مجله ایمنی زیستی

دوره ۱۱، شماره ۳، پائیز ۱۳۹۷

بررسی و پیشرفت فناوری‌های آلودگی‌زدایی تجهیزات و افراد

علی روستایی[۱*]، حمید عابدی[۱] و شکوه احتشامی[۲]

۱- دکتری تخصصی شیمی تجزیه، عضوء هیات علمی پژوهشکده تجهیزات و فناوری‌های انتظامی، پژوهشگاه علوم انتظامی و مطالعات اجتماعی، تهران، ایران

۲- دانشجوی دکتری تخصصی شیمی تجزیه، دانشگاه آزاد تهران مرکز، ایران

ali.roostaie1@gmail.com

چکیده

محافظت انفرادی نظامیان، یاری‌دهندگان اولیه و غیرنظامیان در برابر تهدیدات جاری ناشی از مواد سمی و عوامل شیمیایی مهم و ضروری است. در حوزه محافظت شخصی، پاکسازی عوامل شیمیایی نه تنها در میدان نبرد بلکه در آزمایشگاه، سایت‌های تولید پایلوت و تخریب عوامل نیز ضروری است. ارزیابی روش‌های پاکسازی و آلودگی‌زدایی برای اجرای بهترین عملکرد در سناریوهای مختلف از قبیل ضدعفونی اشخاص، مکان‌ها و تجهیزات حساس بسیار مهم است. در این مقاله فناوری‌های آلودگی‌زدایی از قبیل جاذب کربن و آنزیم‌ها، پیشرفت‌های برتر اخیر مانند محلول شویش آلودگی‌زدای فعال پوستی و سیستم آلودگی‌زدای شخصی کم‌هزینه مورد بررسی و ارزیابی قرار می‌گیرند. آلودگی‌زدایی با استفاده از سیستم‌های بر پایه حلال و غیرحلال می‌تواند راهبرد اقدامات متقابل تصویب‌شده به‌وسیله نظامیان، یاری‌دهندگان اولیه و افراد اورژانس باشد تا توانایی عملیاتی آنها حفظ و از آلودگی بیشتر جلوگیری شود.

واژه‌های کلیدی: آلودگی‌زدایی، ضدعفونی، محلول‌های شستشو، مواد سمی و عوامل شیمیایی، نانوذرات.

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1397.11.3.5.5]

مقدمه

برنامه دفاعی زیستی و شیمیایی برخی از ملت‌ها با استفاده از چهار عملیات کلیدی از قبیل احساسی، محافظتی، نگهداری و شکل‌دهی در درون توانایی‌های اقدامات متقابل شیمیایی، زیستی، رادیولوژی و هسته‌ای (chemical, biological, radiological and nuclear) (CBRN) تعریف می‌شود. آلودگی‌زدایی سربازها و تجهیزات برای کاهش سانحه، حفظ جان و ذخیره ظرفیت نیرو، از اولویت‌های اصلی نیروهای نظامی محسوب می‌شود. آلودگی‌زدایی عوامل شیمیایی و زیستی برای حفظ توانایی عملیات نیروی نظامی مهم و ضروری است. این موضوع در تمامی مناطق از قبیل میدان جنگ، آزمایشگاه، فرودگاه و اماکن تخریب عوامل نیاز مهمی به حساب می‌آید (۱).

فناوری حفاظتی در برابر عوامل شیمیایی و زیستی یا فناوری کاهش خطر برای خنثی‌کردن تهدید یا نتایج حاصله از حمله شیمیایی و زیستی انجام شده، باید توسط نظامیان اعمال شود تا به بالاترین میزان بقاء، مهارت و عملکرد با کم‌ترین خطر دست یابند. سیستم حفاظتی بر پایه منسوجات پیشرفته مانند سایر تکنیک‌ها و تاکتیک‌های ضروری نظامی، یکی از مهم‌ترین فناوری‌های به دست آمده است که می‌تواند عاقبت یک عملیات نظامی یا مأموریت نجات را تعیین کند. فناوری بر پایه منسوجات به‌عنوان یک هدف مهم برای استتار، ضد بالستیک، پایداری در برابر شعله و محافظت جمعی/ انفرادی در برابر عوامل هسته‌ای، رادیولوژی، زیستی و شیمیایی شناخته می‌شود. بر خلاف بسترهای منسوجات با پوشش کربنی که کربن‌های فعال در سطح قرار گرفته‌اند و کامپوزیت سنگین تولید می‌شود، بسترهای پارچه‌ای پیشرفته بر پایه الیاف کربنی سبک و انعطاف‌پذیر هستند و بازده بالایی در جذب مواد شیمیایی مایع و بخار دارند. افزودنی‌هایی از قبیل آمین، مس و نمک‌های کروم در الیاف کربن می‌تواند فعالیت‌های کاتالیستی و واکنشی در برابر عوامل سمی از قبیل هیدروژن سیانید، فسژن (phosgene) و سینوژن کلرید (cyanogen chlorides) ایجاد کند (۲). امروزه تمایل زیادی وجود دارد که تحقیق

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1397.11.3.5.5]

و توسعه در خصوص فناوری‌های پیشرفته از قبیل نانوفناوری، فناوری غشایی، فناوری جاذب‌های ضدعفونی و فعال، فناوری ضدبالستیک و سیستم‌های منسوجات هوشمند متمرکز شود. به‌طوری که بازده و امید به زندگی سربازها را افزایش دهد و به‌این‌ترتیب حفاظت عالی در برابر عوامل CBRN امکان‌پذیر شود. سیستم‌های حفاظتی انفرادی از قبیل ژاکت‌های ضدبالستیک، زره حفاظتی در برابر عوامل شیمیایی و زیستی، تجهیزات حفاظتی شخصی، کیت‌های ضدعفونی (آلودگی‌زدا یا پاکساز) عوامل شیمیایی، کیت‌های ضدعفونی زیستی به همراه سیستم‌های حفاظتی جمعی از قبیل چادر، واحدهای فیلتراسیون هوای بسته و خطوط پلیمری پوشش‌داده‌شده به‌عنوان وسایل بسیار مهمی برای تجهیزات نظامی در جلوگیری و کاهش تهدید عوامل CBRN هستند. در این مقاله فناوری‌های محافظت فردی موجود یا جدید مورد بررسی قرار می‌گیرند. برای خنثی‌کردن تهدید و اثرهای مضر عوامل شیمیایی و زیستی، استفاده از راهبردهای بازدارنده و روش‌های بعد از معرض، مورد نیاز است. راهبرد بازدارنده برای پرهیز از هر تماس با عوامل شیمیایی-زیستی به‌طور کامل از راهبردهای درمان و بعد از معرض متفاوت است. راهبرد برای آلودگی‌زدایی پس از معرض با حذف عوامل شیمیایی و زیستی از سطوح آلوده شده، جلوگیری از نشت و خروج مواد شیمیایی سمی، تخریب و تفکیک عوامل سمی به ترکیبات غیرسمی و تشخیص سریع درگیر است. توسعه سیستم آلودگی‌زدای پیشرفته و کارآمد که بتواند مانع از اثرهای عوامل شیمیایی و زیستی سمی در طول عملیات و پس از معرض شود، ضروری است. همچنین تسهیل راهبرد کاری برای ذخیره توانایی مبارزه و کاهش بار لجستیک برای اشخاص نظامی نیاز است (۳-۸).

عوامل شیمیایی می‌توانند با حمله به بدن انسان باعث تغییر تابع فیزیولوژیکی نرمال شوند و در نتیجه اثرهای استرس، تروما، سمیت و کشندگی نمایان می شوند. کلاس‌های مختلف عوامل شیمیایی، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی گسترده‌ای دارند که در جذب آنها از طریق پوست،

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1397.11.3.5.5]

رسوب بر روی سطوح و برهمکنش با ترکیبات آلی و معدنی اثرگذار هستند. بنابراین ایده توسعه راهبرد آلودگی‌زدای عمومی که بتواند با بخش عمده‌ای از عوامل شیمیایی مواجه شود، بسیار سخت است. در ادامه، راهبرد بعد از معرض و ویژگی های سیستم‌های آلودگی‌زدای متفاوت برای پاکسازی بدن انسان و تجهیزات مربوطه مورد بحث قرار می‌گیرد (۹).

