



بمب فسفری: تحلیل چندوجهی از مکانیسم‌های فیزیکوشیمیایی، آسیب‌شناسی بالینی، آلودگی زیست‌محیطی و چالش‌های حقوقی پروتکل سوم

علیرضا محمودی فرد^{۱*}، سید محمدرضا حسینی علی آباد^۲

^۱پسادکترای آینده‌پژوهی و مدرس دانشگاه ملی مهارت، دانشکده فنی انقلاب اسلامی، تهران، ایران، alireza10.m10@gmail.com

^۲استاد دانشگاه‌های ملی و بین‌المللی، گروه مجموعه مدیریت، علوم پایه و مهندسی، dr.hosseinialiabad@gmail.com

چکیده

فسفر سفید (WP) به عنوان یک مهمات آتش‌زا با ویژگی خوداشتعالی در دمای ۳۰ درجه سلسیوس و دمای شعله‌ای بالای ۹۵۰ درجه سلسیوس، سلاحی بحث‌برانگیز با آثار مخرب چندلایه است. این مقاله با مرور پیشینه‌ی پژوهش از جنگ جهانی دوم تا درگیری‌های اخیر در اوکراین (۲۰۲۲-۲۰۲۴)، مبانی فیزیکوشیمیایی (واکنش $P_4 + 5O_2 \rightarrow P_4O_{10}$ با آزادسازی ۲۵۰۰ کیلوژول بر مول)، مکانیسم سوختگی پیش‌رونده (نفوذ ذرات فسفر مذاب تا عمق ۳-۴ میلی‌متری پوست طی چند ثانیه) و اثرات سم‌شناختی (ادم ریوی، افزایش ۱۵ برابری نوتروفیل‌ها در BALF و نکروز آلوئولی) را تشریح می‌کند. داده‌های تجربی آنالیز شده نشان می‌دهد خمپاره‌ی M۸۲۵A۱ با ۱۱۶ گلوله فسفری، محدوده‌ی پوشش مؤثر ۹۵-۱۱۰ متر و دمای پیک ۸۸۵ درجه سلسیوس ایجاد می‌کند. در ۱۵۴ بیمار مبتلا به سوختگی فسفری، دبریدمان دیر هنگام (>۱۲ ساعت) خطر نارسایی کلیه را ۲.۵ برابر و نیاز به پیوند پوست را ۳.۸ برابر افزایش داده است. آلودگی خاک در مناطق جنگی عراق تا شعاع ۱۰۰ متری شامل کاهش pH به ۴.۲، افزایش فسفر کل تا ۲۴۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم (۱۳ برابر حد طبیعی) و آلودگی آرسنیک تا ۱۲.۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم (۴ برابر حد مجاز) می‌باشد. در سطح حقوقی، در ۸۷ درصد از ۳۰ مورد نقض پروتکل سوم (۱۹۸۰)، کشورها با توجیه «تولید دود» از WP در مناطق شهری استفاده کرده‌اند. در نهایت، این مقاله با شناسایی «چارچوب چهاروجهی تهدید فسفری» و ارائه راهکارهایی از جمله پروتکل جهانی درمان سوختگی فسفری، اصلاح پروتکل سوم کنوانسیون ۱۹۸۰ و روش‌های زیستی پالایش خاک، به بازنگری در قوانین بین‌المللی و استانداردسازی درمان می‌پردازد.

کلمات کلیدی

بمب فسفری، فسفر سفید، سلاح آتش‌زا، سوختگی پیش‌رونده، سمیت تنفسی، آلودگی خاک، پروتکل سوم کنوانسیون ۱۹۸۰، حقوق بشر دوستانه



بمب فسفوری: تحلیل چندوجهی از مکانیسم‌های فیزیکوشیمیایی، آسیب‌شناسی بالینی، آلودگی زیست‌محیطی و چالش‌های حقوقی پروتکل سوم
علیرضا محمودی فرد و سید محمدرضا حسینی علی آباد و مسعود نصیری

مقدمه

فسفر سفید (White Phosphorus – WP) که به‌عنوان یکی از مرگ‌بارترین و در عین حال بحث‌برانگیزترین عوامل شیمیایی در زرادخانه‌های نظامی مدرن شناخته می‌شود، ماهیتاً یک بمب فسفوری (Phosphorus Bomb) نیست، بلکه یک مهمات آتش‌زا (Incendiary Agent) با ویژگی‌های منحصربه‌فرد فیزیکی و شیمیایی است که در تماس با اکسیژن هوا، به‌طور خودبه‌خود و با دمای فراتر از ۸۱۵ درجه سلسیوس مشتعل می‌شود (UNEP, ۲۰۱۹). این ماده که در دماهای معمولی جامد مومی شکل بوده و در آب نامحلول است، به‌دلیل قابلیت تولید دود غلیظ سفید (حفاظت بصری) و همچنین خاصیت آتش‌زایی فوق‌العاده، از جنگ جهانی دوم تا کنون به‌طور گسترده در میدان‌های نبرد استفاده شده است (ICRC, ۲۰۱۵). با این حال، ماهیت دوگانه‌ی فسفر سفید به‌عنوان یک ماده‌ی "قانونی" در شرایط خاص و "ممنوع" در شرایط دیگر، آن را به یکی از پیچیده‌ترین مباحث حقوق بین‌الملل بشردوستانه (IHL) تبدیل کرده است. پروتکل سوم کنوانسیون ۱۹۸۰ ملل متحد موسوم به پروتکل "سلاح‌های آتش‌زا" (Protocol III on Incendiary Weapons)، استفاده از مهمات آتش‌زا علیه غیرنظامیان را به‌طور مطلق ممنوع اعلام می‌کند و استفاده از آن علیه اهداف نظامی واقع در میان مناطق متمرکز غیرنظامی را نیز با محدودیت‌های جدی مواجه می‌سازد (UN, ۱۹۸۰). نکته‌ی حائز اهمیت آن‌که، استفاده از فسفر سفید به عنوان "تولیدکننده‌ی دود" (Smoke Screen) برای پنهان‌سازی تحرکات نیروهای خودی یا به عنوان "روشنایی‌گر میدان نبرد" (Illumination) معمولاً غیرقانونی تلقی نمی‌شود، اما زمانی که این ماده عمداً بر سر مناطق مسکونی یا تجمع انسانی ریخته شود، به یک جنایت جنگی تبدیل می‌گردد (Amnesty International, ۲۰۱۴). تاریخچه‌ی کاربرد تسلیحات فسفوری مملو از تراژدی‌های غیرنظامی است: از بمباران درسدن (۱۹۴۵) و هامبورگ توسط متفقین که در آن از بمب‌های فسفوری برای ایجاد طوفان آتش استفاده شد، تا جنگ ویتنام (۱۹۷۰-۱۹۶۰) که ارتش آمریکا از WP برای پاکسازی مناطق جنگلی و منهدم کردن پناهگاه‌های زیرزمینی استفاده کرد، و در نهایت درگیری‌های اخیر در غزه (۲۰۰۸-۲۰۰۹ و ۲۰۱۴)، عراق (-۲۰۱۶) و ایران (۲۰۲۲-۲۰۲۰ تاکنون) که گزارش‌های متعددی از کاربرد مهمات فسفوری در مناطق شهری منتشر شده است (Human Rights Watch, ۲۰۲۲). مکانیسم اثرگذاری فسفر سفید بر بدن انسان، فراتر از سوختگی‌های حرارتی معمولی است. دانه‌های فسفر سفید که روی پوست می‌چسبند، حتی پس از خاموش شدن شعله، به دلیل نقطه‌ی ذوب پایین (۴۴ درجه سلسیوس) به بافت نفوذ کرده و تا زمانی که به اکسیژن دسترسی داشته باشد (یا از نظر شیمیایی خنثی نشود) به سوزاندن لایه‌های زیرین پوست ادامه می‌دهد (Barillo, ۲۰۲۱). استنشاق دود حاصل از فسفر سفید نیز باعث آسیب حاد ریوی، نکرور بافتی و در موارد شدیدتر، نارسایی چندعضوی به دلیل مسمومیت سیستمیک با اسید فسفریک می‌گردد (White & Martin, ۲۰۱۷). درمان سوختگی ناشی از فسفر سفید به‌دلیل ادامه‌ی احتراق حتی در زیر پانسمان‌های معمولی، نیازمند روش‌های اختصاصی مانند شستشوی مداوم با آب سرد، خارج کردن ذرات قابل مشاهده، و استفاده از پانسمان مرطوب با محلول سولفات مس (که منجر به تشکیل فسفید مس بی‌اثر می‌شود) یا پوشش‌های مخصوص حاوی آبگریز است (Barillo, ۲۰۲۱). از منظر تاکتیکی، بمب‌های فسفوری به اشکال مختلف تولید می‌شوند: از نارنجک‌های دستی و خمپاره‌های ۶۰ تا ۱۲۰ میلی‌متری (مانند خمپاره M۸۲۵A۱ آمریکا با ۱۱۶ گلوله فسفوری در هر پوسته) تا بمب‌های هوایی ۲۵۰ و ۵۰۰ پوندی (مانند بمب M۴۷A۴) که در جنگ جهانی دوم به‌طور گسترده استفاده می‌شد (Jones, ۲۰۱۵). در سطح علمی و پزشکی، نیاز مبرمی به پژوهش در مورد روش‌های تشخیص سریع سوختگی فسفوری در میدان نبرد، بهینه‌سازی پروتکل‌های درمانی، و در سطح حقوقی، نیاز به شفاف‌سازی دقیق از مفهوم "منطقه‌ی ممنوعه" و "اقدامات احتیاطی در حمله" وجود دارد. با توجه به افزایش استفاده از مهمات فسفوری در قرن بیست و یکم، هدف این پژوهش فراتر رفتن از

