی به عنوان راهکاری سریع و کاربردی برای تشخیص میدانی عوامل اعصاب انجام شد.

روش‌ها: در این مطالعه مروری، با جستجوی نظام‌مند در پایگاه‌های اطلاعاتی معتبر، مقالات مرتبط با طراحی و کاربرد حسگرهای رنگ‌سنجی برای تشخیص عوامل اعصاب مورد بررسی قرار گرفت. انواع حسگرها شامل حسگرهای مبتنی بر مولکول‌های کوچک آلی، پلیمرها، کمپلکس‌های فلزی و نانومواد از نظر مکانیسم‌های عمل، حساسیت، گزینش‌پذیری و قابلیت‌های کاربردی تحلیل شدند.

یافته‌ها: حسگرهای رنگ‌سنجی با مکانیسم‌های مختلفی از جمله واکنش‌های هسته‌دوستی، باز شدن حلقه و تغییر در تجمع نانوذرات، قادر به تشخیص عوامل اعصاب با حد تشخیص پایین (در حد نانومولار) و زمان پاسخ کوتاه (کمتر از ثانیه) هستند. این حسگرها قابلیت تبدیل به نوارهای کاغذی و یکپارچه‌سازی در البسه رزمی را داشته و امکان تولید انبوه با هزینه پایین را فراهم می‌کنند. با این وجود، چالش‌هایی در زمینه گزینش‌پذیری، پایداری در شرایط محیطی و تولید انبوه هنوز نیازمند پژوهش‌های بیشتر است.

نتیجه‌گیری: حسگرهای رنگ‌سنجی به عنوان راهکاری استراتژیک و تحول‌آفرین در عرصه نظامی مطرح هستند. توسعه و بومی‌سازی این فناوری با بهره‌گیری از نانومواد پیشرفته و هوش مصنوعی، نقش حیاتی در ارتقای توان دفاعی و امنیت ملی ایفا خواهد کرد.

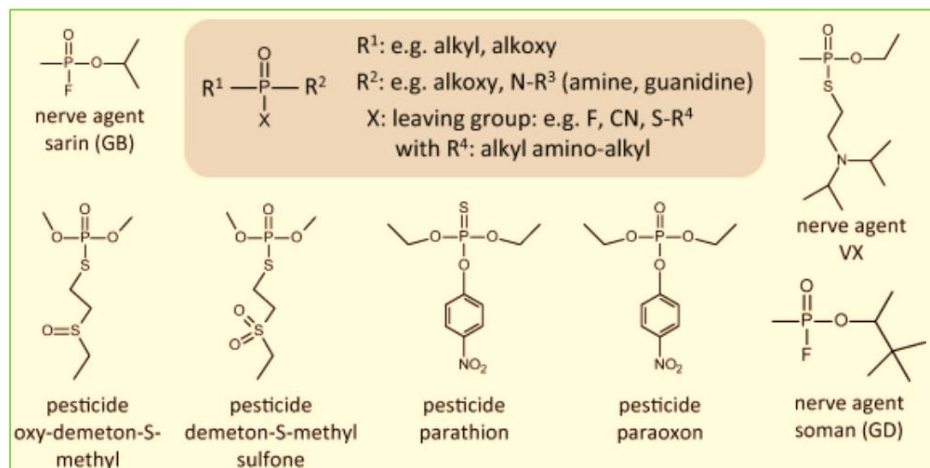
کلیدواژه‌ها: عوامل اعصاب، رنگ‌سنجی، حسگر شیمیایی، طب نظامی.

* نویسنده مسئول: رامین کریمیان

آدرس: مرکز تحقیقات آسیب‌های شیمیایی، پژوهشکده سیستم بیولوژی و مسمومیت‌ها، دانشگاه علوم پزشکی بقیه الله (عج)، تهران، ایران.

ایمیل: Karimian.r@gmail.com

سرعت اثر، تهدیدی جدی در صحنه‌های نبرد و اقدامات تروریستی هستند (شکل ۱) (۲). شناسایی سریع و قابل اطمینان این عوامل در صحنه تهدید، اولین و حیاتی‌ترین گام در اجرای موفق اقدامات مقابله‌ای، درمانی و حفاظتی است (۳). در جنگ جهانی اول، استفاده از گازهای سمی به عنوان سلاح‌های جنگی آغاز شد و این روند در جنگ‌های بعدی نیز ادامه یافت. با گذشت زمان، توسعه و تولید این مواد به عنوان سلاح‌های بیولوژیک و شیمیایی به یک تهدید جدی برای امنیت جهانی تبدیل شده‌است. به همین دلیل، تشخیص سریع و مؤثر این مواد در محیط و در شرایط بحرانی و جنگی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. این مقاله به بررسی پیشرفت‌های اخیر در زمینه تشخیص عوامل اعصاب به روش رنگ‌سنجی پرداخته و چالش‌ها و فرصت‌های موجود در این حوزه را مورد بحث قرار می‌دهد.



شکل-۱. ساختارهای شیمیایی عوامل اعصاب ارگانوسفره و آفت‌کش‌ها.

شناسایی ترکیبات شیمیایی است. این تکنیک به دو نوع اصلی تقسیم می‌شود: کروماتوگرافی مایع (HPLC) و کروماتوگرافی گازی (GC).