۱- اهمیت و ضرورت آلودگی‌زدایی

انتقال عوامل شیمیایی می‌توانند به‌صورت آئروسل خالص یا ترکیب (به‌وسیله افزودنی‌هایی که عوامل سمی آنها را تسهیل می‌کند تا به‌طور مداوم بر روی تعدادی از سطوح مختلف بچسبند) انجام شود. سطوح مستعد برای چنین معرضی در مناطق نظامی می‌تواند سطح اسلحه، تجهیزات، وسایل، سایبان‌ها، پوشش‌ها و از همه مهم‌تر، پوست انسان باشد. عوامل شیمیایی که دارای عوامل ضخیم پلیمری هستند، به‌طور واقعی به همه سطوح می‌چسبند. حذف آنها با حلال‌های آلودگی‌زدا بر پایه آب به سختی انجام می‌شود، زیرا خاصیت انحلال‌پذیری تعداد زیادی از عوامل شیمیایی در حلال‌های در دسترس و متداول (آب و محلول صابون) با ضخامت عوامل، رابطه عکس دارند. عوامل شیمیایی در شکل‌های بخار یا آئروسل می‌توانند به سطوح مخصوصی بچسبند و بر روی سطوح یا شکاف تجهیزات نظامی، وسایل حساس و بدن انسان رسوب کنند. به‌علاوه، حذف ذرات گرد و غبار آلوده‌شده با عوامل شیمیایی از کنج‌ها و سطوح غیرقابل‌دسترس توسط دستگاه‌های حساس که به‌طور مکرر در مناطق نظامی استفاده می‌شوند، بسیار مشکل است (۹). در میان آرایه‌ای از وظایف پر استرس پزشکان و اشخاص نظامی در میدان نبرد، تشخیص در معرض یا مواجه بودن با عوامل شیمیایی می‌تواند واقعا سخت باشد. به‌طوری‌که در محیط های نامطلوب حضور قطره‌های مایع خارجی بر روی پوست آنها اشتباهاً می‌تواند به‌عنوان عرق خودشان در نظر گرفته شود. با قرار گرفتن افراد نظامی در معرض عوامل شیمیایی، امکان رخ دادن نتایج ویرانگر در کمتر از چند دقیقه وجود

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1397.11.3.5.5]

دارد. مدیریت سریع پروتکل‌های تشخیصی، درمانی و پیگیری‌کننده متناسب در کاهش چنین خطری بسیار مهم است. تشخیص درجای عوامل شیمیایی و گرفتن تصمیمات تاکتیکی درمانی برای کاهش سانحه و خطر هم بسیار مهم است. متأسفانه سیستم‌های تشخیص عوامل متداول برای تأیید حضور عوامل شیمیایی در میدان نبرد، به چندین دقیقه زمان نیاز دارند. در بیشتر اوقات، امکان دسترسی به چنین سیستم‌های شناسایی در طول زمان ضروری وجود ندارد. بنابراین اشخاص نظامی، سربازان و یاری‌دهندگان اولیه مجبورند روش‌های پیشگیرانه، واکسن و تجهیزات حفاظت شخصی (personal protective equipment; PPE) را برای پرهیز از اثرات آلودگی استفاده کنند. به‌علاوه، نیروی نظامی باید بر روی بینش و طرز درمان هر ماده خارجی مانند عوامل شیمیایی به همراه آلودگی‌زدایی فوری در راستای کاهش تهدید اقدام کند.

۲- ضدعفونی فردی (انفرادی)

در معرض قرار گرفتن چشمی، تنفسی یا پوستی با عوامل شیمیایی می‌تواند اثرهای پوستی شدیدی بر روی سلامت قربانی داشته باشد. ماسک‌های گازی نظامی می‌توانند محافظت مناسبی در برابر در معرض قرار گرفتن چشمی و تنفسی فراهم کنند. با وجود این، پوست بدن انسان با مساحت تقریبی m^2 ۲-۱/۸ به شدت به مایع و بخار (از طریق در معرض قرار گرفتن پوستی) حساس است. حفاظت شخصی می‌تواند در دو حالت اصلی طبقه‌بندی شود. ۱) پرهیز از آلودگی با استفاده از پیشگیری، واکسن‌ها، لباس محافظ، پیش درمان و PPE که حاوی عوامل شیمیایی خنثی و غیرسمی است. ۲) راهبرد درمانی و تشخیص بعد از معرض (تماس) که شامل آلودگی‌زدایی پوست و تجهیزات با استفاده از فناوری‌های پیشرفته بوده و حاوی مواد غیرسمی است و می‌تواند عوامل شیمیایی و زیستی سمی را در ساختار خود جذب، نگهداری و خنثی کند (۱۰-۱۹).

در حوادثی که حمله با عوامل شیمیایی ناگهانی باشد، قربانی به‌طور شگفت‌انگیزی غافل‌گیر می‌شود و تنها کمتر از چند دقیقه برای کاهش تهدید

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1397.11.3.5.5]

زمان دارد. سمومی از قبیل عوامل VX و سومان (GD) می‌توانند از طریق پوست جذب شوند و بدون هیچ‌گونه نشانه‌ای، باعث مرگ عصبی قربانی گردند. بنابراین آلودگی‌زدایی درجا، فاکتور کلیدی برای کاهش اثرهای سمی است و می‌تواند برای خنثی‌کردن عوامل شیمیایی در تماس با پوست استفاده شود (۲۰).

بخشی از پوست انسان از لیپیدهای درون سلولی تشکیل شده است و بنابراین به‌طور طبیعی آب‌گریز است. ترکیبات چربی دوست نسبت به ترکیبات آب‌دوست، نفوذ بهتری به درون پوست دارند. هرگاه مسیر تماسی، غشاهای مخاطی از قبیل چشم و دهان باشد، جذب از طریق پوست بسیار سریع‌تر انجام می‌شود. اثرهای سمی ایجادشده به‌وسیله عوامل شیمیایی بر روی پوست به مدت زمان تماس وابسته است؛ هر چه زمان طولانی‌تر شود، جذب آنها به درون بدن بیشتر می‌شود (۲۱). بنابراین شاخص بسیار مهم سیستم‌های آلودگی‌زدایی، توانایی سریع و مؤثر آنها در حذف عوامل سمی از پوست است. به کارگیری روش‌های ضدعفونی سریع و ساده، از نیازهای اولیه جنگاور برای قرار گرفتن در معرض عوامل سمی است (۲۲،۱۰).

حذف عوامل شیمیایی از پوست باید مرحله‌ای بسیار سریع در طول فرآیند ضدعفونی باشد. آموزش فرآیند آلودگی‌زدایی باید ساده و ابتدایی باشد. در مواجهه با عوامل سمی، شخص باید توانایی انجام روش آلودگی‌زدایی مرتبط را داشته باشد. عمده‌ترین روش بر پایه آلودگی‌زدایی بعد از تماس، استفاده فوری از آب صابون است (۲۲).

با وجود این، جایگاه آب برای ضدعفونی سریع در مناطق نبرد اغلب در دسترس نیست. بنابراین به سیستم ضدعفونی دیگری با حداقل تجهیزات لجستیک که بتواند توسط شخص نظامی بدون سنگینی بار حمل شود، نیاز هست (۲۳، ۱۸).

سم‌زدایی بعد از تماس می‌تواند از طریق کاربرد سریع ضدعفونی مناسب پوست در جهت حذف سریع عوامل شیمیایی و مخلوط آنها از پوست انجام شود. در مورد سیستم‌های ضدعفونی پیشرفته غیرقابل‌دسترس، هر راهبرد کمک‌کننده در

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1397.11.3.5.5]

حذف عوامل از پوست ممکن است انجام شود (از قبیل جذب، حذف و شستشو با آب، محلول صابون و مایعات غیرسمی) (۲۴). سیستم ضدعفونی ایده‌آل باید در حذف عوامل شیمیایی از پوست سریع و آسان عمل کند. به‌علاوه زمان نگهداری و جذب عوامل شیمیایی باید در درون ساختار آلودگی‌زدای امکان‌پذیر باشد (۱۳).