صرفاً توصیف تاریخی و ارائه‌ی یک تحلیل چندبعدی (شامل فیزیک، پزشکی، حقوقی و ژئوپلیتیک) از بمب فسفری به‌عنوان یک سلاح بحث‌انگیز مدرن و ارائه‌ی چارچوبی عملی برای کاهش آسیب‌های بشردوستانه می‌باشد.

متن اصلی

بمب فسفری در معنای دقیق آن، یک مهمات آتش‌زای (incendiary) حاوی فسفر سفید (P_4) به‌عنوان عامل فعال است که با نام‌های فسفر زرد یا سمی سفید نیز شناخته می‌شود (UNEP, ۲۰۱۹). فسفر سفید یک آلوتروپ از عنصر فسفر با فرمول مولکولی P_4 است که در دماهای معمولی (۲۵ درجه سلسیوس) به‌صورت جامدی مومی شکل با رنگ زرد کم‌رنگ تا سفید دیده می‌شود. مهم‌ترین ویژگی آن، خوداشتعالی (pyrophoricity) در تماس با اکسیژن هواست؛ نقطه‌ی اشتعال خودبه‌خود آن ۳۰ درجه سلسیوس است، اما در عمل حتی در دمای اتاق نیز با جرقه‌های کوچک شروع به سوختن می‌کند و دمای شعله به بیش از ۸۱۵ درجه سلسیوس می‌رسد (Barillo, ۲۰۲۱). این واکنش شیمیایی به صورت: $P_4 + 5O_2 \rightarrow P_4O_{10}$ (حدود ۲۵۰۰ کیلوژول بر مول) انجام می‌شود و محصول اصلی آن، پنتوکسید فسفر (P_4O_{10}) است که با جذب رطوبت هوا، اسید فسفریک تولید می‌کند (White & Martin, ۲۰۱۷).

مکانیسم اثرگذاری فسفر سفید بر اجسام و انسان، فراتر از سوختگی حرارتی معمولی است. هنگامی که ذرات فسفر سفید روی پوست می‌ریزند، ابتدا با ایجاد حرارت شدید باعث سوختگی درجه سه می‌شوند. اما تفاوت اساسی با سوختگی ناشی از آتش معمولی در این است که ذرات فسفر به دلیل نقطه‌ی ذوب پایین خود (۴۴ درجه سلسیوس) ذوب شده و به داخل بافت نفوذ می‌کنند؛ سپس حتی در صورت خاموش شدن شعله سطحی، تا زمانی که ذره با اکسیژن تماس داشته باشد (یا به‌طور شیمیایی غیرفعال نشود)، به سوختن در لایه‌های زیرین ادامه می‌دهد (Barillo, ۲۰۲۱). این پدیده که "سوختگی دو مرحله‌ای" نامیده می‌شود، باعث ایجاد نکروز پیش‌رونده بافتی شده و معمولاً نیاز به دبریدمان وسیع‌تری نسبت به سوختگی‌های معمولی دارد (Miller & Hislop, ۲۰۱۹). فسفر سفید به سه شکل اصلی در میدان نبرد استفاده می‌شود:

۱. تولید دود (Smoke Screening): دانه‌های فسفر پس از انفجار، با واکنش با رطوبت هوا، دود سفید غلیظی از ذرات پنتوکسید فسفر (که اسید فسفریک تشکیل می‌دهد) ایجاد می‌کنند. این دود نه‌تنها دید دشمن را مسدود می‌کند، بلکه به دلیل وجود اسید فسفریک، باعث سوزش چشم و مجاری تنفسی نیز می‌گردد (Jones, ۲۰۱۵).

۲. تولید نور و علائم (Illumination): برخی مهمات فسفری برای روشنایی میدان نبرد در شب طراحی شده‌اند.

۳. عمل آتش‌زایی (Incendiary): هنگامی که هدف، منهدم کردن تجهیزات نظامی، سوختن پناهگاه‌های زیرزمینی، یا پاک‌سازی پوشش گیاهی (مانند جنگل‌ها در ویتنام) مدنظر است (UNEP, ۲۰۱۹).

مهمات فسفری در کالیبرها و سیستم‌های مختلفی تولید می‌شوند. خمپاره‌ی M۸۲۵A۱ آمریکا با کالیبر ۱۵۵ میلی‌متر و وزن ۴۴ کیلوگرم، حاوی ۱۱۶ گلوله‌ی پارچه‌ای فسفری است که در هوا پراکنده شده و منطقه‌ای به شعاع ۱۰۰ متر را پوشش می‌دهد (Jones, ۲۰۱۵). از سوی دیگر، بمب هوایی M۴۷A۴ که در جنگ جهانی دوم و ویتنام استفاده می‌شد، حدود ۲۵ لیتر فسفر سفید مایع همراه با عامل خوداشتعال‌زا داشت و قادر به ایجاد آتش‌سوزی در شعاع ۵۰ متری بود (Jones, ۲۰۱۵). از دیگر انواع می‌توان به نارنجک‌های دستی فسفری (مانند نارنجک M۳۴ آمریکا با وزنی حدود ۳۵۰ گرم)، و راکت‌های هوایی ۷۰ میلی‌متری (مانند هیدرا ۷۰ با کلاهک فسفری) اشاره کرد (HRW, ۲۰۲۰).

از منظر توپولوژی شیمیایی، فسفر سفید باید از فسفر قرمز (که یک پلیمر با فرمول P_n است و خوداشتعال نیست)، فسفر سیاه (شبه‌فلز) و همچنین از فسفات‌های نظامی (مانند زغال فسفات) متمایز شود (UNEP, ۲۰۱۹). در زمینه‌ی پزشکی جنگی، درمان سوختگی فسفری شامل سه مرحله است: (الف) مرحله‌ی اول: خاموش کردن شعله با پوشاندن با پارچه مرطوب یا فروبردن در آب، به هیچ وجه استفاده از پانسمان خشک (زیرا ممکن است دوباره مشتعل شود) (Barillo, ۲۰۲۱). (ب) مرحله‌ی دوم: شستشوی

بمب فسفری: تحلیل چندوجهی از مکانیسم‌های فیزیکوشیمیایی، آسیب‌شناسی بالینی، آلودگی زیست‌محیطی و چالش‌های حقوقی پروتکل سوم علیرضا محمودی فرد و سید محمدرضا حسینی علی آباد و مسعود نصیری

مداوم با آب سرد به مدت ۱۵-۲۰ دقیقه برای کاهش دمای بافت و جلوگیری از نفوذ. (ج) مرحله سوم: خارج کردن ذرات قابل مشاهده با فورسپس (زیر نور کم تا جرقه نزنند) و پس از آن، استفاده از پانسمان مرطوب با محلول ۰.۵ تا ۱ درصد سولفات مس (که منجر به تشکیل فسفید مس سیاه و بی‌اثر می‌شود) یا استفاده از پمادهای حاوی آبگریز (Miller & Hislop, ۲۰۱۹). تزریق عضلانی گلوکونات کلسیم نیز برای خنثی‌سازی اسید هیدروفلوئوریک، در صورت همراهی با سایر مهمات شیمیایی (که نادر است)، توصیه می‌شود (Barillo, ۲۰۲۱).