کروماتوگرافی مایع با کارایی بالا (HPLC): این روش به دلیل دقت و حساسیت بالای آن در شناسایی ترکیبات شیمیایی، به طور گسترده‌ای در تشخیص عوامل اعصاب مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این روش، نمونه‌ها از طریق یک ستون پر شده با فاز ساکن عبور می‌کنند و بر اساس خواص فیزیکی و شیمیایی خود جداسازی می‌شوند. HPLC می‌تواند به شناسایی مقادیر بسیار کم از عوامل اعصاب کمک کند و بنابراین برای تشخیص سریع و دقیق این مواد بسیار مناسب است.

کروماتوگرافی گازی (GC): این روش نیز به طور گسترده‌ای برای شناسایی ترکیبات فرار استفاده می‌شود. در این روش نمونه‌ها به بخار تبدیل می‌شوند و از طریق یک ستون جداسازی می‌شوند. این تکنیک به دلیل سرعت بالا و دقت آن، به ویژه در شناسایی گازهای اعصاب مانند سارین و VX بسیار مؤثر است (۴،۵).

مقدمه

عوامل اعصاب، گروهی از ترکیبات شیمیایی هستند که می‌توانند به شدت بر روی سیستم عصبی تأثیر بگذارند. این مواد به دو دسته اصلی تقسیم می‌شوند: عوامل اعصاب طبیعی و مصنوعی. عوامل اعصاب طبیعی شامل سموم تولید شده توسط برخی از موجودات زنده مانند مارها و حشرات هستند، عوامل اعصاب مصنوعی شامل مواد شیمیایی ساخته دست بشر مانند گاز اعصاب (نظامی) و برخی از آفت‌کش‌ها (غیر نظامی) می‌باشند. عوامل اعصاب نظامی، با مهار آنزیم استیل‌کولین‌استراز (AChE) در سیناپس‌های عصبی، منجر به تجمع استیل‌کولین، بیش‌فعالی سیستم عصبی، فلج عضلات تنفسی و در نهایت مرگ می‌شوند (۱،۲). عوامل سری G مانند سارین و سومان و عوامل سری V مانند VX از مهم‌ترین نمونه‌های این ترکیبات هستند که به دلیل سمیت فوق‌العاده بالا، فرارپذیری

روش‌های تشخیص عوامل اعصاب

تشخیص عوامل اعصاب چالش مهم در حوزه‌های نظامی، پزشکی و محیط زیست مطرح است. بخاطر اثرات مخرب این مواد شیمیایی سمی، توسعه روش‌های مؤثر و سریع برای شناسایی این ترکیبات از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این بخش، به بررسی روش‌های مختلف تشخیص عوامل اعصاب، از جمله روش‌های مستقیم و غیرمستقیم، پرداخته شد.

۱. روش‌های مستقیم

روش‌های مستقیم تشخیص عوامل اعصاب معمولاً شامل استفاده از تکنیک‌های تحلیلی پیشرفته هستند که می‌توانند به دقت و حساسیت بالا ترکیبات شیمیایی را شناسایی کنند که از اعتبار بالایی برخوردارند. با این حال، این روش‌ها معمولاً نیاز به تجهیزات پیچیده و زمان‌بر دارند. این روش‌ها به طور کلی به دو دسته اصلی تقسیم می‌شوند: روش‌های کروماتوگرافی و روش‌های طیف‌سنجی.

۱.۱. کروماتوگرافی

کروماتوگرافی یکی از روش‌های اصلی برای جداسازی و

رنگی هستند که در حضور عوامل اعصاب تغییر رنگ می‌دهند. برتری اصلی این حسگرها، سادگی، هزینه کم، قابلیت حمل، سرعت پاسخ بالا و امکان تشخیص کیفی و نیمه کمی تنها با مشاهده تغییر رنگ با چشم غیرمسلح است که آن‌ها را برای استفاده کارکنان نظامی، واحدهای امدادی و حتی عموم مردم در شرایط بحران ایده‌آل می‌سازد (۸-۶).

علاوه بر این، توسعه نانوذرات و مواد جدید در زمینه حسگرهای شیمیایی، امکان طراحی حسگرهایی با حساسیت و دقت بالا را فراهم کرده‌است. نانوذرات به دلیل نسبت سطح به حجم بالای خود، می‌توانند به طور مؤثری در واکنش‌های شیمیایی شرکت کنند و به همین دلیل، به عنوان حسگرهای بسیار حساسی عمل کنند. همچنین می‌توانند به عنوان حامل‌های مؤثر برای مواد رنگی عمل کنند و واکنش‌های شیمیایی را تسریع کنند. این پیشرفت‌ها می‌توانند به بهبود عملکرد حسگرها و افزایش دقت تشخیص کمک کنند. این حسگرها معمولاً شامل نانوذرات فلزی مانند نقره، طلا، و اکسیدهای فلزی هستند که می‌توانند به طور خاص به عوامل اعصاب پاسخ دهند یا به صورت ترکیب با مواد دیگر (نانوکامپوزیتی) به عنوان حسگرهای چندمنظوره عمل کنند و به طور همزمان چندین نوع عامل عصبی را شناسایی کنند. آن‌ها به دلیل قابلیت تطبیق‌پذیری و عملکرد بالا، در تحقیقات اخیر مورد توجه قرار گرفته‌اند. در نهایت، با توجه به تهدیدات روزافزون ناشی از استفاده از عوامل اعصاب در جنگ‌ها و حملات تروریستی، نیاز به روش‌های مؤثر و سریع برای تشخیص این مواد بیش از پیش احساس می‌شود. روش‌های رنگ‌سنجی به عنوان یک گزینه امیدوارکننده در این زمینه مطرح هستند و می‌توانند به عنوان ابزاری ارزشمند برای حفاظت از سلامت عمومی و امنیت ملی به کار گرفته شوند (۱۰-۹).