وسیله آلودگی‌زدایی نباید باعث تخلیه بخار عوامل شیمیایی یا سمی در طول و بعد از فرآیند ضدعفونی شود (۱۰،۱۱). برای پرهیز از مشکلات ثانویه، سیستم آلودگی‌زدای پیشرفته باید قادر باشد به‌طور قوی عوامل شیمیایی، مخلوط ترکیبات غیرسمی فعال، متابولیسم عوامل شیمیایی، ترکیبات سمی دیگر و گازهای سمی را در ساختار خود نگه دارد. همچنین سیستم آلودگی‌زدای ایده‌آل باید سبک و قابل حمل بوده و به آسانی قابل استفاده باشد و نه تنها توانایی نگهداری عوامل شیمیایی را داشته باشد، بلکه عوامل شیمیایی با سمیت کمتر و خنثی تولید کند (۲۳). به‌علاوه، سیستم آلودگی‌زدا باید برای بدن غیرسمی باشد و نباید با چشم، پوست و زخم‌های باز واکنش دهد (۱۰،۱۷). موادی که در سیستم‌های آلودگی‌زدا استفاده می‌شوند، نباید خورنده یا کاهش‌دهنده حساسیت تجهیزات، مهمات و وسایل استفاده‌شده توسط رزمنده در میدان نبرد باشند. همچنین نباید هیچ‌گونه بوی دفع‌کننده‌ای داشته باشد. مواد ضدعفونی‌کننده باید با امنیت محیطی و دارویی سازگار باشند. بنابراین، سیستم‌های آلودگی‌زدای پیشرفته غیرسمی با کارآیی مؤثر باید نه تنها توانایی حذف سریع ترکیبات شیمیایی را از پوست یا سطح تجهیزات داشته باشند، بلکه این عوامل سمی و شیمیایی را در خود نگه دارند و به ترکیبات خنثی تبدیل کنند. سیستم‌های آلودگی‌زدای عوامل شیمیایی جدید برای محافظت انفرادی، نه تنها باید بازده ضدعفونی عالی داشته باشند، بلکه باید دوست‌دار پوست، غیر خورنده، قابل اطمینان و شایسته باشند. به‌علاوه باید در همه جنبه‌های تولید، کاربرد و خنثی‌ساز با محیط زیست سازگار باشند (۱۰، ۱۴-۱۷).

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1397.11.3.5.5]

برخی از عوامل شیمیایی در تماس با ترکیبات آلی فرار سمی و ترکیبات شیمیایی سمی می‌توانند برای سلامتی انسان زیان‌آور باشند (۷،۲۷). سیستم آلودگی‌زدای جدید باید حاوی ویژگی‌هایی از قبیل توانایی سریع و مؤثر در جهت حذف ترکیبات شیمیایی سمی بی‌شمار، بازده ضدعفونی سریع و بالا، طبیعت غیرسمی، دوست‌دار محیط زیست، کم‌هزینه و قابلیت استفاده آسان باشد (۱۰).

۳- ضدعفونی کردن تجهیزات

کایسر و هارلدسن برای آلودگی‌زدایی تجهیزات نظامی، روش دوست‌دار محیط زیست با حلال آلی را پیشنهاد داده‌اند. این روش، یک مرحله مهم برای بهبود فناوری آلودگی‌زدایی سطح از طریق استفاده از محلول‌های ضدعفونی آلی دوست‌دار محیط زیست است. فناوری‌های درگیر با بمباران‌های ذره‌ای بر روی سطح آلوده، عوامل شیمیایی را از کنج‌های پوشیده و غیرقابل‌دسترس به‌طور مؤثری حذف نمی‌کند. از اینرو، فناوری درگیر با حلال می‌تواند برای ضدعفونی تجهیزات که توسط گرد و خاک در مناطق نبرد پوشیده شده‌اند، استفاده شود (۲۸).

آنها مشاهدات خود را از حذف عوامل شیمیایی از تجهیزات غرق‌شده در حمام التراسونیک حاوی حلال‌های ضدعفونی آلی مانند هیدروفلوئورواتر (Hydrofluoroethers (HFEs)) گزارش کردند. آنها متوجه شدند که عوامل شیمیایی غیرقطبی از قبیل GD، سومان (GB)، HD و VX در حلال هیدروفلوئورو اتر حل می‌شوند. زیرا جزء حلال‌های غیرآبی است (۲۸،۲۹). به‌علاوه، حلال HFE سازگار با محیط زیست و تجهیزات حساس نظامی از قبیل وسایل الکترونیک است. حلال HFE کشش سطحی کم دارد و بنابراین می‌تواند عوامل شیمیایی را از تجهیزات حذف کند. با وجود این، برای حذف کامل عوامل ضخیم و مواد آلوده‌شده ویژه، به همزن اولتراسونیک با سرعت بالا نیاز است. استفاده از شناساگرهای ساده برای تشخیص حذف کامل ترکیبات شیمیایی یا ذرات آلوده‌شده به آنها از سطح تجهیزات ضروری است. تکنیک دقیقی که توانایی

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1397.11.3.5.5]

شناسایی مقادیر کم ترکیبات آلاینده خارجی را دارد، روش تابش فرابنفش است.

لامپ UV می‌تواند برای تأیید ظاهری حذف کامل باقیمانده عوامل شیمیایی، ترکیبات سمی و مواد آلوده به عوامل شیمیایی از روی سطح تجهیزات ضدعفونی‌شده، استفاده شود. یک فاکتور مهم برای ارزیابی سیستم‌های ضدعفونی بر پایه حلال، بررسی بازیابی حلال آلوده شده است.

حذف جزئی عوامل شیمیایی سمی از حلال می‌تواند خطر آلودگی دوباره تجهیزات را کاهش دهد. همچنین بازیابی حلال به‌طور معمول بر روی هزینه اثرگذار است. کایسر و هارالدین گزارش کردند که حذف عوامل شیمیایی از حلال HFE آلوده‌شده از طریق عبور آنها از بستر کربن فعال قابل دستیابی است. جذب عوامل شیمیایی سمی در کارتریج قابل تعویض کربن فعال جامد می‌تواند خطرات اپراتوری را کاهش دهد و حلال ضدعفونی مناسبی برای استفاده دوباره تحویل دهد (۲۸).

۴- انواع سیستم‌های آلودگی‌زدای جدید

همه سیستم‌های ضدعفونی باید اشخاص نظامی را از نتایج سمی عوامل شیمیایی و زیستی حفظ کنند. به‌تازگی فناوری‌های ضدعفونی جدید از قبیل سیستم آلودگی‌زا قابل انتقال جوینت در مقیاس کوچک (JSTDS-SS) که از مایعات با فشار بالا برای ضدعفونی تجهیزات و تأسیسات، فناوری دی‌اکسید کربن فعال شده الکتروشیمیایی برای ضدعفونی CB و پلیمرهای الکترولیت ضدمیکروبی برای خنثی‌سازی عوامل زیستی توسط نظامیان US اثبات و ارزشیابی شده است. در آینده، تلاش‌های پرشتابی به سمت توسعه و ارزیابی سیستم‌های آلودگی‌زدایی هوشمند انجام می‌شود که قادرند بعد از شناسایی عوامل، مواد ضدعفونی ویژه را آزاد کنند تا فرآیند خنثی‌سازی عوامل شیمیایی انجام پذیرد. لوکی و همکارانش خلاصه‌ای از مزیت‌ها و محدودیت‌های شش ماده آلودگی‌زدا از قبیل ۱) لوسیون ضدعفونی فعال پوستی، ۲) کیت ضدعفونی M291، ۳) سفیدکننده هیپوکلریت، ۴) دیفوترین، ۵) فوم ساندیا

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1397.11.3.5.5]

و ۶) اسفنج فعال را گزارش کرده‌اند (۲۲).

۴-۱ لوسیون ضدعفونی فعال پوستی

به‌طور کلی محلول سفیدکننده از ۰/۵ درصد محلول سدیم یا کلسیم هیپوکلریت در آب ساخته می شود. محلول سفیدکننده غلیظ اثر ضدعفونی‌کننده بسیار سریعی دارد. با وجود این، محدودیت عمده آن، استفاده از محلول سفیدکننده برای صورت است که دارای سمیت پوستی در غلظت تغلیظ‌شده (۵ درصد) است. از طرف دیگر، غلظت‌های رقیق‌شده آن، که به‌طور معمول سمیت کمتری برای پوست و چشم دارند، بازده خنثی‌کنندگی عوامل شیمیایی مؤثری ندارند (۲۲، ۱۲). کلر به‌طور ذاتی خورنده است و محصولات ضدعفونی بر پایه کلر از قبیل سفیدکننده می‌توانند باعث خورندگی تجهیزات استفاده شده در مناطق نبرد شوند (۱۰،۱۷).