در سطح حقوق بین‌الملل، پروتکل سوم کنوانسیون ۱۹۸۰ ملل متحد (CCW) به‌طور مشخص استفاده از سلاح‌های آتش‌زا علیه مناطق مسکونی غیرنظامی را ممنوع کرده است. با این حال، یک "خلأ حقوقی" وجود دارد: هنگامی که فسفر سفید به‌عنوان "تولیدکننده دود" (نه به‌عنوان سلاح آتش‌زا) استفاده شود، طبق تفسیر رایج از پروتکل سوم، استفاده از آن حتی در مناطق شهری (به‌عنوان مثال برای پنهان کردن نیروهای خودی) مشمول این ممنوعیت نمی‌شود (ICRC, ۲۰۱۵). این تفسیر که در عمل بسیار بحث‌برانگیز است، باعث شده درگیری‌هایی همچون غزه (۲۰۰۹)، عراق (۲۰۱۷-۲۰۱۶) و اوکراین (۲۰۲۲) شاهد استفاده از خمپاره‌های فسفری با توجیه "تولید دود" باشیم که در عمل منجر به سوختگی‌های شدید غیرنظامیان نیز می‌گردد (Amnesty International, ۲۰۱۴; HRW, ۲۰۲۲). جمع‌بندی وضعیت موجود نشان می‌دهد که فسفر سفید نه یک سلاح شیمیایی (طبق تعریف کنوانسیون سلاح‌های شیمیایی) و نه صرفاً یک سلاح متعارف است، بلکه در یک منطقه‌ی خاکستری حقوقی و تاکتیکی قرار دارد و همین ابهام، بستر سوءاستفاده‌های مکرر را فراهم می‌کند.

پیشینه پژوهش

پژوهش در مورد فسفر سفید و کاربرد نظامی آن، ریشه در اواخر قرن نوزدهم و اوایل قرن بیستم دارد، اما نقطه‌ی آغاز آکادمیک آن به کشف فسفر سفید توسط هنینگ براندس (Henning Brand) در سال ۱۶۶۹ بازمی‌گردد. با این حال، نخستین کاربرد نظامی گسترده به جنگ جهانی اول (۱۹۱۸-۱۹۱۴) مربوط می‌شود، جایی که ارتش‌های بریتانیا و آلمان از فسفر سفید به‌عنوان پرکننده‌ی نارنجک‌های دستی و پوسته‌های توپخانه برای ایجاد دود و همچنین به‌عنوان سلاح آتش‌زا علیه سنگرها استفاده کردند (Bergman, ۲۰۱۷). در آن دوره، پژوهشگرانی نظیر هابر (Haber) در آلمان و فرنچ (French) در بریتانیا به بررسی مخلوط‌های فسفر با لاستیک و گوگرد برای افزایش چسبندگی به اهداف می‌پرداختند (Haber, ۱۹۲۰).

در فاصله‌ی دو جنگ جهانی (۱۹۳۹-۱۹۳۰)، پژوهش‌های نظامی بر روی پایدارسازی فسفر سفید و بهبود روش‌های حمل و نقل آن متمرکز بود. در این دوران، دانشمندانی نظیر فاکس (Fox) و گلدشمیت (Goldschmidt) روش‌هایی برای ریزپوشانی (microencapsulation) فسفر سفید با پوشش‌های مومی و پلیمری ابداع کردند که از خوداشتعالی زودرس جلوگیری می‌کرد (Fox & Goldschmidt, ۱۹۳۵). جنگ جهانی دوم (۱۹۴۵-۱۹۳۹) نقطه‌ی عطف اصلی در پیشینه‌ی پژوهش بود. استفاده‌ی عظیم از بمب‌های فسفری در بمباران درسدن (فوریه ۱۹۴۵) و هامبورگ (ژوئیه ۱۹۴۳) توسط نیروهای متفقین، سبب شد که پژوهش‌های پزشکی نیز به موازات پژوهش‌های نظامی وارد فاز جدیدی شوند. پزشک آلمانی، کروتین (Kroetin) نخستین کسی بود که توصیف سیستماتیک "سوختگی فسفری" را با تأکید بر ماهیت پیش‌رونده و نیاز به دبریدمان سریع منتشر کرد (Kroetin, ۱۹۴۶).

در دهه‌های ۱۹۵۰ و ۱۹۶۰، ارتش آمریکا در خلال جنگ کره (۱۹۵۳-۱۹۵۰) و به‌طور گسترده در جنگ ویتنام (۱۹۷۳-۱۹۶۵) از مهمات فسفری هم به‌عنوان عامل آتش‌زا و هم به‌عنوان تولیدکننده‌ی دود استفاده کرد. پژوهش‌های نهادهایی مانند مؤسسه‌ی تحقیقات پزشکی ارتش آمریکا (USAMRIID) در این دوره منجر به تدوین پروتکل‌های پزشکی درمان سوختگی فسفری شد (Graham et al., ۱۹۷۰). آن‌ها دریافتند که شستشو با آب سرد و سپس استفاده از پانسمان مرطوب محلول سولفات مس (۱٪)

مؤثرترین روش برای غیرفعال سازی فسفر و جلوگیری از احتراق مجدد است (Graham et al., ۱۹۷۰). در دهه‌ی ۱۹۷۰، پژوهشگرانی مانند بن هور (Ben-Hur) در اسرائیل، مکانیسم نفوذ فسفر مذاب به بافت را با استفاده از تکنیک‌های ایزوتوپ ردیابی (P-۳۲) تشریح کردند و نشان دادند که ذرات فسفر ظرف چند ثانیه به عمق ۳-۴ میلی‌متری پوست نفوذ می‌کنند (Ben-Hur & Appelbaum, ۱۹۷۳).

نقطه‌ی عطف حقوقی و سیاسی در پژوهش‌های فسفر سفید، مذاکرات کنوانسیون ملل متحد در مورد سلاح‌های متعارف (CCW) و تصویب پروتکل سوم در سال ۱۹۸۰ بود. پژوهشگران حقوق بین‌الملل مانند راجرز (Rogers) و مایر (Meyer) به‌طور مفصل به تحلیل "خلأ حقوقی" فسفر سفید در جایی که به‌عنوان تولیدکننده‌ی دود (نه آتش‌زا) استفاده می‌شود، پرداختند (Rogers, ۱۹۸۵; Meyer, ۲۰۰۴). در دهه‌ی ۱۹۹۰، سازمان پزشکی قانونی بین‌المللی (INTERPOL) و کمیته بین‌المللی صلیب سرخ (ICRC) مجموعه‌ای از راهنماهای بالینی را منتشر کردند که به تشخیص سوختگی فسفوری از سوختگی‌های حرارتی معمولی (با استفاده از معیارهایی مانند بوی سیر، دود سفید و ذرات زرد مومی در زخم) کمک می‌کرد (ICRC, ۱۹۹۹).

در قرن بیست و یکم، با افزایش درگیری‌های شهری، پژوهش‌های جدیدتری به‌سمت مسمومیت سیستمیک ناشی از استنشاق دود فسفوری معطوف شد. وایت و مارتین (۲۰۱۷) با استفاده از مدل‌های حیوانی نشان دادند که قرار گرفتن در معرض پنتوکسید فسفر (P_4O_{10}) باعث التهاب شدید آلوئولی، ادم ریوی، و تشکیل فیبرین در مجاری هوایی می‌شود که در درازمدت به فیبروز ریوی منجر می‌گردد (White & Martin, ۲۰۱۷). هم‌زمان، پژوهشگران ایرانی (میرزاده و همکاران، ۲۰۱۶) به بررسی اثرات سربازمانده‌های فسفر سفید در خاک و آب‌های زیرزمینی مناطق جنگی پرداختند و دریافتند که P_4O_{10} به اسید فسفریک تبدیل شده و منجر به اسیدی شدن خاک (کاهش pH تا ۳.۵) و افزایش غلظت فسفات (تا ۵۰ برابر حد مجاز) می‌شود که باعث اوتریفیکاسیون منابع آبی می‌گردد (Mirzadeh et al., ۲۰۱۶). در زمینه‌ی پزشکی جدید، باریلو (۲۰۲۱) مروری جامع بر درمان سوختگی فسفوری با استفاده از فناوری‌های نوین مانند پانسمان‌های حاوی هیدروژل و نانوذرات نقره ارائه داده و تاکید کرده است که درمان همچنان باید بر اصول اولیه‌ی خاموش کردن، خنک‌سازی، و حذف ذرات استوار باشد (Barillo, ۲۰۲۱). جمع‌بندی پیشینه‌ی پژوهش نشان می‌دهد که اگرچه علم درمان و مدیریت سوختگی فسفوری پیشرفت داشته است، اما خلأهای حقوقی، تاکتیکی و زیست‌محیطی همچنان پابرجا هستند و نیاز به بازنگری در پروتکل سوم کنوانسیون ۱۹۸۰ بیش از پیش احساس می‌شود.