۲.۲. انواع حسگرهای شیمیایی

در این بخش، انواع حسگرهای شیمیایی مورد استفاده برای شناسایی عوامل اعصاب و آفت‌کش‌های ارگانوفسفره مورد بررسی و تحلیل قرار می‌گیرند. اساس عملکرد این حسگرها، معمولاً بر پایه ایجاد تغییرات قابل مشاهده در رنگ استوار است. این حسگرها را می‌توان عمدتاً در چهار گروه اصلی دسته‌بندی نمود. این چهار گروه شامل حسگرهای مبتنی بر مولکول‌های کوچک آلی، پلیمرها و نانو الیاف، ترکیبات فلزی و نانومواد است.

حسگرهای مبتنی بر مولکول‌های کوچک آلی، گروه اول هستند که حول محور مولکول‌های آلی با ساختار ساده و قابلیت تنظیم آسان خواص نوری معین طراحی شده‌اند. ترکیباتی مانند مشتقات تری فنیل آمین (۱۱)، رودامین (۱۲) و کینولین و ایمیدازول (۱۳) با داشتن گروه‌های عاملی فعال و حساسیت بالا (حد تشخیص ۸ نانومولار) حسگرهای کارآمدی را تشکیل داده‌اند. برای مثال، حسگر بر پایه تری فنیل آمین در مواجهه با بخار DCP در کمتر از ۱۵ ثانیه از بی‌رنگ به زرد تغییر رنگ می‌دهد (۱۱). مکانیسم کار این حسگرها عموماً بر یک واکنش شیمیایی مستقیم بین بخش

۲.۱. طیف‌سنجی

طیف‌سنجی یکی دیگر از روش‌های مؤثر برای تشخیص عوامل اعصاب است. این تکنیک به بررسی تعامل تابش الکترومغناطیسی با مواد شیمیایی می‌پردازد و می‌تواند اطلاعات دقیقی در مورد ساختار و ترکیب شیمیایی ارائه دهد.

طیف‌سنجی جرمی (MS): این روش می‌تواند به شناسایی و تعیین جرم مولکولی ترکیبات شیمیایی کمک کند. این تکنیک معمولاً به عنوان یک تکنیک مکمل به کار می‌رود و می‌تواند به شناسایی ترکیبات ناشناخته و تجزیه و تحلیل محصولات تجزیه‌ای کمک کند. در ترکیب با HPLC، این روش می‌تواند به شناسایی دقیق عوامل اعصاب در نمونه‌های پیچیده کمک کند.

طیف‌سنجی مادون قرمز (IR): این تکنیک به شناسایی گروه‌های عاملی در ترکیبات شیمیایی کمک می‌کند. با استفاده از IR، می‌توان به سرعت و به آسانی ترکیبات شیمیایی را شناسایی کرد و به همین دلیل، این روش نیز در تشخیص عوامل اعصاب کاربرد دارد (۵،۴).

۲. روش‌های غیرمستقیم

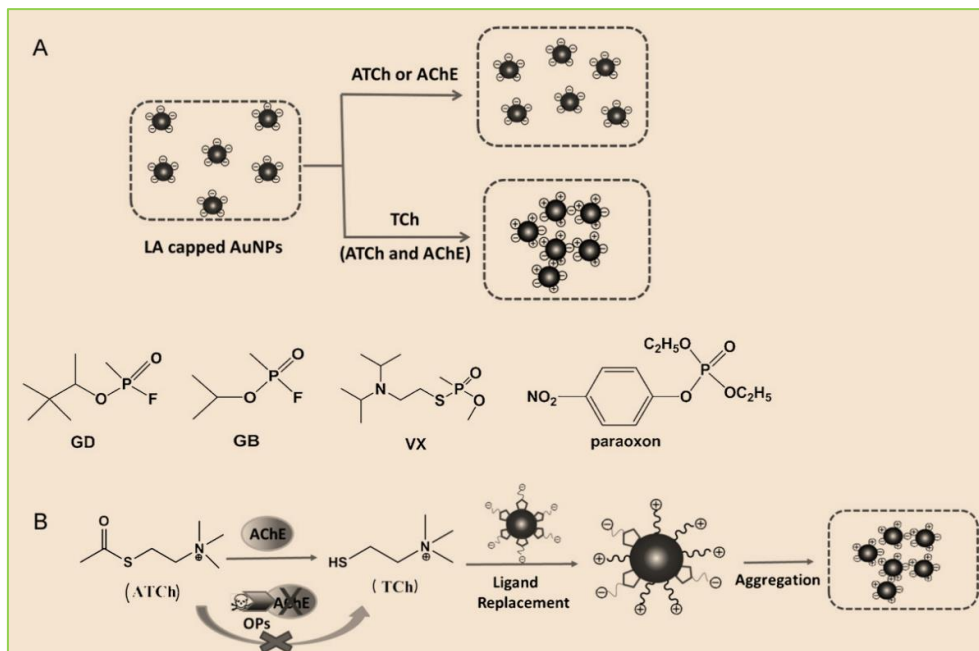
روش‌های مستقیم اگرچه از حساسیت و دقت بالایی برخوردارند، اما نیازمند نمونه‌برداری، انتقال نمونه به آزمایشگاه، آماده‌سازی پیچیده و اپراتور متخصص هستند که این موارد باعث طولانی شدن زمان پاسخ و کاهش کارایی آن‌ها در شرایط بحرانی، مانند حملات تروریستی یا حوادث طبیعی می‌شود. به همین دلیل، نیاز به توسعه روش‌های تشخیصی میدانی و سریع برای شناسایی این مواد سمی به شدت احساس می‌شود. روش‌های غیرمستقیم معمولاً شامل استفاده از حسگرها و تکنیک‌های ساده‌تر هستند که می‌توانند به سرعت و به آسانی وجود عوامل اعصاب را شناسایی کنند. این روش‌ها معمولاً بر پایه تغییرات فیزیکی یا شیمیایی ناشی از واکنش با عوامل اعصاب عمل می‌کنند.