دو فوم ضدعفونی ۱) MDF-100 و ۲) DF-200 توسط آزمایشگاه بین‌المللی ساندیو توسعه داده شد (۱۳). محصول MDF-100 دو جزء آلودگی‌زدایی دارد و از دو ماده تشکیل شده است که در اثر ترکیب آنها فومی برای ضدعفونی تولید می‌شود. خنثی‌سازی هاگ‌های سیاه‌زخم با استفاده از MDF-100 گزارش شده است. به‌علاوه، عملیات خنثی‌سازی عوامل شیمیایی توسط فرمولاسیون DF-200 نسبت به MDF-100 سریع‌تر انجام می‌شود، زیرا حاوی ترکیبات شیمیایی است که نقش مهمی در افزایش سرعت تخریب عوامل شیمیایی دارند. ورمسر، اثرهای سمی HD رقیق‌نشده بر روی پوست خوک گینه (Guinea pig) را گزارش کرد. بعد از گذشت چند ساعت تماس (در معرض بودن)، تنها ۰/۶-۰/۳ درصد از مقدار اولیه HD بر روی پوست حیوان اندازه‌گیری شد. در نتیجه بیشتر عامل به پوست نفوذ کرده بود. جذب عوامل شیمیایی از طریق پوست به چربی دوستی (یا آب‌گریزی)، فراریت و اندازه مولکول عامل وابسته است. با وجود این، مکانیسم دقیق از جذب HD از طریق پوست روشن نیست. هنگامی که پدهای پانسمان در محلول سفیدکننده ۰/۵ درصد هیپوکلریت و آب فرو برده شد و سپس

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1397.11.3.5.5]

خشک شد، مشاهده شد که کاهش در محتوای HD از پوست به ترتیب ۶۸ و ۶۴ درصد است. برای سم‌زدایی ویژه HD، حجم بالای ضدعفونی با غلظت هیپوکلریت در گستره ۰/۵-۴ با نسبت ۱:۱۰۰۰ مورد نیاز است (۳۰).

گولد و همکارانش بازده ضدعفونی محلول سدیم هیپوکلریت ۰/۵ تا ۲/۵ درصد را به‌وسیله مشاهدات ظاهری از زخم‌های پوست خوک گینه آلوده‌شده با HD گزارش کردند. آنها متوجه شدند در آب‌های ناخالص هنگامی‌که محلول هیپوکلریت به‌عنوان آلودگی‌زدای زخم استفاده می‌شود، باعث خرابی بیشتر بافت‌های در تماس با HD می‌شود. بنابراین استفاده از سفیدکننده به‌عنوان ضدعفونی عمومی ممکن است روش مؤثری برای ضدعفونی فوری نباشد. زیرا به‌طور عمده برای خنثی‌سازی همه عوامل، ضروری است که از محلول با غلظت بالای سفیدکننده استفاده کرد و این می‌تواند به‌شدت مناطق زخم را تخریب کند (۹). آلودگی‌زدای عمومی دیگر که در گستره دمایی وسیعی مؤثر است، محلول DS_2 است. محلول DS_2 از ترکیب ۷۰ درصد وزنی اتیلن تری آمین، ۲۸ درصد وزنی اتیلن گلیکول مونومتیل اتر و ۲ درصد وزنی سدیم هیدروکسید تشکیل شده است. محلول DS_2 به سرعت با عوامل شیمیایی واکنش می‌دهد و در مقایسه با سفیدکننده‌های معرفی‌شده، از خوردگی کمتری برخوردار است. با این وجود، برای پوست سمی است و باعث تخریب سطوح پلاستیکی می‌شود. یانگ و همکارانش برخی از واکنش‌های متداول درگیر در فرآیندهای سم‌زدایی مانند اکسیداسیون، جایگزینی هسته‌دوستی و هیدرولیز را مورد بحث قرار داده‌اند. نکته قابل توجه در مورد اغلب عوامل شیمیایی از قبیل VX، HD، GD و GB واکنش آنها با آب است. بر خلاف GB و GD، انحلال پذیری HD و VX در آب سخت است. عامل VX به‌طور ذاتی در آب بازی حل می‌شود. با وجود این، در شرایط بازی انحلال‌پذیری VX کاهش می‌یابد. در مورد HD، تماس عامل با آب باعث تشکیل محصولات یونی در مرز مشترک آنها می‌شود. در نتیجه سرعت انتقال جرم عامل

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1397.11.3.5.5]

به درون آب کاهش می‌یابد و در نهایت بر انحلال‌پذیری آن در کل فاز آبی اثرگذار است. بنابراین، دستیابی به محلول‌های آبی استفاده‌شده بر پایه واکنش هیدورلیز برای آلودگی‌زدایی کامل امکان‌پذیر نیست. مسیر دیگر برای سم‌زدایی عوامل شیمیایی،تسریع فرآیند اکسایش عوامل است. در مورد خنثی‌سازی اکسایشی VX و HD، افزودن ترکیبات آلی برای افزایش انحلال‌پذیری عوامل شیمیایی می‌تواند باعث کاهش قطبیت محلول آبی شده و در نتیجه سرعت اکسایش عوامل کاهش می‌یابد. سرعت اکسایش VX به‌طور ویژه در حلال آلی بدون آب و محلول‌های اسیدی پایین است. از طرف دیگر، در محلول‌های بازی به علت اکسایش ترجیحی سریع نیتروژن نسبت به سولفور، امکان انجام فرآیند سم‌زدایی از طریق اکسایش نمی‌تواند انجام شود (۳۱، ۳۲). یانگ و همکارانش استفاده از یون‌های فلزی، به‌عنوان کاتالیست برای ارتقاء هیدرولیز عوامل نوع G را بررسی کردند. اگرچه یون Cu (II) نقش کاتالیستی خوبی برای هیدرولیز GB دارد، اما برای HD و VX مؤثر نیست. در مورد هیدرولیز کاتالیستی، یون فلزی با تشکیل کمپلکس مس (II) با سولفور موجود در HD و یا گروه دی‌ایزوپروپیل آمینو در عامل VX از انجام واکنش جلوگیری می‌کند (۳۲).

انتخاب ماتریس آلودگی‌زدای متناسب، یک بحران در توسعه سیستم‌های ضدعفونی فعال بر پایه حلال است. انحلال عوامل در بافت آلودگی‌زدای، یکی از فاکتورهای مهم اولیه در میزان بازده ضدعفونی بر پایه مایع محسوب می‌شود. حلال‌های آلی اغلب به محلول ضدعفونی آبی برای افزایش انحلال‌پذیری عوامل شیمیایی هیدروفوبیک افزوده می‌شوند تا انحلال‌پذیری عوامل ضخیم‌کننده نامحلول در آب را بهبود ببخشند. ماتریس آلودگی‌زدای می‌تواند بر پایه آب، حلال آلی و یا ترکیبی از هر دو باشد. حلال آلی باید به موقعیت انتقال داده شود. بنابراین در اثر استفاده از آنها ممکن است مقداری خطرهای محیطی مرتبط رخ دهد. از طرف دیگر، محیط ضدعفونی متخلخل فاز جامد می‌تواند مقدار قابل توجه‌ای از عوامل را جذب و در ساختار متخلخل خود نگه

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1397.11.3.5.5]

دارد و اغلب از واکنش‌پذیری آنها چشم‌پوشی می‌شود (۱).

۴-۲ کیت M291

یکی از ضدعفونی‌کننده‌های مناسب ساخته شده توسط دپارتمان دفاعی US حاوی مخلوطی از ذرات رزین آزاد است که درون ماتریس الیاف انباشته می‌شود. مخلوط رزین کیت M291 شامل رزین جذب‌کننده، تبادل کاتیون و آنیونی است. این مخلوط رزین (XE-55) برای جذب سریع عوامل شیمیایی مایع از روی پوست طراحی شده است تا آنها را از طریق هیدرولیز خنثی کند. با وجود این، تعدادی از مطالعات نشان داده است که برای عوامل محرک HD، $CH_3SCH_2CH_2Cl$، VX هیچ‌گونه هیدرولیزی حتی بعد از گذشت ۱۰ روز رخ نمی‌دهد. همچنین، هیدرولیز GD با نیمه‌عمر ۳۰ ساعت انجام می‌شود. یکی از عیب‌های اصلی کیت M291 برای حذف سریع مواد شیمیایی از روی پوست، ایجاد باقیمانده کثیف بزرگی بر روی پوست سربازان است. بنابراین تهدید عوامل می‌تواند همچنان به علت حضور ذرات جامد حاوی عوامل شیمیایی بر روی پوست وجود داشته باشد و اشخاص از تبدیل عوامل به ترکیبات خنثی اطمینان ندارند (۱).