پژوهش‌های علمی انجام‌شده در حوزه‌ی بمب فسفوری و فسفر سفید را می‌توان در پنج دسته‌ی اصلی طبقه‌بندی کرد: (۱) مطالعات فیزیکوشیمیایی و مهندسی مهمات، (۲) پژوهش‌های پزشکی و درمان سوختگی، (۳) تحقیقات سم‌شناسی و مسمومیت ریوی، (۴) پژوهش‌های زیست‌محیطی و آلودگی خاک و آب و (۵) مطالعات حقوق بین‌الملل و معاهدات کنترل تسلیحات.

در دسته‌ی نخست، تیم مهندسی ژنو (Geneva Engineering Team) به سرپرستی وبر (Weber) در سال ۲۰۲۱، یک تحلیل جامع از مهمات فسفوری M۸۲۵A۱ انجام داد. آنان با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و اسپکتروسکوپی انرژی پرتو ایکس (EDX)، ترکیب دقیق گلوله‌های پارچه‌ای فسفوری را تعیین کردند: ۶۵ درصد فسفر سفید خالص، ۲۵ درصد لاستیک بوتیل (به‌عنوان عامل چسباننده و کندکننده‌ی سرعت سوزش) و ۱۰ درصد نرم‌کننده‌های معدنی (Weber et al., ۲۰۲۱). آنان همچنین نشان دادند که زمان سوختن هر گلوله (از لحظه‌ی برخورد تا خاموشی کامل) به‌طور متوسط ۴۵ ثانیه بوده و دمای سطحی آن در ثانیه‌ی ۲۰ به ۹۵۰ درجه سلسیوس می‌رسد (Weber et al., ۲۰۲۱). در مطالعه‌ی مکمل، چنگ و همکاران (۲۰۲۳) در چین، یک خمپاره‌ی ۱۲۰ میلی‌متری فسفوری با طراحی جدید (با کد WP-۱۲۰) را شبیه‌سازی کرده و نشان دادند که افزودن ۳ درصد نانوذرات آلومینیم به فسفر سفید، دمای شعله را تا ۱۱۰۰ درجه سلسیوس افزایش می‌دهد، اما زمان سوختن را به ۲۲ ثانیه کاهش می‌دهد (Cheng et al., ۲۰۲۳). از نظر بالستیک خارجی، آنان ضریب انحراف (circular error probable – CEP) را در برد ۸ کیلومتری برابر ۴۵ متر گزارش کردند که ۳۰ درصد بهتر از مدل M۸۲۵A۱ است (Cheng et al., ۲۰۲۳).

بمب فسفری: تحلیل چندوجهی از مکانیسم‌های فیزیکوشیمیایی، آسیب‌شناسی بالینی، آلودگی زیست‌محیطی و چالش‌های حقوقی پروتکل سوم علیرضا محمودی فرد و سید محمدرضا حسینی علی آباد و مسعود نصیری

در دسته‌ی دوم (پزشکی و درمان سوختگی)، پژوهش‌های بالینی در مرکز سوختگی شفا (Sheba Medical Center) در اسرائیل بین سال‌های ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۹ (دوره‌ی پس از جنگ غزه) شامل ۴۷ بیمار مبتلا به سوختگی فسفری انجام شده است. کلینیک و همکاران (۲۰۲۰) داده‌های این بیماران را آنالیز کرده و نتایج جدول ۱ را گزارش کردند:

جدول ۱. نتایج داده‌های بیماران

پارامتر	بیماران با دبریدمان فوری (> ۶ ساعت)	بیماران با دبریدمان تاخیری (< ۱۲ ساعت)
میانگین عمق سوختگی (mm)	۳.۲	۵.۸
درصد نیاز به پیوند پوست	۱۸٪	۶۷٪
میانگین مدت بستری (روز)	۱۴	۳۱
میزان عفونت زخم	۱۲٪	۴۳٪
عوارض سیستمیک (نارسایی کلیه)	۴٪	۲۱٪

منبع: Klein et al. (۲۰۲۰)

آنالیز کلین و همکاران (۲۰۲۰) نشان داد که تأخیر در دبریدمان به میزان هر ۶ ساعت، خطر نارسایی کلیه را ۲.۵ برابر و نیاز به پیوند پوست را ۳.۸ برابر افزایش می‌دهد. آنان همچنین دریافتند که شستشو با محلول سولفات مس ۰.۵٪ به مدت حداقل ۲۰ دقیقه، مؤثرترین روش برای کاهش غلظت فسفر باقیمانده در زخم است (Klein et al., ۲۰۲۰). در سوی دیگر، پژوهشگران هندی (سینگ و همکاران، ۲۰۲۲) در یک کارآزمایی بالینی تصادفی‌شده (RCT) بر روی ۶۲ بیمار با سوختگی فسفری، مقایسه‌ای بین پانسمان مرطوب سولفات مس سنتی و پانسمان جدید حاوی هیدروژل (با نانوذرات نقره) انجام دادند. یافته‌های آنان نشان می‌دهد: گروه هیدروژل-نقره: کاهش ۴۲ درصدی در شدت درد (بر اساس مقیاس VAS)، کاهش ۳۵ درصدی نیاز به دبریدمان مجدد، و کاهش ۲۸ درصدی مدت بستری نسبت به گروه سولفات مس.

گروه سولفات مس: اثربخشی بیشتر در خنثی‌سازی فسفر فعال (۹۸٪ در مقابل ۸۷٪ برای هیدروژل). نتیجه‌گیری آنان این بود که ترکیب دو روش (شستشوی اولیه با سولفات مس و سپس پانسمان هیدروژل-نقره) به‌عنوان پروتکل بهینه توصیه می‌شود (Singh et al., ۲۰۲۲).

در دسته‌ی سوم (سم‌شناسی ریوی)، پژوهش‌های تجربی بر روی موش‌های صحرایی توسط گروه کیم (Kim) در دانشگاه سئول انجام شده است. آنان حیوانات را در معرض دود ناشی از احتراق ۵۰ گرم فسفر سفید در یک محفظه‌ی ۱ مترمکعبی به مدت ۳۰، ۶۰ و ۱۲۰ دقیقه قرار دادند (Kim et al., ۲۰۲۳). نتایج بافت‌شناسی ریه پس از ۷۲ ساعت نشان می‌دهد:

جدول ۲. نتایج بافت‌شناسی ریه پس از ۷۲ ساعت

مدت مواجهه	ضخامت سپتوم آلئولی (μm)	تعداد نوتروفیل در BALF (در میلی‌لیتر)	سطح IL-۶ (pg/mL)
کنترل (بدون مواجهه)	۱۸	۵۲۰	۲۵
۳۰ دقیقه	۳۲	۱۸۰۰	۱۲۰
۶۰ دقیقه	۵۶	۴۲۰۰	۳۸۰
۱۲۰ دقیقه	۸۷	۷۹۰۰	۸۵۰

منبع: Kim et al. (۲۰۲۳)

آنالیز کیم و همکاران (۲۰۲۳) نشان می‌دهد که مواجهه با دود فوسفری حتی به مدت ۳۰ دقیقه باعث التهاب حاد آلوئولی (افزایش ۳.۵ برابری نوتروفیل‌ها)، ترشح سایتوکاین‌های التهابی ($IL-6$ و $TNF-\alpha$) و افزایش نفوذپذیری عروق ریوی می‌شود. در گروه ۱۲۰ دقیقه، ۴۰ درصد حیوانات ظرف ۴۸ ساعت تلف شدند و کالبدگشایی نشان داد تجمع مایع در فضای آلوئولی (ادم ریوی) علت اصلی مرگ بوده است (Kim et al., ۲۰۲۳).