۱.۲. حسگرهای شیمیایی

حسگرهای شیمیایی ابزارهای مهمی برای تشخیص عوامل اعصاب هستند. این حسگرها شامل مواد حساس به تغییرات شیمیایی هستند که در حضور عوامل اعصاب تغییر می‌کنند. از مهم‌ترین این حسگرها می‌توان به حسگرهای الکتروشیمیایی و حسگرهای رنگ‌سنجی اشاره کرد.

حسگرهای الکتروشیمیایی به تغییرات الکتریکی ناشی از واکنش با عوامل اعصاب پاسخ می‌دهند. این تکنیک‌ها شامل استفاده از الکترودهای اصلاح شده هستند که می‌توانند به طور خاص به عوامل اعصاب پاسخ دهند. حسگرهای الکتروشیمیایی به دلیل دقت و حساسیت بالای خود، در تشخیص عوامل اعصاب کاربرد دارند.

حسگرهای رنگ‌سنجی به دلیل سادگی و قابلیت حمل، به ویژه در شرایط نظامی و بحران‌های بهداشتی از اهمیت بالایی برخوردارند. حسگرهای رنگ‌سنجی معمولاً شامل نانوذرات و مواد



شکل ۲- (A) تجمع نانوذرات طلا (AuNPs) پوشش داده شده و ساختارهای شیمیایی ترکیبات آلی فرار مورد بررسی، که در آن دو مورد از نوع G سارین (GB) و سومان (GD)، یکی از نوع V (VX) و دیگری یک آفت کش (پاراکسون) است. (B) تصویرسازی استراتژی سیگنال‌دهی برای ترکیبات آلی فرار بر اساس کاوشگر نانوذرات طلا.

گروه سوم، حسگرهایی هستند که از ترکیبات فلزی (کمپلکس‌های فلزی) ساخته می‌شوند. این حسگرها با استفاده از ویژگی‌های نوری خاص این ترکیبات، عوامل شیمیایی را شناسایی می‌کنند. فلزاتی مانند عناصر گروه پلاتین و لانتانیدها، به دلیل برخورداری از خواص نوری استثنایی، گزینه‌های ایده‌آلی برای ساخت این نوع حسگرها محسوب می‌شوند. برای مثال، کمپلکس ارگانوایریدیم (III) در اثر برهمکنش با DCP، تغییر رنگ درخشانی از سبز به نارنجی-قرمز از خود نشان می‌دهد که با چشم غیرمسلح و در زیر نور UV به راحتی قابل تشخیص است (۱۶).

مهم‌ترین مزیت‌های این حسگرها عبارتند از: داشتن حساسیت فوق‌العاده بالا، قابلیت تنظیم دقیق ویژگی‌های نوری با تغییر مولکول‌های اطراف فلز (لیگاندها) و پایداری بسیار خوب در برابر گرما و نور. با این وجود، این حسگرها معایب و محدودیت‌هایی نیز دارند: روش ساخت و خالص‌سازی پیچیده‌ای و هزینه تولید بالایی دارند و نسبت به شرایط محیطی حساس هستند.