۴-۳ محلول‌های فعال بر پایه زئولیت و کربن فعال

بارترام و همکارانش گزارش دادند که جاذب‌های پاک‌کننده از قبیل سدیم زئولیت و زئولیت تبادل‌گر نقره در طبیعت به‌طور کامل فعال هستند. برای پاکسازی (آلودگی‌زدایی) سطوح آلوده شده به عوامل شیمیایی،چنین موادی به شکل گلوله، پودر یا سوسپانسیون به کار برده می‌شوند. این جاذب‌های زئولیتی فعال می‌توانند عوامل شیمیایی را از سطوح آلوده شده، حذف کنند و عوامل غیر سمی و نسبتاً بی‌خطر را بعد از چند وقت تحویل دهند. بارترام متوجه شد که NaY در پاکسازی HD مؤثر است. با وجود این، NaY تنها VX و S،O دی اتیل فنیل فسفونوتیوات (DEPPT) را جذب می‌کند و پاکسازی واکنشی این عوامل را انجام نمی‌دهد. بنابراین، تجزیه ترکیبات سمی

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1397.11.3.5.5]

در مورد DEPPT و VX مشاهده نشد. همچنین، NaY برای پاکسازی HD مناسب است، درحالی‌که برای پاکسازی اغلب عوامل دیگر موجود در مناطق نبرد مناسب نیست. از طرف دیگر، AgY در اثر واکنش با HD، حدواسط قلیایی نقره را تشکیل می‌دهد و از طریق واکنش‌های کاتالیستی VX غیرسمی تحویل می‌دهد. نیمه‌عمر حالت پایدار VX در هنگام استفاده از پاک‌ساز AgY حدود ۶/۶ ساعت گزارش شده است درحالی‌که نیمه‌عمر پاکسازی NaY، بیش از ۵ روز است. در مورد HD زمان نیمه‌عمر آلودگی‌زدایی NaY حدود ۶ یا ۷ روز است، درحالی‌که زمان نیمه‌عمر برای آلودگی‌زدایی AgY حدود ۲۰ روز به دست آمد. آنها اطلاعاتی از بازده حذف عوامل شیمیایی توسط پاکسازی‌های زئولیتی تهیه نکردند. همچنین پاکسازی مؤثر باید همه عوامل یا بخش زیادی از عوامل را به سرعت از سطح آلوده شده حذف کند و به ترکیبات غیرسمی تبدیل کند. بنابراین تلاش‌های بیشتری برای انجام آزمایش حد کمی مقدار عوامل حذف شده به‌وسیله چنین پاکسازی‌هایی از سطوح مختلف مورد نیاز است (۱).

براون و همکارانش استفاده از اکسیدهای آلومینیم دی‌هیدروکسیل‌شده و کربن با تخلخل بالا محتوی واکنشگرهای فعال را گزارش کردند. چنین سیستم آلودگی‌زدایی قادر است عوامل شیمیایی مایع بالک را از طریق جذب و خنثی‌سازی حذف کند. برای اثربخشی خصوصیات واکنشگر در این سیستم‌های آلودگی‌زدای (پاکسازی)، حدود ۱۰ تا ۹۰ درصد از حجم خالی کربن متخلخل را به‌وسیله واکنش‌دهنده‌های فعال پر می‌کنند. تهیه ذرات آلودگی‌زدای جامد متحرک، از طریق اشباع کربن با واکنش‌دهنده فعال مایع و تبخیر واکنش‌دهنده اضافی انجام می‌شود. با وجود این، تبخیر واکنش‌دهنده اضافی می‌تواند باعث حذف حلال و افزایش هزینه تولید شود. به‌علاوه، حجم حفره در دسترس کربن متخلخل که جذب عوامل شیمیایی مایع بالک را تسریع می‌کند، ممکن است از طریق حضور واکنش‌دهنده‌های فعال در ساختار کربن مسدود شود. مواد با تخلخل بالا برای

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1397.11.3.5.5]

ترکیب‌بندی جاذب فعال ساخته‌شده از اکسیدهای آلومینیوم دی هیدروکسیلی شده و کربن یا هر دو پیشنهاد می‌شود. ساختار کربن با تخلخل بالا با مساحت سطح $1800 m^2/g$ برای چنین کاربردهایی ارجح است. هیدروکسیل‌زدایی Al_2O_3 برای افزایش واکنش‌پذیری آن ضروری است. جاذب جامد می‌تواند برای سطوح آلوده از طریق روش‌های: ۱) پراکندگی در حلال آلی، ۲) به‌عنوان پودر خشک و ۳) در شکل دانه دانه یا گلوله‌ای به کار برده شود (۳).

۴-۴ آنزیم‌های تثبیت‌شده

فناوری استفاده از آنزیم برای پاکسازی عوامل OPs در دهه اخیر مورد توجه قرار گرفته است. اتصالات عرضی فعال و تثبیت آنزیم‌ها جهت شکست و یا تمیزکردن (بلعیدن) ماتریس پلیمری OPs به‌طور گسترده مطالعه شده است و بیشتر کارها در مقایسه با روش‌های بر پایه آنزیم متداول که با شرکت آنزیم‌های محلول خارج‌شده از اسفنج آلودگی‌زدا درگیر است، به موفقیت قابل‌توجهی دست یافته‌اند (۴، ۳۳-۳۶).

تکنیک‌هایی از قبیل تثبیت آنزیم درون ماتریس فوم پلیمری دارای مزیت‌های فراوانی است. به‌عنوان مثال آنزیم تثبیت‌شده یا دارای اتصالات عرضی با ماتریس پلیمری به راحتی در حضور محلول‌های آبی تفکیک نمی‌شود و در شرایط محیطی ناگوار مقاوم هستند. با وجود این، موضوع پایداری آنزیم‌های تثبیت‌شده در ساختار فوم نیاز به درک مفهوم اولیه دارد (۳۷).

هاونس و راس، فوم‌های پلی‌یورتان با آنزیم تثبیت‌شده را توسعه دادند که می‌توانند در مایعات غرق شوند و عوامل ارگانوفسفات را خنثی کنند. آنها فوم‌های خشک و مرطوب حاوی سورفاکتانت را توسعه دادند، به‌طوری‌که حضور سورفاکتانت می‌تواند در شکل ساختار سلولی و توانایی جذب آب اثرگذار باشد و پیشنهاد دادند که بعد از استفاده، می‌توان فوم‌ها را در ظرف‌های مایع مهر و موم‌شده، قرار داد. آنها همچنین پیشنهاد دادند که تعدادی از فوم‌ها بعد از تکمیل واکنش هیدرولیز دوباره می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند. کاهش فعالیت آنزیمی

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1397.11.3.5.5]

فوم مرطوب که در شرایط یخچال نگهداری می‌شود و فوم خشک که در دمای محیط خشک‌شده قرار دارد، مورد بررسی قرار گرفت. هر دو نشان دادند که فعالیت آنزیم بالایی دارند. آنها بر روی اثر فعالیت آنزیمی فوم مرطوب نگهداری‌شده در دمای محیط بحث نکردند. همچنین اطلاعاتی از مدت زمان ذخیره فوم در ظرف پلاستیکی برای تکمیل واکنش هیدرولیز ارائه نشد (۳۵). به‌تازگی، توجه زیادی به موضوع توسعه فرمولاسیون آلودگی‌زدای جدید بر پایه فعالیت اُکسیم اکسایشی(Oxidative oxime) و کولینستراز (Cholinesterase) شده است (۲۳).