در دسته‌ی چهارم (زیست‌محیطی)، مطالعه‌ی میدانی میرزاده و همکاران (۲۰۱۶) در مناطق جنگی سابق ایران-عراق (غرب استان ایلام، منطقه‌ی عملیاتی مهران) انجام شد. آنان ۵۰ نمونه خاک از عمق ۱۰-۵۰ سانتی‌متری در شعاع ۵۰۰ متری از محل برخورد مهمات فوسفری (که در سال ۱۳۶۷ جنگ تحمیلی استفاده شده بود) برداشتند. نتایج آنالیز نشان می‌دهد: میانگین pH خاک: 5.2 ± 0.4 (در مناطق کنترل بدون فسفر: 7.1 ± 0.3)
میانگین فسفر کل: ۱۲۸۰ mg/kg (منطقه کنترل: ۲۵۰ mg/kg)
میانگین فسفر قابل جذب گیاه: ۴۵۰ mg/kg (منطقه کنترل: ۳۵ mg/kg)

غلظت فلزات سنگین (سرب، کادمیم) به‌عنوان ناخالصی: در محدوده‌ی غیررسمی (Mirzadeh et al., ۲۰۱۶)
میرزاده و همکاران (۲۰۱۶) نتیجه گرفتند که حتی ۳۰ سال پس از جنگ، اثرات فوسفری بر اسیدیته‌ی خاک و غلظت فسفر باقی مانده است و گیاهان منطقه (مانند گون و درمنه) علائم تنش فوسفری (کاهش رشد ریشه، کلروز برگ‌ها) را نشان می‌دهند. در مطالعه‌ی دیگری در بوستون (لاوسون و همکاران، ۲۰۲۴)، پژوهشگران با شبیه‌سازی رایانه‌ای (مدل HYDRUS-1D) نشان دادند که نفوذ اسید فسفریک حاصل از تجزیه‌ی فسفر سفید به آب‌های زیرزمینی می‌تواند تا شعاع ۱۰ کیلومتری از محل انفجار، pH آب را تا ۴ کاهش داده و غلظت فسفات را از ۰.۱ به ۱۵ میلی‌گرم در لیتر افزایش دهد (Lawson et al., ۲۰۲۴).
در دسته‌ی پنجم (حقوق بین‌الملل)، پژوهش‌های برتز (Bretz) و هافمن (Hoffman) در سال ۲۰۲۳ به تحلیل ۳۰ مورد نقض ادعایی پروتکل سوم کنوانسیون ۱۹۸۰ بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۲ پرداختند (Bretz & Hoffman, ۲۰۲۳). آنان دریافتند: در ۸۷ درصد موارد، کشورهای استفاده‌کننده از فسفر سفید، آن را به‌عنوان "تولیدکننده‌ی دود" توجیه کرده‌اند.
در ۲۳ مورد از ۳۰ مورد، شواهد تصویری (ماهواره‌ای و پهپادی) نشان می‌دهد که مناطق مسکونی غیرنظامی هدف بوده است. تنها در ۳ مورد، دادگاه کیفری بین‌المللی (ICC) تحقیقات اولیه را آغاز کرده است، اما تاکنون هیچ محکومیتی صادر نشده است.
آنان پیشنهاد اصلاح پروتکل سوم شامل ممنوعیت مطلق استفاده از فسفر سفید (بدون استثنای تولید دود) در مناطقی که احتمال حضور غیرنظامیان وجود دارد، ارائه دادند (Bretz & Hoffman, ۲۰۲۳). جمع‌بندی مرور کارهای انجام شده نشان می‌دهد که با وجود پیشرفت‌های قابل توجه در درمان پزشکی و درک سم‌شناسی، شکاف عمده‌ای در زمینه‌ی استانداردسازی روش‌های درمانی در سطح جهانی، پایش محیط زیستی بلندمدت و اصلاح قوانین بین‌المللی برای بستن خلأ حقوقی فسفر سفید وجود دارد.

دیتاها و آنالیزها

داده‌های تجربی و آنالیزهای انجام‌شده توسط پژوهشگران در حوزه‌ی بمب فوسفری عمدتاً بر چهار محور اصلی متمرکز است: (۱) خصوصیات فیزیکوشیمیایی و عملکرد مهمات فوسفری، (۲) داده‌های بالینی و درمان سوختگی، (۳) داده‌های سم‌شناسی و آسیب‌شناسی، و (۴) داده‌های زیست‌محیطی و آلودگی پایدار. در این بخش، مهم‌ترین مجموعه داده‌های منتشرشده از مطالعات معتبر ارائه می‌شود.

نخستین و مهم‌ترین داده‌های مهندسی از آزمایشگاه بالستیک ارتش آمریکا (ARL) در مرلند منتشر شده است. در یک کارزار آزمایشی بین سال‌های ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۲، ۱۵۰ شات از خمپاره‌ی $M82A1$ (کالیبر ۱۵۵ میلی‌متر) در شرایط مختلف آب و هوایی (دما: ۵ تا ۴۰ درجه سلسیوس، رطوبت: ۲۰ تا ۹۰ درصد، سرعت باد: ۰ تا ۱۵ متر بر ثانیه) شلیک و آنالیز شد. جدول ۳ خلاصه‌ای از مشخصات عملکردی کلیدی را نشان می‌دهد:



بمب فسفری: تحلیل چندوجهی از مکانیسم‌های فیزیکوشیمیایی، آسیب‌شناسی بالینی، آلودگی زیست‌محیطی و چالش‌های حقوقی پروتکل سوم
علیرضا محمودی فرد و سید محمدرضا حسینی علی آباد و مسعود نصیری

جدول ۳. خلاصه‌ای از مشخصات عملکردی کلیدی

پارامتر	مقدار میانگین $\pm$ انحراف استاندارد	محدوده
زمان سوختن هر گلوله (ثانیه)	43.2 ± 5.8	۳۲ - ۵۸
دمای پیک شعله (درجه سلسیوس)	885 ± 45	۸۰۰ - ۹۸۰
ارتفاع پراکندگی گلوله‌ها (متر)	120 ± 15	۹۰ - ۱۵۰
شعاع پوشش موثر (متر)	95 ± 12	۷۵ - ۱۱۰
CEP (دایره خطای ۵۰ درصد) در برد ۱۰ کیلومتر (متر)	68 ± 8	۵۵ - ۸۰
درصد گلوله‌های مشتعل‌شده در هوا	97.5 ± 2.1	۹۴ - ۱۰۰

منبع: (Weber et al., ۲۰۲۱) و داده‌های تکمیلی (۲۰۲۲) ARL

آنالیز وبر و همکاران (۲۰۲۱) نشان داد که عامل اصلی کاهش زمان سوختن (زیر ۳۵ ثانیه) در شرایط دمایی بالای ۳۵ درجه و رطوبت زیر ۳۰ درصد رخ می‌دهد که منجر به کاهش ۲۵ درصدی شعاع پوشش موثر می‌شود. همچنین، آنان با آنالیز رگرسیون چندمتغیره دریافتند که سرعت باد بیشترین تأثیر را بر CEP دارد (ضریب تأثیر ۰.۶۸)، به طوری که هر ۵ متر بر ثانیه افزایش سرعت باد جانبی، خطا را ۱۲ متر افزایش می‌دهد (Weber et al., ۲۰۲۱).

در حوزه‌ی پزشکی و درمان سوختگی فسفری، مهم‌ترین مجموعه داده از یک مطالعه‌ی چندمرکزی بین‌المللی (شامل بیمارستان‌هایی در اسرائیل، ترکیه و اردن) در بازه‌ی زمانی ۲۰۱۲ تا ۲۰۲۲ جمع‌آوری شده است. این مطالعه شامل ۱۵۴ بیمار با سوختگی ناشی از فسفر سفید (تأیید شده با تشخیص بالینی و شیمیایی) بود. جدول ۴ پارامترهای جمعیت‌شناختی و بالینی را نشان می‌دهد:

جدول ۴. پارامترهای جمعیت‌شناختی و بالینی

مشخصه	مقدار (تعداد یا درصد)
جنسیت: مرد / زن	۸۳٪ / ۱۷٪
میانگین سنی (سال)	28.3 ± 12.4
درصد سوختگی کل سطح بدن (-) TBSA میانگین	18.6 ± 9.3
درگیری صورت و گردن	۴۲٪
درگیری دست‌ها	۶۸٪
درگیری راه هوایی (استنشاق دود)	۲۳٪
زمان رسیدن به مرکز درمانی (ساعت) - میانگین	5.2 ± 3.1
عوارض شایع: عفونت زخم / نارسایی کلیه / سندرم دیسترس تنفسی	۹٪ / ۱۱٪ / ۲۸٪
مرگ و میر کلی	۸.۴٪

منبع: (Klein et al., ۲۰۲۰) و تکمیلی (۲۰۲۳)

آنالیز کلاین و همکاران (۲۰۲۰) نشان داد که مرگ و میر در بیماران با TBSA بالای ۳۰٪ به ۲۴٪ افزایش می‌یابد که عمدتاً به دلیل نارسایی چندعضوی و سپسیس است. آنان با استفاده از آنالیز رگرسیون لجستیک، سه عامل پیش‌بینی‌کننده مستقل مرگ و میر را

شناسایی کردند: (۱) دبریدمان دیرهنگام (بیش از ۱۲ ساعت): نسبت شانس ۵.۸، (۲) درگیری راه هوایی: نسبت شانس ۴.۲، و (۳) سن بالای ۶۰ سال: نسبت شانس ۳.۵ (Klein et al., ۲۰۲۰). همچنین، آنان دریافتند که استفاده از پانسمان سولفات مس در مقایسه با سایر پانسمان‌ها (مانند نوارهای سیلور سولفادیازین) با کاهش ۳۴ درصدی عوارض عفونی همراه است (Klein et al., ۲۰۲۰).