گروه چهارم، حسگرهای ساخته شده از نانومواد هستند. این حسگرها از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی بی‌نظیر مواد در اندازه نانو استفاده می‌کنند. برای مثال نانوذرات طلا (AuNPs) به دلیل پدیده پلاسمون سطحی و تغییر رنگ ناشی از تجمع، پایه مناسبی برای حسگرها هستند. تجمع نانوذرات طلا در حضور محصولات حاصل از هیدرولیز عوامل اعصاب (مانند یون‌های فلورید یا تیول) باعث تغییر رنگ از قرمز به آبی می‌شود. این روش، اساس کار حسگر ساده و بسیار حساسی برای تشخیص VX است که توسط تاکاهاشی و همکارانش (۲۰۲۱) گزارش شده است (۱۷). از مهم‌ترین این مواد می‌توان به نانوذرات فلزی، نیمه‌رساناها و مواد کربنی اشاره

فعال حسگر (نظیر گروه‌های هیدروکسیل، آمین یا اکسیم) و عامل اعصاب متکی است. وقوع این واکنش، موجب ایجاد دگرگونی در سیستم الکترونی مولکول می‌شود که در نهایت به تغییر در ویژگی‌های نوری آن منجر می‌گردد. از جمله مزایای اصلی این دسته از حسگرها می‌توان به قابلیت طراحی دقیق برای دستیابی به حساسیت و گزینش‌پذیری بسیار بالا، سادگی سنتز و اصلاح شیمیایی و نیز امکان استفاده در هر دو فاز بخار و مایع اشاره کرد. با این حال، توسعه و استفاده از این حسگرها با چالش‌هایی نیز همراه است که از آن جمله می‌توان امکان تداخل عملکرد با سایر گونه‌های شیمیایی، محدودیت در حلالیت و پایداری تحت شرایط محیطی گوناگون و در برخی موارد، زمان پاسخ نسبتاً طولانی را برشمرد.

در گروه دوم، پلیمرها و نانوالیاف به دلیل ایجاد سطح تماس بالا و قابلیت ساخت فیلم‌ها و کاغذهای حسگر پایدار، برای کاربرد در فاز بخار ایده‌آل هستند. پلیمرهای هوشمند با گروه‌های عاملی واکنش‌پذیر در زنجیره جانبی، در تماس با بخار عامل اعصاب و تقویت سیگنال، تغییر رنگ مشخصی نشان می‌دهند (۱۴، ۱۵). در این نوع از حسگرها، واحدهای شناساگر بر روی زنجیره‌های پلیمری تثبیت می‌شوند. از مهم‌ترین ویژگی‌های این حسگرها می‌توان به امکان تقویت سیگنال به دلیل وجود چندین جایگاه فعال، قابلیت پرداخت به اشکال مختلف مانند فیلم نازک یا نانوالیاف، و همچنین پایداری مکانیکی و شیمیایی مناسب اشاره کرد. با این حال، این فناوری با محدودیت‌هایی از جمله پیچیدگی سنتز پلیمرهای با ساختار کنترل شده و امکان تأثیرپذیری از شرایط گازی مانند رطوبت همراه است.

زیر یک ضرورت انکارناپذیر است:

- ✓ طراحی اختصاصی برای تهدیدات شیمیایی بومی منطقه.
- ✓ ایجاد زنجیره تأمین کامل از تولید مواد اولیه تا ساخت حسگر.
- ✓ تدوین پروتکل‌های عملیاتی برای به کارگیری در یگان‌های مختلف.

این فناوری با ترکیب بی‌نظیر سرعت، دقت، سادگی و مقرون‌به‌صرفه بودن، در واقع تجسم عینی علم در خدمت امنیت ملی است و توسعه آن تضمین‌کننده ارتقای توان دفاعی و کاهش آسیب‌پذیری در برابر تهدیدات شیمیایی خواهد بود.



شکل-۳. چند نمونه دستگاه رنگ سنج.

چالش‌ها و فرصت‌ها

اگرچه حسگرهای رنگ‌سنجی امیدهای زیادی را برای تشخیص میدانی عوامل اعصاب ایجاد کرده‌اند، اما توسعه و استقرار گسترده آن‌ها با چالش‌های متعددی روبرو است. یکی از بزرگترین چالش‌ها، تمایز قائل شدن بین عامل اعصاب هدف و سایر گونه‌های شیمیایی موجود در محیط‌های پیچیده است. بسیاری از حلال‌ها، مواد شوینده و حتی آفت‌کش‌های رایج می‌توانند باعث ایجاد پاسخ مثبت کاذب (False Positive) شوند که می‌تواند به اتلاف منابع و ایجاد رخدادهای امنیتی غیرضروری منجر گردد. طراحی مولکول‌های شناساگر با حفره‌ها یا جایگاه‌های فعال کاملاً اختصاصی، یک چالش شیمیایی پیش‌رو است. اگرچه حد تشخیص (LOD) بسیاری از این حسگرها در شرایط آزمایشگاهی بسیار مطلوب گزارش شده است، اما عملکرد آن‌ها در محیط‌های واقعی با متغیرهایی مانند رطوبت بالا، دمای متغیر، وزش باد و وجود گرد و غبار می‌تواند به شدت تحت تأثیر قرار گیرد. رطوبت بالا، به ویژه، می‌تواند با رقابت در واکنش‌های هسته‌دوستی، باعث کاهش چشمگیر حساسیت شود. مواد شیمیایی مورد استفاده در این حسگرها، به ویژه مولکول‌های آلی و برخی نانومواد، ممکن است در برابر نور، اکسیژن و حرارت در بلندمدت ناپایدار باشند. اطمینان

کرد. مهم‌ترین برتری‌های این حسگرها عبارتند از: داشتن حساسیت باورنکردنی و بسیار بالا، داشتن سطح تماس و فعالیت فوق‌العاده گسترده، امکان اصلاح و تنظیم سطح آنها برای کاربردهای مختلف و پایداری فیزیکی و شیمیایی بسیار عالی. اما برای ساخت و استفاده از این حسگرها چالش‌هایی نیز وجود دارد: نیازمند روش‌های دقیق و کنترل‌شده برای تولید هستند و نگرانی‌هایی درباره سمیت و سازگاری آن‌ها با محیط زیست و بدن وجود دارد و نیز تولید انبوه این حسگرها به مقدار زیاد، خود یک چالش فنی است.