مرکز تحقیقات دارویی نظامی و دفاعی شیمیایی US، اسفنج پلی‌یورتان حاوی آنزیم تثبیت‌شده‌ای را توسعه دادند که نه تنها عوامل شیمیایی را جذب می‌کند، بلکه باعث نابودی کامل آنها از طریق فعالیت آنزیمی می‌شود. در این مورد آنزیم‌های پاکسازی عوامل شیمیایی و کولینستراز به همراه اُکسیم‌هایی که فعالیت کاتالیستی آنزیم‌های AchE را ذخیره می‌کند، در ساختار اسفنج شرکت دارند (۳۳، ۳۷). چنین اسفنج‌های فعالی، توانایی نگهداری پایدار آنزیم‌ها در مدت زمان طولانی و دمای بالا را دارند. اسفنج‌ها می‌توانند به علت داشتن اُکسیم‌های ذخیره‌شده، دوباره استفاده شوند. اگرچه این اسفنج‌ها توانایی انجام رفع عوامل و جلوگیری از آلودگی دوباره را دارند، اما دستیابی به بازده پاکسازی بالا هنوز از مشکلات آنها است (۲۳).

عملکرد اسفنج‌ها می‌توانند از طریق شرکت مواد جاذب در هسته آنها افزایش یابد. بنابراین کربن فعال به ساختار فوم اضافه می‌شود تا ویژگی‌های جذب ضروری به اسفنج فعال القاء شود (۳۷). اسفنج‌های پلی‌یورتان حاوی هسته کربن فعال دارای ویژگی جذب عالی هستند، به‌طوری‌که به گیراندازی بخارهای ارگانوفسفات کمک می‌کنند (۲۲). گوردون تعداد زیادی از اسفنج‌های حاوی آنزیم فعال تثبیت‌شده که عملکرد مؤثری شبیه به تکنیک‌های موجود یا فناوری‌های جدید آلودگی‌زدا دارند را گزارش کرده است. آنها اثر اسفنج آلودگی‌زدا در برابر

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1397.11.3.5.5]

عواملی از قبیل VX و GD را ارزیابی کردند و پی بردند که در مقایسه با فرمولاسیون‌های آلودگی‌زدای جدید شناخته‌شده به‌عنوان محلول آلودگی‌زدای پوست فعال، فناوری اسفنج حاوی آنزیم برای VX و GD به ترتیب اثر برابر و بیشتری دارد (۳۸).

۴-۵ محلول آلودگی‌زدای فعال پوست (لوسیون) (RSDL)

محلول آلودگی‌زدای فعال پوست، محصول جدیدی برای پاکسازی تعدادی از عوامل شیمیایی است. محلول RSDL دارای ۱/۲۵ مولار پتاسیم ۲،۳ بوتان دیون مونوکسیمات در مخلوط آبی حاوی ۱۰ درصد وزنی حجمی از پلی اتیلن گلیکول مونو اتیل اتر است. نظامیان آمریکا به‌تازگی جایگزین‌کردن نمونه RSDL به جای کیت آلودگی‌زدای تجهیزات و کیت آلودگی‌زدای پوست (M291) را تأیید کرده‌اند (۱۹). محلول RSDL به‌طور ابتدایی به‌وسیله تأسیسات تحقیقاتی دفاعی کانادا توسعه داده شد و به‌وسیله تعداد زیادی از ارگان‌های نظامی جهان استفاده شد. محلول آلودگی‌زدای پوست برای پاکسازی عوامل شیمیایی و عوامل مهماتی زیستی از قبیل تری‌کوتسن میکوتوکسین (T2 toxin) که باعث تحرکات شدید چشم و پوستی می‌شود، استفاده می‌شود. این محصول به‌تازگی توسط G-ZEM ساخته می‌شود. عوامل عصبی از قبیل VX و خردل ضخیم‌شده می‌توانند به‌طور مؤثری از روی پوست و یا پارچه با روش RSDL جاروب و پاکسازی شوند. در مقایسه با کاربرد RSDL از طریق جاروب و تزریق‌کردن بر روی پوست، مالش پوست با اسفنج RSDL صابونی می‌تواند به‌طور مؤثری خردل ضخیم شده را پاکسازی کند (۲۲).

در هنگام استفاده از RSDL می‌توان به راحتی فعالیت‌های نظامی را انجام داد، اما اثر ایجاد باقیمانده نفتی بر روی پوست می‌تواند باعث سلب آسایش جنگاوران شود. اگرچه تأییدشده که RSDL نسبت به کیت نظامی M291، بازده آلودگی‌زدایی بهتری دارد اما شناخت کمی در مورد پاکسازی زخم به‌وسیله RSDL وجود دارد. والتر و همکارانش مقدار کلاژن و

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1397.11.3.5.5]

استحکام مکانیکی در طول فرآیند درمان زخم ایجادشده بر روی پوست موش اسپراژ دیولای (Sprage dewlay) را با استفاده از روش RSDL بررسی کردند. آنها متوجه شدند که در مقایسه با زخم درمان‌نشده، استحکام بافت و محتوی کلاژن در زخم‌های درمان‌شده با RSDL به ترتیب ۲۳ و ۱۱ درصد کاهش می‌یابد (۲۶).

کاربردهای RSDL برای پاکسازی زخم محدود است، زیرا تنها برای پوست سالم کاربرد دارد (۱۹). محلول RSDL محتوی مقداری آب، اثر مهمی در کاهش سمیت عوامل شیمیایی ایجادشده توسط عوامل سمی عصبی از قبیل GD، GB و VX دارد. همچنین پاکسازی عامل می‌تواند باعث کاهش سمیت گاز خردل سولفوردار شود. حضور آب در آلودگی‌زدای تجهیزات مطلوب نیست، زیرا باعث خرابی تجهیزات حساس مانند قطعات الکترونیکی می‌شود. بنابراین فناوری آلودگی‌زدای جدید بر پایه غیرآبی که بتواند باقیمانده آب از سطح را به‌صورت پیوسته حذف کند، برای پاکسازی تجهیزات و اشخاص مورد نیاز است (۲۳،۱۵).

فرمولاسیون دیگر با نام فوم MDF-100 توسط آزمایشگاه بین‌المللی ساندیا معرفی شد. فوم MDF-100 به کار برده‌شده برای پاکسازی سطح، در مدت زمان ۳۰ دقیقه به مایع تبدیل می‌شود. گزارش شده است که فوم MDF-100 برای تماس پوستی با عوامل عصبی از قبیل GD و VX مؤثر است. در اینجا، نسبت محافظت عبارت است از نسبت تجویز عامل شیمیایی تعیین‌شده (LD50) که باعث مرگ ۵۰ درصد حیوانات بعد و قبل از پاکسازی می شود. با وجود این، لوکی و همکارانش گزارش کردند که در مورد عوامل عصبی از قبیل VX محلول‌های پاکسازی دیگر بسیار مؤثرتر هستند و نسبت محافظت آنها بیش از ۱۰۰ برابر است. کارآیی‌های حذف کامل عوامل شیمیایی از روی پوست توسط محصولاتی از قبیل دیفوترین (با کمی سوزش پوست)، آب صابون و محلول نمک مقایسه شد که به ترتیب ۵۰، ۳۷ و۳۲ درصد به دست آمد (۲۲). در مورد تست درون آزمایشگاهی پوست با

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-02]

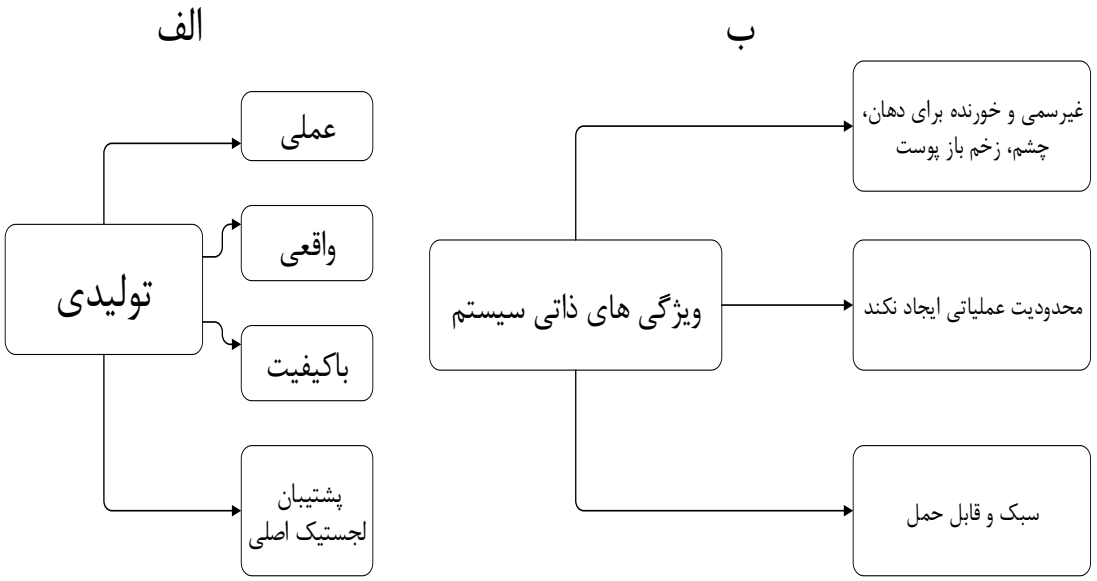
[DOR: 20.1001.1.27170632.1397.11.3.5.5]

استفاده از سفیدکننده رقیق‌شده و نشده در کاهش خردل به ترتیب ۶۷ و ۷۹ درصد گزارش شد (۶،۸).