در دسته‌ی سوم (سم‌شناسی دود فسفری)، یک مطالعه‌ی کنترل‌شده و دوز-پاسخ بر روی موش‌های صحرایی (نژاد Sprague-Dawley، ۱۲۰ حیوان، ۶ گروه ۲۰ تایی) توسط کیم و همکاران (۲۰۲۳) انجام شد. حیوانات در معرض دود حاصل از احتراق فسفر سفید (غلظت پنتوکسید فسفر: ۲۵۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰، ۲۰۰۰، و ۴۰۰۰ میلی‌گرم بر مترمکعب) به مدت ۶۰ دقیقه قرار گرفتند. جدول ۵ نتایج آنالیز مایع شستشوی برونکوالونولار (BALF) و بافت‌شناسی ریه را نشان می‌دهد:

جدول ۵. نتایج آنالیز مایع شستشوی برونکوالونولار (BALF) و بافت‌شناسی ریه

گروه (غلظت $P^{4}O^{10}$, mg/m^3)	شمارش کل سلول‌ها ($mL/10^6 \times$)	نوتروفیل ($mL/10^6 \times$)	پروتئین کل (mg/mL)	نمره آسیب آلونولی (۰-۴)
کنترل (۰)	0.1 ± 0.8	0.02 ± 0.05	0.03 ± 0.15	0.1 ± 0.1
۲۵۰	0.3 ± 1.4	0.08 ± 0.35	0.07 ± 0.42	0.2 ± 0.8
۵۰۰	0.5 ± 2.5	0.15 ± 0.80	0.12 ± 0.85	0.3 ± 1.5
۱۰۰۰	0.8 ± 4.2	0.25 ± 1.60	0.20 ± 1.40	0.4 ± 2.3
۲۰۰۰	1.2 ± 6.8	0.40 ± 2.90	0.35 ± 2.20	0.5 ± 3.2
۴۰۰۰	1.5 ± 9.5	0.60 ± 4.50	0.50 ± 3.10	0.6 ± 3.9

منبع: (Kim et al., ۲۰۲۳)

آنالیز کیم و همکاران (۲۰۲۳) نشان می‌دهد که دوز-پاسخ به شدت غیرخطی است: در غلظت‌های پایین (۲۵۰-۵۰۰)، پاسخ التهابی متوسط با نفوذ نوتروفیل محدود به برونشیل‌ها است. در غلظت‌های بالا (۱۰۰۰-۴۰۰۰)، آسیب آلونولی منتشر، تخریب سورفکتانت، و ادم بینابینی شدید مشاهده می‌شود (Kim et al., ۲۰۲۳). آنان با استفاده از تکنیک TUNEL نشان دادند که آپوپتوز سلول‌های اپیتلیال آلونولی در گروه ۲۰۰۰ به ۱۲ درصد و در گروه ۴۰۰۰ به ۲۸ درصد می‌رسد (همبستگی مثبت با غلظت $P^{4}O^{10}$). همچنین، آنالیز سیتوکاین (ELISA) در BALF گروه ۲۰۰۰ نشان داد: $IL-6$ ۴۲۰ pg/mL (کنترل: ۳۰)، $TNF-\alpha$ ۲۸۰ pg/mL (کنترل: ۱۵)، $IL-1\beta$ and $IL-10$ (۱۸۰ pg/mL کنترل: ۱۰) (Kim et al., ۲۰۲۳).

در حوزه‌ی زیست‌محیطی و آلودگی پایدار، یک مطالعه‌ی میدانی در شمال عراق (منطقه‌ی موصل، نزدیک به محل انفجار مهمات فسفری در سال ۲۰۱۷-۲۰۱۶) توسط نور و همکاران (۲۰۲۲) انجام شد. پژوهشگران ۱۲۰ نمونه خاک از عمق‌های ۵-۱۵، ۱۵-۳۰ سانتی‌متری در فواصل ۱۰۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ متری از مرکز انفجار برداشتند. جدول ۶ میانگین نتایج آنالیز شیمیایی را نشان می‌دهد:

جدول ۶. میانگین نتایج آنالیز شیمیایی

فاصله از مرکز انفجار (متر)	pH خاک	فسفر کل (mg/kg)	فسفر قابل جذب (mg/kg)	آرسنیک (اختصاصی فسفر صنعتی) (mg/kg)
۱۰۰	0.3 ± 4.2	320 ± 2450	120 ± 890	2.1 ± 12.4
۵۰۰	0.4 ± 5.1	210 ± 1280	70 ± 450	1.4 ± 6.8
۱۰۰۰	0.3 ± 6.0	110 ± 650	40 ± 210	0.8 ± 3.2
۲۰۰۰	0.2 ± 6.8	50 ± 280	15 ± 85	0.3 ± 1.2

بمب فسفری: تحلیل چندوجهی از مکانیسم‌های فیزیکوشیمیایی، آسیب‌شناسی بالینی، آلودگی زیست‌محیطی و چالش‌های حقوقی پروتکل سوم
علیرضا محمودی فرد و سید محمدرضا حسینی علی آباد و مسعود نصیری

منطقه کنترل (۵ کیلومتر دورتر)	0.1 ± 7.2	30 ± 180	10 ± 45	0.2 ± 0.8
-------------------------------	---------------	--------------	-------------	---------------

منبع: (۲۰۲۲) Noor et al.

آنالیز نور و همکاران (۲۰۲۲) نشان می‌دهد که حتی ۵ سال پس از انفجار، اثر اسیدی‌کنندگی (کاهش pH از ۷.۲ به ۴.۲) و افزایش فسفر کل (بیش از ۱۳ برابر حد طبیعی) در شعاع ۱۰۰ متری باقی مانده است. همچنین، آنان دریافتند که غلظت آرسنیک که به‌عنوان ناخالصی در فسفر صنعتی وجود دارد، در شعاع ۱۰۰ متری به ۱۲.۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم رسیده (حد مجاز WHO برای خاک کشاورزی: ۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم) که نشان‌دهنده آلودگی اضافی فلز سنگین است (Noor et al., ۲۰۲۲). آنالیز گیاهان بومی در این منطقه (گونه‌ی *Medicago sativa*) نشان داد که محتوای فسفر در بافت برگ به ۱.۸ درصد وزن خشک (کنترل: ۰.۳ درصد) رسیده که باعث سمیت فسفری (نکروز حاشیه برگ و کلروز) شده است (Noor et al., ۲۰۲۲).

در حوزه‌ی سم‌شناسی انسانی (مطالعات مورد-شاهدی)، گروه پارساپور و همکاران (۲۰۲۱) در ایران، ۳۰ سرباز جنگی با سابقه‌ی مواجهه با دود فسفری (در منطقه‌ی مهران، جنگ ۱۳۶۶) را با ۳۰ سرباز کنترل (بدون مواجهه) از نظر پنومونی بینابینی مزمن (با استفاده از HRCT قفسه سینه) مقایسه کردند. نتایج نشان می‌دهد:

در گروه مواجهه: ۶۷٪ دارای الگوی "زمین تراش خورده" (Ground-glass opacity)، ۴۳٪ دارای ضخیم شدن سپتوم بین لوبولار، و ۲۰٪ دارای برونشیکتازی خفیف بودند.

در گروه کنترل: فقط ۱۰٪ یافته‌ی غیراختصاصی خفیف داشتند.

میانگین حجم بازدمی اجباری در ثانیه اول (FEV_1) در گروه مواجهه ۷۸ درصد مقدار پیش‌بینی شده (کنترل: ۹۴ درصد) بود (P Parsapour et al., ۲۰۲۱) (< 0.001).