مکانیسم‌های تشخیص رنگ‌سنجی عوامل اعصاب

مکانیسم اصلی در بسیاری از حسگرهای رنگ‌سنجی برای عوامل اعصاب، یک واکنش هسته‌دوستی است. عامل اعصاب (مانند DCP به عنوان شبیه‌ساز سارین) به عنوان یک عامل فسفوریله‌کننده قوی، با گروه‌های عاملی هسته‌دوست در ساختار شناساگر (مانند گروه هیدروکسیل فنول، اکسیم یا آمین) واکنش داده و یک استر فسفات یا فسفونات ایجاد می‌کند (۱۸). این واکنش شیمیایی منجر به ایجاد تغییر در سیستم الکترونی مولکول شناساگر می‌شود که به نوبه خود باعث تغییر در طیف جذب مرئی و در نتیجه تغییر رنگ آشکار در محیط می‌گردد. از دیگر مکانیسم‌های رایج می‌توان به باز شدن ساختار حلقوی حسگر (مانند رودامین) و تغییر در اثر تجمع نانوذرات اشاره کرد (۲۱-۱۹).

قابلیت‌های کاربردی حسگرهای رنگ‌سنجی در صحنه عملیات

مهم‌ترین مزیت حسگرهای رنگ‌سنجی، قابلیت تبدیل به نوار کاغذی یا پچ‌های تشخیصی است. این نوارها به سادگی و بدون نیاز به آموزش پیچیده، توسط کارکنان نظامی در محیط‌های عملیاتی مورد استفاده قرار می‌گیرند. مشاهده تغییر رنگ در کمتر از یک ثانیه در مواجهه با بخار یا قطره حاوی عامل اعصاب، یک هشدار اولیه سریع و قابل اطمینان را فراهم می‌کند. این ویژگی، زمان حیاتی برای عکس‌العمل (شامل تزریق پادزهر، پناهگیری یا تخلیه منطقه) را در اختیار نیروها قرار می‌دهد (۲۲).

یکپارچه‌سازی این حسگرها در البسه رزمی یا ماسک‌های گاز برای پایش دائمی محیط، از دیگر قابلیت‌های در حال توسعه این فناوری است. همچنین، سادگی ساخت و نیاز نداشتن به مواد اولیه پیچیده، امکان تولید انبوه با هزینه پایین را فراهم می‌کند. یک سرباز در خط مقدم، یک امدادگر در منطقه بحران‌زده و حتی کارکنان غیرمتخصص می‌توانند با حداقل آموزش از این ابزار استفاده کنند (شکل ۳). این ویژگی برای کشوری مانند ایران که نیاز به تجهیز گسترده نیروهای مسلح دارد، یک مزیت استراتژیک محسوب می‌شود.

حسگرهای رنگ‌سنجی نه به عنوان یک ابزار تکمیلی، بلکه به عنوان سامانه‌ای استراتژیک در معماری دفاع شیمیایی باید در نظر گرفته شوند. توسعه و بومی‌سازی این فناوری با توجه به محورهای

مهندسان مواد، متخصصان علوم کامپیوتر و کارشناسان علوم دفاعی است. چنین همکاری‌هایی می‌تواند به خلق راهکارهای جامع و کاربردی بیانجامد.

نتیجه‌گیری

با بررسی پیشرفت‌های اخیر در حوزه حسگرهای رنگ‌سنجی برای تشخیص عوامل اعصاب، می‌توان به وضوح دریافت که این فناوری به عنوان یک راهکار استراتژیک و تحول‌آفرین در عرصه پدافند شیمیایی و امنیت ملی مطرح است. این حسگرها با بهره‌گیری از مکانیسم‌های شیمیایی هوشمندانه‌ای همچون واکنش‌های هسته‌دوستی و تغییرات الکترونی، توانایی تشخیص سریع و قابل اطمینان عوامل اعصاب را در کمترین زمان ممکن (حتی در حد ثانیه) فراهم می‌کنند. مزیت‌های برجسته این فناوری شامل سادگی استفاده، قابلیت حمل بالا، عدم نیاز به تجهیزات پیچیده و هزینه تولید مقرون به صرفه است که آن را برای به‌کارگیری در صحنه‌های عملیات رزمی، حوادث غیرمترقبه و پایش محیطی ایده‌آل می‌سازد. توسعه این حسگرها در قالب نوارهای کاغذی، پیچ‌های تشخیصی و سیستم‌های یکپارچه در البسه رزمی، امکان هشدار اولیه به موقع را برای نیروهای نظامی و امدادی فراهم می‌کند. اگرچه چالش‌هایی همچون پایداری در شرایط محیطی پیچیده، گزینش‌پذیری بالا و تولید انبوه هنوز نیازمند پژوهش‌های بیشتر است، اما فرصت‌های بی‌نظیری در زمینه بهره‌گیری از نانومواد پیشرفته، هوش مصنوعی و آرایه‌های چندحسگری برای غلبه بر این چالش‌ها وجود دارد. در پایان، می‌توان اذعان داشت که توسعه و بومی‌سازی این فناوری با تمرکز بر طراحی اختصاصی برای تهدیدات شیمیایی منطقه‌ای، ایجاد زنجیره تأمین کامل و تدوین پروتکل‌های عملیاتی استاندارد، نه تنها ضریب ایمنی نیروهای مسلح را به طور چشمگیری افزایش می‌دهد، بلکه گامی اساسی در راستای تحقق خودکفایی دفاعی و ارتقای توان بازدارندگی ملی محسوب می‌شود. تداوم سرمایه‌گذاری و پژوهش در این عرصه، آینده‌ای امن‌تر را در برابر تهدیدات شیمیایی برای کشور به ارمغان خواهد آورد.