برای عواملی از قبیل VX، سفیدکننده رقیق‌شده بی‌اثر است. اگرچه سفیدکننده رقیق‌نشده به نظر مؤثر است، اما موضوع استفاده همه جانبه از آن به علت تخریب پوست و خورندگی آن گزارش نشده است. تلاش به‌منظور طراحی سیستم‌های آلودگی‌زدای بسیار موثر، غیرذره‌ای، غیرآبی، عمومی و دوست‌دار پوست ضروری است تا بتواند به‌عنوان تکنیک آلودگی‌زدای تنها یا ترکیب با عوامل خنثی‌کننده دیگر عمل کند. ویژگی‌های سیستم آلودگی‌زدای ایده‌آل که نیازهای افراد نظامی و غیرنظامی را فراهم می‌کند، در شکل ۱و ۲ خلاصه شده است.

۴-۶- آلودگی‌زدای غیرذره‌ای خشک

یکی از وظایف اولیه برنامه زیستی و شیمیایی نظام آمریکا، توسعه فناوری آلودگی‌زدای غیرآبی است که بتواند برای تجهیزات نظامی و پوست انسان در گستره وسیعی از شرایط محیطی استفاده شود (۲۰،۲۴،۳۶،۳۷،۳۹).



شکل ۱- شرایط ساخت سیستم‌های آلودگی‌زدایی ایده‌آل (الف) و ویژگی‌های ذاتی سیستم‌های آلودگی‌زدایی ایده‌آل (ب).

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1397.11.3.5.5]



شکل ۲- شرایط کاربردی از سیستم آلودگی‌زدایی برای اندازه‌گیری مقابل مواد شیمیایی سمی و عوامل شیمیایی زیستی.

تحقیقات اخیر در دانشگاه تگزاس‌تک نشان داد که بسترهای چند لایه‌ای سوزن منگنه‌ای توانایی نگهداری بخار و جذب شیمیایی بالک را دارد. ساخت مشتقات از مواد کامپوزیتی سه لایه‌ای در وزن‌ها، ضخامت و مقدار الیاف پلیمری با استفاده از الکترود جمع‌کننده در بافندگی سوزنی به‌وسیله اورلیکون نیومگ اتریش (Oerlikon Neumag Austria GmbH) در آزمایشگاه بافندگی و مواد پیشرفته در دپارتمان سلامت انسان و محیط در دانشگاه تگزاس‌تک صورت گرفت (۳۹). ویپ کامپوزیت (composite wipe) طراحی شد تا بازده پاکسازی بالا، جذب عالی مواد سمی مایع، جذب ویژه بخارهای سمی و توانایی نگهداری بالا به

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1397.11.3.5.5]

دست آید. ارزیابی انجام‌شده توسط آزمایشگاه‌های لونس و لیورمر نشان داد که توانایی نگهداری بخارات خردل توسط ویپ دیکون (Decon wipe) بهتر از ذره کربن و فناوری آلودگی‌زدای جاذب M291 است (۲۳). از دیدگاه لجستیکی، پدهای غیربافتی خشک از فناوری آلودگی‌زدای ذره‌ای بهتر هستند و می‌توان آنها را در اشکال مختلفی از قبیل ویپ یا میت (Mitt) ساخت. شکل ۳ و ۴ استفاده از پد آلودگی‌زدای غیربافتی را نشان می‌دهد.



شکل ۳- ویپ آلودگی‌زدای غیربافتی خشک



شکل ۴- کیت آلودگی‌زدایی غیربافتی خشک.

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1397.11.3.5.5]

نتیجه‌گیری

آلودگی‌زدایی تجهیزات و افراد، یک امر مهم برای حفظ توان نیروها و افزایش قدرت حمله است. سیستم آلودگی‌زدایی می‌بایست قابلیت پاکسازی مجموعه‌ای از عوامل شیمیایی، زیستی و مواد شیمیایی صنعتی سمی را داشته باشد. این ضروریات برای توسعه سیستم آلودگی‌زدایی با کارآیی بالا و بهبود عملکرد لجستیک ضروری است. با وجود این، یک محلول آلودگی‌زدای خاص به تنهایی نمی‌تواند برای حذف چندین عامل تهدیدکننده به کار گرفته شود. الیاف به‌عنوان بستر، نقش مهمی در توسعه فناوری آلودگی‌زدایی مؤثر از قبیل ذرات کاتالیستی، بیوسایدها و فناوری بر پایه آنزیم‌ها ایفا می‌کنند. این مسائل موجب ایجاد همکاری بین رشته‌ای از قبیل شیمی، علوم منسوجات، زیست‌فناوری، نانوفناوری و مهندسی مواد می‌شود. در نهایت سیستم آلودگی‌زدای با بالاترین توانایی پاکسازی، کاهش اثرات سمی و افزایش کارآیی یکی از مهم‌ترین نیازها برای جوامع نظامی و یاری‌دهندگان اولیه است.

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1397.11.3.5.5]

References فهرست منابع

1. Bartram P.W. and Wagner G.W. (2003). Decontamination methods for toxic chemical agents. USPatent. 6,537,382.

2. Bide R.W., Burczyk A.F. and Risk D.J. (1996). Comparison of skin decontaminants for HD: Canadianreactive skin decontaminant lotion, Canadian decontaminating mitt and US skin decontaminantkit. In: Proceedings of the 1996 medical defense biosciences review, bioscience '96. US ArmyMedical Research and Development Command, Aberdeen Proving Ground, MD.

3. Brown R.S., Rossin J.A., Kotary J.E., Fitzgerald G., Gerhard K.G., Mearns H.A., Newton R.A., KellerJ.H., Mawhinney D.B. and Yates J.T. (2005). Decontamination of chemical warfare agents using reactive sorbent. US Patent. 6,852,903.

4. Caranto G.R., Waibel K.H., Asher J.M., Larrison R.W., Brecht K.M., Schutz M.B., Raveh L., Ashani Y., Wolfe A.D., Maxwell D.M. and Doctor B.P. (1994). Amplifi cation of the effectiveness of acetylcholinesterasefor detoxifi cation of organophosphorous compounds by bis-quarternary oximes. Biochem Pharmacol. 47(2):347–357.

5. De Rossi D., Carpi F., Lorussi F., Scilingo P.E. and Tognetti A. (2006). Wearable mechanosensing andemerging technologies in fabric-based actuation. In: Jayaraman S., Kiekens P. and Grancaric A.M. (eds) Intelligent textiles for personal protection and safety, NATO security through scienceseries. Ios Press, Amsterdam. 55–64.

6. Dolzine T.W. and Logan T. (1998). In: Proceedings of the 1998 medical defense biosciences review, bioscience 98. US Army Medical Research and Development Command, No. AD MOO 1167.

7. Foster K.L., Fuerman R.G., Economy J., Larson S.M. and Rood M.J. (1992). Adsorption characteristicsof volatile organic compounds onto activated carbon fi bers. Chem Mater. 4(5):1068–1073.

8. Gerasimo P., Blomet J. and Mathieu L. (2000). Diphoterine decontamination of Cl 4 – sulfur mustardcontaminated human skin fragments in vitro. Toxicologist. 54(1):152.

9. Gold M.B., Bongiovanni R., Scharf B.A., Gresham V.C. and Woodward C.L. (1994). Hypochlorite solutionas a decontaminant in sulfur mustard contaminated skin defects in the euthymic hairlessGuinea Pig. Drug Chem Toxicol. 17(4):499–527.

10. Ramkumar S.S., Sata U.R. and Hussain M.M. (2008). Personal protective fabric technologies for chemical countermeasures. In: Kendall R.J., Smith P.N., Presley S.M. and Austin G.P. (Eds). Advances in biological and chemical terrorism countermeasures. Taylor and Francis Group, Boca Raton. pp 203–227.