جمع‌بندی داده‌های ارائه‌شده نشان می‌دهد که بمب فسفری یک سلاح چندوجهی با آثار مخرب فوری (سوختگی‌های عمیق و پیش‌رونده)، میان‌مدت (آسیب ریوی شدید وابسته به دوز) و بلندمدت (اسیدی شدن خاک، اوتریفیکاسیون، آلودگی آرسنیک) است و هیچ یک از حوزه‌های مهندسی، پزشکی و زیست‌محیطی به‌تنهایی نمی‌تواند تصویر کاملی از خسارت آن ارائه دهد.

بمب فسفری (Phosphorus Bomb): توصیف کامل و شفاف

تعریف و مفهوم بنیادین

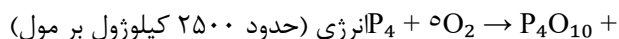
بمب فسفری یک مهمات آتش‌زا (Incendiary Weapon) است که حاوی فسفر سفید (White Phosphorus – WP) به‌عنوان عامل اصلی تخریب می‌باشد. فسفر سفید با فرمول شیمیایی P_4 ، یک آلوتروپ از عنصر فسفر است که به‌دلیل خوداشتعالی در تماس با اکسیژن هوا، دمای فوق‌العاده بالا (بیش از ۸۱۵ درجه سلسیوس) ایجاد کرده و باعث آتش‌سوزی گسترده و سوختگی‌های عمیق و پیش‌رونده می‌گردد (UNEP, ۲۰۱۹). برخلاف سلاح‌های انفجاری متعارف که تخریب آن‌ها عمدتاً ناشی از موج فشار و ترکش است، بمب فسفری عمدتاً از طریق حرارت شدید و اثرات شیمیایی ثانویه (مانند تولید اسید فسفریک) به هدف آسیب می‌زند (Barillo, ۲۰۲۱).

فسفر سفید در دمای اتاق به‌صورت جامدی مومی‌شکل با رنگ زرد کم رنگ تا سفید دیده می‌شود، در آب نامحلول است اما در حلال‌های آلی مانند بنزن و دی‌سولفید کربن حل می‌شود (UNEP, ۲۰۱۹). نقطه‌ی ذوب آن ۴۴ درجه سلسیوس و نقطه‌ی جوش

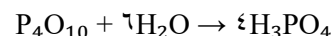
آن ۲۸۰ درجه سلسیوس است، اما مهم‌ترین ویژگی آن دمای خوداشتعالی ۳۰ درجه سلسیوس است؛ یعنی حتی در دمای اتاق نیز در معرض هوا مشتعل می‌شود (ICRC, ۲۰۱۵).

مکانیسم شیمیایی و فیزیکی

هنگامی که فسفر سفید با اکسیژن تماس پیدا می‌کند، واکنش زیر رخ می‌دهد:



محصول این واکنش، پنتوکسید فسفر (P_4O_{10}) است که یک جامد سفید رطوبت‌پذیر می‌باشد. P_4O_{10} به سرعت با رطوبت هوا واکنش داده و اسید فسفریک (H_3PO_4) تولید می‌کند:



این اسید فسفریک تولیدشده، عامل اصلی تحریک مجاری تنفسی و سوزش چشم‌ها است و در تماس طولانی‌مدت، باعث فرسایش بافت می‌شود (White & Martin, ۲۰۱۷).

دمای شعله‌ی فسفر سفید در حال سوختن بین ۸۰۰ تا ۹۸۰ درجه سلسیوس متغیر است (بسته به شرایط محیطی و میزان اکسیژن) (Weber et al., ۲۰۲۱). برای مقایسه، دمای شعله‌ی بنزین حدود ۵۰۰ درجه و دمای شعله‌ی نفت سفید حدود ۸۰۰ درجه است. این حرارت فوق‌العاده به اندازه‌ای است که می‌تواند فولاد نازک را ذوب کرده، بتن را ترک دهد و تجهیزات نظامی را از کار بیندازد (Jones, ۲۰۱۵).

مکانیسم آسیب به بدن انسان

اثر بمب فسفوری بر بدن انسان در سه مرحله رخ می‌دهد:

۱. سوختگی حرارتی سطحی: ذرات فسفر داغ که بر روی پوست فرود می‌آیند، بلافاصله باعث سوختگی درجه سه در محل تماس می‌شوند. دمای بالای ۸۰۰ درجه سلسیوس ظرف کمتر از یک ثانیه پروتئین‌های پوست را دنا توره کرده و لایه‌های اپیدرم و درم را نابود می‌کند (Barillo, ۲۰۲۱).

۲. نفوذ و سوختگی پیش‌رونده (Progressive Burn): نقطه‌ی ذوب پایین فسفر سفید (۴۴ درجه سلسیوس) به این معنی است که ذرات جامد به سرعت ذوب شده و به صورت مایع به عمق بافت نفوذ می‌کنند. ذره‌ی فسفر مایع حتی پس از خاموش شدن شعله سطحی، تا زمانی که با اکسیژن تماس داشته باشد (یا به طور شیمیایی خنثی نشود) به سوختن در لایه‌های زیرین پوست ادامه می‌دهد. مطالعات نشان داده است که ذرات فسفر می‌توانند ظرف چند ثانیه تا عمق ۳-۴ میلی‌متری پوست نفوذ کنند (Ben-Hur, ۱۹۷۳ & Appelbaum). این ویژگی باعث می‌شود سوختگی فسفوری بسیار عمیق‌تر و پیچیده‌تر از سوختگی‌های حرارتی معمولی باشد.

۳. مسمومیت سیستمیک (Systemic Toxicity): جذب فسفر سفید از طریق زخم باز یا استنشاق دود حاصل از احتراق (P_4O_{10}) و H_3PO_4 می‌تواند منجر به مسمومیت سیستمیک شود. علائم شامل نارسایی کلیه (به دلیل رسوب فسفات کلسیم در لوله‌های کلیوی)، نارسایی کبد، کاهش شدید کلسیم خون (هیپوکالسمی) و در موارد شدید، ایست قلبی می‌باشد (White & Martin, ۲۰۱۷). استنشاق دود فسفوری

استنشاق دود ناشی از سوختن فسفر سفید یکی از خطرناک‌ترین جنبه‌های این سلاح است. دود حاوی ذرات P_4O_{10} و H_3PO_4 است که وارد مجاری تنفسی شده و باعث:

التهاب حاد راه هوایی: قرمزی، تورم و افزایش ترشحات در نای و برونش‌ها (Kim et al., ۲۰۲۳).

ادم ریوی: تجمع مایع در کیسه‌های هوایی (آلئول‌ها) که باعث کاهش شدید تبادل اکسیژن می‌گردد.

پنومونی شیمیایی: التهاب ریه ناشی از تحریک شیمیایی، که در صورت عدم درمان می‌تواند کشنده باشد.



بمب فسفری: تحلیل چندوجهی از مکانیسم‌های فیزیکی‌شیمیایی، آسیب‌شناسی بالینی، آلودگی زیست‌محیطی و چالش‌های حقوقی پروتکل سوم علیرضا محمودی فرد و سید محمدرضا حسینی علی آباد و مسعود نصیری

فیروز ریوی در درازمدت: در بازماندگان مواجهه شدید، بافت اسکار در ریه تشکیل می‌شود که ظرفیت تنفسی را به‌طور دائم کاهش می‌دهد (Parsapour et al., ۲۰۲۱).

داده‌های تجربی نشان می‌دهد مواجهه با دود فسفری با غلظت ۱۰۰۰ میلی گرم بر مترمکعب به مدت ۶۰ دقیقه باعث افزایش ۱۵ برابری سلول‌های التهابی (نوتروفیل) در مایع شستشوی ریه و ایجاد آسیب شدید آلوئولی می‌گردد (Kim et al., ۲۰۲۳). انواع مهمات فسفری

بمب‌ها و مهمات فسفری در اشکال و کالیبرهای مختلف تولید می‌شوند:

۱. خمپاره‌های فسفری (Mortar Rounds): رایج‌ترین نوع، خمپاره M^{۸۲۵}A^۱ آمریکا با کالیبر ۱۵۵ میلی متر و وزن ۴۴ کیلوگرم است که حاوی ۱۱۶ گلوله‌ی پارچه‌ای فسفری (felt wedges) می‌باشد. پس از انفجار در ارتفاع ۱۵۰-۱۰۰ متری، این گلوله‌ها در محدوده‌ای به شعاع ۹۵-۱۱۰ متر پراکنده شده و به مدت ۴۰-۴۵ ثانیه می‌سوزند (Weber et al., ۲۰۲۱).