تضاد منافع: بدین وسیله نویسنده تصریح می‌نماید که هیچ‌گونه تضاد منافی در مطالعه حاضر وجود ندارد.

منابع

1. Costanzi S, Machado JH, Mitchell M. Nerve agents: what they are, how they work, how to counter them. *ACS Chemical Neuroscience*. 2018;9(5):873-85. doi:10.1021/acchemneuro.8b00148
2. Kim K, Tsay OG, Atwood DA, Churchill DG. Destruction and detection of chemical warfare agents. *Chemical Reviews*. 2011;111(9):5345-403. doi:10.1021/cr100193y
3. Fan S, Zhang G, Dennison GH, FitzGerald N, Burn PL, Gentle IR, et al. Challenges in fluorescence detection of chemical warfare agent vapors using solid-state films. *Advanced Materials*. 2020;32(18):1905785. doi:10.1002/adma.201905785
4. Foong SY, Ma NL, Lam SS, Peng W, Low F, Lee BH, et al. A recent global review of hazardous chlorpyrifos pesticide in fruit and vegetables:

از عملکرد قابل اعتماد حسگر پس از ماه‌ها انبارداری در پست‌های مرزی یا تجهیزات شخصی سربازان، یک نیاز حیاتی و در عین حال چالش‌برانگیز است. برخی از مواد مورد استفاده در ساخت این حسگرها، مانند برخی کمپلکس‌های فلزات سنگین یا نانومواد خاص، ممکن است سمیت ذاتی داشته باشند. مدیریت پایان عمر این حسگرها و اطمینان از بی‌خطر بودن دفع آن‌ها، به ویژه در صورت استفاده گسترده، نیازمند توجه جدی است. انتقال یک حسگر از مقیاس آزمایشگاهی به تولید انبوه با چالش‌های فنی زیادی همراه است. حفظ یکنواختی در حساسیت، گزینش‌پذیری و زمان پاسخ در بین میلیون‌ها دستگاه تولیدی، نیازمند فرآیندهای ساخت بسیار دقیق و پروتکل‌های کنترل کیفیت سخت‌گیرانه است و در نهایت فقدان پروتکل‌های استاندارد جهانی برای آزمون و اعتبارسنجی عملکرد این حسگرها در مقابل تهدیدات واقعی، مقایسه فناوری‌های مختلف و اطمینان از قابلیت اطمینان آن‌ها را دشوار می‌سازد.

با وجود چالش‌ها، حوزه تشخیص رنگ‌سنجی عوامل اعصاب، سرشار از فرصت‌های پژوهشی و توسعه‌ای است: نانومواد با خواص نوری منحصر به فرد (مانند نقاط کوانتومی، نانومیله‌های طلا، گرافن) پتانسیل فوق‌العاده‌ای برای ایجاد حسگرهای نسل آینده با حساسیت و پایداری بسیار بالاتر دارند. استفاده از چارچوب‌های فلزی-آلی (MOFs) یا پلیمرهای قالب مولکولی (MIPs) می‌تواند گزینش‌پذیری را به سطح بی‌سابقه‌ای برساند. توسعه حسگرهای مجهز به دوربین موبایل و اپلیکیشن‌های تحلیل تصویر، می‌تواند تشخیص نیمه‌کمی و عینی‌تری ارائه دهد و از خطای دید انسانی بکاهد. هوش مصنوعی می‌تواند با تحلیل الگوهای پاسخ چندحسگری، دقت تشخیص و توانایی تفکیک بین عوامل مختلف را به طور چشمگیری افزایش دهد. به جای تکیه بر یک حسگر واحد، استفاده از آرایه‌ای از حسگرها با مکانیسم‌های تشخیصی مکمل می‌تواند یک اثر انگشت رنگ‌سنجی برای هر عامل اعصاب ایجاد کند. این رویکرد، توانایی مقابله با چالش گزینش‌پذیری را به طور بنیادی افزایش می‌دهد. بسیاری از این حسگرها را می‌توان برای پایش آلودگی آب و خاک به آفت‌کش‌های ارگانوفسفره، کنترل کیفیت مواد غذایی یا نظارت بر ایمنی محیط‌های صنعتی تطبیق داد. این امر می‌تواند باعث افزایش مقیاس تولید، کاهش هزینه و در دسترس قرار گرفتن فناوری برای اهداف صلح‌آمیز شود. پیشرفت در این حوزه مستلزم همکاری عمیق بین شیمی‌دانان،