11. Reeves S. (2008). Statement before the subcommittee on emerging threats and capabilities committee on armed services, Unites States senate, on behalf of the joint program executive officer for chemical and biological defense.

12. Sabourin C.L., Hayes T.L. and Snider T.H. (2001). A medical research and evaluation facility study on Canadian reactive skin decontamination lotion. USAMRICD, Edgewood Area, Aberdeen Proving Ground, MD, Medical Research and Evaluation Facility (MREF).

13. Sata U.R. and Ramkumar S.S. (2007). New developments with nonwoven decontamination wipes. In: Proceedings of international nonwovens technical conference,

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1397.11.3.5.5]

Atlanta, GA, 24–27, Sept 2007.

14. US Department of Defense (DoD). (2004). Chemical and biological defense program, Annual report to Congress.

15. US Department of Defense (DoD). (2005). Chemical and biological defense program, Annual report to Congress.

16. US Department of Defense (DoD). (2006). Chemical and biological defense program, Annual report to Congress, Mar 2006.

17. US Department of Defense (DoD). (2007). Chemical and biological defense program, Annual report to congress.

18. US Department of Defense (DoD). (2010). Chemical and biological defense program, Annual report to congress.

19. US Department of Defense (DoD). (2009). Chemical and biological defense program, Annual report to congress.

20. Marrs T.C., Maynard R.L. and Sidell F.R. (1996). Chemical warfare agents, toxicology and treatment, 2nd edn. Wiley, West Sussex.

21. Van Hooidonk C., van der Weil H.J. and Langerberg J.P. (1996). Comparison of the effi cacy of skin decontaminations II. In-vivo TextsFinal report, Prins Marutis Laboratory, TNO report PML

22. Lukey B.J., Hurst G.C., Gordon R.K., Doctor B.P., Clarkson E.I.V. and Slife H.F. (2004). Six current or potential skin decontaminants for chemical warfare agent exposure: a literature review. In: Flora S.J.S., Romano J.A., Baskin S.I. and Sekhar K. (Eds). Pharmacological perspectives of toxic chemicals and their antidotes. Narosa Publishing House, New Delhi. 13–24.

23. Ramkumar S.S., Love A.H., Sata U.R., Koester C.J., Smith W., Keating G.A., Hobbs L., Cox S.B., Lagna W.M. and Kendall R.J. (2008). Next generation non-particulate dry nonwoven wipe for chemical warfare agent decontamination. Ind Eng Chem Res. 47(24):9889–9895.

24. Lukey B.J., Slife H.F., Clarkson E.D., Hurst C.G. and Braue E.H. (2008). Chemical warfare agent decontamination from skin. In: Romano J.A., Lukey B.J. and Salem H. (Eds). Chemical warfare agents chemistry, pharmacology, toxicology, and therapeutics, 2nd edn. Taylor & Francis Group, Boca Raton. pp 611–625.

25. Van Hooidonk C., van der Weil H.J. and Langerberg J.P. (1996). Comparison of the effi cacy of skin decontaminations II. In-vivo TextsFinal report, Prins Marutis Laboratory, TNO report PML.

26. Havens P.L. and Rase H.F. (1993). Reusable immobilized enzyme/polyurethane sponge for removal and detoxifi cation of localized organophosphate pesticide spills. Ind Eng Chem Res 32:2254–2258.

27. Lordgooei M., Charmichael K.R., Kelly T.W., Rood M.J. and Larson S.M. (1996). Activated carbon cloth adsorption-cryogenic system to recover toxic volatile organic compounds. Gas Sep Purif. 10:2123–2130.

28. Kaiser R. and Haraldsen K. (2002). Decontamination of sensitive equipment. Surf Contam Clean. 1:1–19

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1397.11.3.5.5]

29. Wellert S., Imhof H., Dolle M., Altmann H., Richardt A. and Hellweg T. (2008). Decontamination of chemical warfare agents using perchloroethylene–Marlowet IHF–H 2 O-based microemulsions: wetting and extraction properties on realistic surfaces. Colloid Polym Sci. 286:417–426.

30. Wormser U., Brodsky B. and Sintov A. (2002). Skin toxicokinetics of mustard gas in the guinea pig: effect of hypochlorite and safety aspects. Arch Toxicol. 76:517–522.

31. Yang Y-C., Baker J.A. and Ward R.J. (1992). Decontamination of chemical warfare agents. Chem Rev. 92(8):1729–1743.

32. Yang Y-C. (1999). Chemical detoxification of nerve agent VX. Acc Chem Res 32:109–115.

33. Gordon R.K., Shawn F.R., Russell A.J., LeJeune K.E., Maxwell D.M., Lenz D.E., Ross M. and Doctor B.P. (1999). Organophosphate skin decontamination using immobilized enzymes. Chem BiolInteract. 119(120):463–470.

34. Gordon R.K., Owens R.R., Askins L.Y., Baker K., Ratcliffe R.H., Doctor B.P., Clarkson E.D., Schulz S., Railer R., Sigler M., Thomas E., Ault K. and Mitcheltree L.W. (2006b). Formulation of polyurethane sponges for chemical, biological, and radiological decontamination and detoxifi cation. Bioscience review, putting the pieces together, Hosted by US Army Medical Research Institute of Chemical Defense, 4–9 June 2006, Hunt Valley, MD.

35. Maxwell D.M., Castro C.A., De La Hoz D.M., Gentry M.K., Gold M.B., Solana R.P., Wolfe A.D. and Doctor B.P. (1992). Protection of Rhesus monkeys against Soman and prevention of performance decrement by pretreatment with acetylcholinesterase. Toxicol Appl Pharmacol. 115:44–99.

36. Gordon R.K., Gunduz A.T., Askins L.Y., Strating S.J., Doctor B.P., Clarkson E.D., Skvorak J.P., Maxwell D.M., Lukey B. and Ross M. (2004). Detection, decontamination and detoxifi cation ofchemical warfare agents using polyurethane enzyme sponges. In: Flora S.J.S., Romano J.A., Baskin S.I. and Sekhar K. (Eds). Pharmacological perspectives of toxic chemicals and their antidotes.Springer, Berlin. 41–50.

37. Gordon R.K., Owens R.R., Askins L.Y., Baker K., Ratcliffe R.H., Doctor B.P., Clarkson E.D., Schulz S., Railer R., Sigler M., Thomas E., Ault K. and Mitcheltree L.W. (2006a). Chemical, biological, and radiological decontamination and detoxifi cation using polyurethane sponges. In: Proceedings of the 2006 scientifi c conference on chemical and biological defense research, Hunt Valley, MD.

38. Walters T.J., Kauvar D.S., Reeder J. and Baer D.G. (2007). Effect of reactive skin decontamination lotion on skin wound healing in laboratory rats. Mil Med. 171(3):318–321.

39. Ramkumar S.S. (2009). Process for making chemical protective wipes and such wipes. US Patent 7,516,525.

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1397.11.3.5.5]

Considering of Developments in Decontamination Technologies of Equipment and Persons

Ali Roostaie[1*], Hamid Abedi[1], Shokooh Ehteshami[2]

1- Police Technology and Equipment Department, Police Sciences and Social Studies Institute, Tehran, Iran.
2- Analytical Chemistry Laboratories, Department of Chemistry, Islamic Azad University, Central Tehran Branch, Tehran, Iran.

ali.roostaie1@gmail.com

Abstract

Individual protection is important for warfighters, first responders and civilians to meet the current threat of toxic chemicals and chemical agents. Within the realm of individual protection, decontamination of warfare agents is not only required on the battlefield but also in laboratory, pilot plants, production and agent destruction sites. It is of high importance to evaluate various decontaminants and decontamination techniques for implementing the best practices in varying scenarios such as decontamination of personnel, sites and sensitive equipment. This manuscript considers decontamination technologies such as adsorptive carbon and enzymes and highlights recent developments such as reactive skin decontamination lotion and Low-cost Personal Decontamination System (LPDS). Decontamination using solvent and non-solvent based systems is an important countermeasures strategy adopted by military, first responders and emergency personnel to sustain their operational capability and prevent additional contamination.

Keywords: Toxic substances and chemical agents, Decontamination, Washing solutions, Nanoparticles, Disinfection.

[Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.27170632.1397.11.3.5.5]