- Prevalence, remediation and actions needed. *Journal of Hazardous Materials*. 2020;400:123006. doi:10.1016/j.jhazmat.2020.123006
5. Yan X, Li H, Su X. Review of optical sensors for pesticides. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*. 2018;103:1-20. doi:10.1016/j.trac.2018.03.004
 6. Kumar P, Kim KH, Deep A. Recent advancements in sensing techniques based on functional materials for organophosphate pesticides. *Biosensors and Bioelectronics*. 2015;70:469-81. doi:10.1016/j.bios.2015.03.066
 7. Bui MP, Abbas A. Simple and rapid colorimetric detection of p-nitrophenyl substituted organophosphorus nerve agents. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2015;207:370-4. doi:10.1016/j.snb.2014.10.010
 8. Chen L, Wu D, Yoon J. Recent advances in the development of chromophore-based chemosensors for nerve agents and phosgene. *ACS Sensors*. 2018;3(1):27-43. doi:10.1021/acssensors.7b00816
 9. Sun J, Guo L, Bao Y, Xie J. A simple, label-free AuNPs-based colorimetric ultrasensitive detection of nerve agents and highly toxic organophosphate pesticide. *Biosensors and Bioelectronics*. 2011;28(1):152-7. doi:10.1016/j.bios.2011.07.012
 10. Dou X, Chu X, Kong W, Luo J, Yang M. A gold-based nanobeacon probe for fluorescence sensing of organophosphorus pesticides. *Analytica Chimica Acta*. 2015;891:291-7. doi:10.1016/j.aca.2015.08.012
 11. Aich K, Das S, Gharami S, Patra L, Mondal TK. Triphenylamine-benzimidazole based switch offers reliable detection of organophosphorus nerve agent (DCP) both in solution and gaseous state. *New Journal of Chemistry*. 2017;41(21):12562-8. doi:10.1039/C7NJ02543B
 12. Heo G, Manivannan R, Kim H, Son YA. Liquid and gaseous state visual detection of chemical warfare agent mimic DCP by optical sensor. *Dyes and Pigments*. 2019;171:107712. doi:10.1016/j.dyepig.2019.107712
 13. Cai YC, Li C, Song QH. Selective and visual detection of a nerve agent mimic by phosphorylation and protonation of quinolin oximes. *Journal of Materials Chemistry C*. 2017;5(29):7337-43. doi:10.1039/C7TC02617J
 14. Jin R, Kong D, Yan X, Zhao X, Li H, Liu F, et al. Integrating target-responsive hydrogels with smartphone for on-site ppb-level quantitation of organophosphate pesticides. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2019;11(31):27605-14. doi:10.1021/acsami.9b09849
 15. Gupta M, Lee HI. A pyrene derived CO₂-responsive polymeric probe for the turn-on fluorescent detection of nerve agent mimics with tunable sensitivity. *Macromolecules*. 2017;50(17):6888-95. doi:10.1021/acs.macromol.7b01200
 16. Gupta K, Patra AK. Luminescent europium (III) "Turn-On" sensor for G-series chemical warfare simulants: A mechanistic investigation. *ACS Sensors*. 2020;5(5):1268-72. doi:10.1021/acssensors.9b02552
 17. Takahashi F, Kazui Y, Miyaguchi H, Ohmori T, Tanaka R, Jin J. Simple colorimetric screening of the nerve agent VX using gold nanoparticles and a hand-powered extraction device. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2021;327:128902. doi:10.1016/j.snb.2020.128902
 18. Aroniadou-Anderjaska V, Apland JP, Figueiredo TH, Furtado MD, Braga MF. Acetylcholinesterase inhibitors (nerve agents) as weapons of mass destruction: History, mechanisms of action, and medical countermeasures. *Neuropharmacology*. 2020;181:108298. doi:10.1016/j.neuropharm.2020.108298
 19. Huo B, Du M, Shen A, Li M, Lai Y, Bai X, et al. "Covalent-assembly"-based fluorescent probe for detection of a nerve-agent mimic (DCP) via Lossen rearrangement. *Analytical Chemistry*. 2019;91(17):10979-83. doi:10.1021/acs.analchem.9b01006
 20. Gharami S, Aich K, Das S, Patra L, Mondal TK. Facile detection of organophosphorus nerve agent mimic (DCP) through a new quinoline-based ratiometric switch. *New Journal of Chemistry*. 2019;43(22):8627-33. doi:10.1039/C9NJ02218J
 21. Ali SS, Gangopadhyay A, Pramanik AK, Guria UN, Samanta SK, Mahapatra AK. Ratiometric sensing of nerve agent mimic DCP through in situ benzisoxazole formation. *Dyes and Pigments*. 2019;170:107585. doi:10.1016/j.dyepig.2019.107585
 22. Weihui W, Shaohui S, Jian L, Liang Z, Dan L, Yanhua X, et al. A fluorescent probe bearing two reactive groups discriminates between fluoride-containing G series and sulfur-containing V series nerve agents. *Analyst*. 2020;145(16):5425-9. doi:10.1039/D0AN00878H