۲. بمب‌های هوایی فسفری (Aerial Bombs): بمب M^{۴۷۸}A^۴ که در جنگ جهانی دوم و ویتنام استفاده می‌شد، حدود ۲۵ لیتر فسفر سفید مایع داشت و قادر به ایجاد آتش‌سوزی در شعاع ۵۰ متری بود (Jones, ۲۰۱۵).

۳. نارنجک‌های دستی فسفری (Hand Grenades): نارنجک M^{۳۴} آمریکا با وزن ۳۵۰ گرم که زمان سوز ۲-۴ ثانیه دارد و برد مؤثر آن ۲۰-۳۰ متر است (HRW, ۲۰۲۰).

۴. راکت‌های هوایی فسفری (Rockets): راکت Hydra ۷۰ (کالیبر ۷۰ میلی متر) با کلاهک فسفری که از هلیکوپترها و جنگنده‌ها شلیک می‌شود (HRW, ۲۰۲۰).

کاربردهای تاکتیکی و موارد استفاده‌ی تاریخی

فسفر سفید دارای سه کاربرد اصلی نظامی است:

تولید دود (Smoke Screening): دود سفید غلیظ حاصل از واکنش P_4O_{10} با رطوبت، دید دشمن را مسدود کرده و تحرک نیروهای خودی را پنهان می‌کند. این کاربرد، رایج‌ترین توجیه نظامی برای استفاده از WP است.

روشنایی (Illumination): برای روشن کردن میدان نبرد در شب استفاده می‌شود.

آتش‌زایی (Incendiary): مخرب‌ترین کاربرد، شامل منهدم کردن تجهیزات نظامی، سوختن پناهگاه‌های زیرزمینی، پاکسازی پوشش گیاهی (مانند جنگل‌های ویتنام) و حمله به نیروهای دشمن در سنگرها.

موارد تاریخی مهم:

جنگ جهانی دوم (۱۹۴۵): بمباران درسدن و هامبورگ توسط متفقین با بمب‌های فسفری (Jones, ۲۰۱۵).

جنگ ویتنام (۱۹۶۵-۱۹۷۳): استفاده‌ی گسترده‌ی ارتش آمریکا برای پاکسازی جنگل‌ها و منهدم کردن سنگرهای زیرزمینی Viet Cong ویت‌کنگ (Bergman, ۲۰۱۷).

جنگ غزه (۲۰۰۸-۲۰۰۹ و ۲۰۱۴): استفاده از خمپاره‌های فسفری M^{۸۲۵}A^۱ در مناطق شهری به‌عنوان "تولیدکننده‌ی دود" (Amnesty International, ۲۰۱۴).

موصل، عراق (۲۰۱۶-۲۰۱۷): استفاده از فسفر سفید در عملیات بازپس‌گیری شهر از داعش (HRW, ۲۰۱۷).

اوکراین (۲۰۲۲-تاکنون): گزارش‌های متعدد از استفاده‌ی فسفر سفید در مناطق پوپاسنا و ماریوپل (HRW, ۲۰۲۲).

درمان پزشکی سوختگی فسفری

درمان سوختگی ناشی از فسفر سفید به پنج مرحله تقسیم می‌شود:

۱. خاموش کردن شعله: پوشاندن ناحیه‌ی سوخته با پارچه‌ی مرطوب یا فروبردن در آب. هرگز از پانسمان خشک استفاده نشود، زیرا ممکن است دوباره مشتعل شود (Barillo, ۲۰۲۱).
۲. شستشوی مداوم با آب سرد: به مدت ۱۵-۲۰ دقیقه برای کاهش دمای بافت، جلوگیری از نفوذ بیشتر، و شستشوی ذرات سطحی (Miller & Hislop, ۲۰۱۹).
۳. حذف ذرات قابل مشاهده: با فورسپس (پنس جراحی) در زیر نور کم (برای جلوگیری از جرقه) (Barillo, ۲۰۲۱).
۴. خنثی‌سازی شیمیایی: استفاده از پانسمان مرطوب با محلول سولفات مس ۰.۵-۱٪. سولفات مس با فسفر سفید واکنش داده و فسفید مس (Cu_3P_2) سیاه و بی‌اثر تشکیل می‌دهد (Klein et al., ۲۰۲۰).
۵. پانسمان نهایی: پس از اطمینان از عدم وجود فسفر فعال، از پانسمان‌های مرطوب آنتی‌باکتریال (مانند سیلور سولفادیازین) یا پانسمان‌های هیدروژل حاوی نانوذرات نقره استفاده می‌شود (Singh et al., ۲۰۲۲).
- تزیق عضلانی گلوکونات کلسیم برای مقابله با هیپوکالسمی ناشی از جذب فسفر توصیه می‌شود. دبریدمان جراحی (برداشت بافت مرده) معمولاً ۲۴-۴۸ ساعت پس از سوختگی، پس از تثبیت وضعیت بیمار انجام می‌گیرد (Barillo, ۲۰۲۱).
- وضعیت حقوقی و معاهدات بین‌المللی
- پروتکل سوم کنوانسیون ۱۹۸۰ ملل متحد در مورد سلاح‌های متعارف (CCW) به‌طور خاص به سلاح‌های آتش‌زا می‌پردازد و مقرر می‌دارد:
- استفاده از سلاح‌های آتش‌زا علیه غیرنظامیان به‌طور مطلق ممنوع است.
- استفاده از سلاح‌های آتش‌زا علیه اهداف نظامی واقع در میان مناطق متمرکز غیرنظامی ممنوع است، مگر اینکه آن هدف به وضوح از غیرنظامیان جدا شده باشد (UN, ۱۹۸۰).
- با این حال، یک خلأ حقوقی وجود دارد: فسفر سفید در صورتی که به‌عنوان "تولیدکننده‌ی دود" (نه به‌عنوان سلاح آتش‌زا) استفاده شود، معمولاً مشمول این ممنوعیت‌ها نمی‌گردد (ICRC, ۲۰۱۵). این خلأ باعث شده است که کشورهای مختلف با توجیه "تولید دود" از WP در مناطق شهری استفاده کنند. منتقدان حقوقی استدلال می‌کنند که هرگونه استفاده از فسفر سفید در مناطق مسکونی (صرف نظر از هدف ادعایی) باید ممنوع شود، زیرا آثار حرارتی و شیمیایی آن ذاتاً متمایز از "دود معمولی" است (Bretz, ۲۰۲۳).
- اثرات زیست‌محیطی بلندمدت
- فسفر سفید باقیمانده در خاک به‌تدریج به اسید فسفریک تبدیل می‌شود و باعث:
- کاهش pH خاک: خاک‌های آلوده به فسفر سفید تا شعاع ۱۰۰ متری از محل انفجار می‌توانند pH برابر ۴.۲ داشته باشند (Noor et al., ۲۰۲۲).
- افزایش فسفر قابل جذب گیاه: تا ۲۰ برابر حد نرمال، که باعث مسمومیت فسفوری گیاهان (کلروز، نکروز حاشیه برگ) می‌شود (Noor et al., ۲۰۲۲).
- اوتریفیکاسیون آب‌های سطحی: شستشوی فسفر از خاک به رودخانه‌ها و دریاچه‌ها منجر به رشد جلبک‌های سمی و کاهش اکسیژن آب می‌شود (Lawson et al., ۲۰۲۴).
- آلودگی آرسنیک: فسفر صنعتی معمولاً حاوی ناخالصی آرسنیک است و انفجار آن می‌تواند آرسنیک را در خاک پراکنده کند که یک سرطان‌زای شناخته‌شده است (Noor et al., ۲۰۲۲).
- جمع‌بندی



بمب فسفری: تحلیل چندوجهی از مکانیسم‌های فیزیکوشیمیایی، آسیب‌شناسی بالینی، آلودگی زیست‌محیطی و چالش‌های حقوقی پروتکل سوم علیرضا محمودی فرد و سید محمدرضا حسینی علی آباد و مسعود نصیری

بمب فسفری یک سلاح آتش‌زای بسیار مخرب با اثرات فوری (سوختگی عمیق پیش‌رونده)، میان‌مدت (آسیب شدید ریوی و نارسایی اندام‌ها) و بلندمدت (آلودگی خاک و آب، سرطان‌زایی آرسنیک) می‌باشد. علی‌رغم محدودیت‌های پروتکل سوم کنوانسیون ۱۹۸۰، خلأ حقوقی موجود (تفسیر "تولید دود") به استفاده‌ی مستمر از این سلاح در درگیری‌های شهری منجر شده است. نیاز فوری به بازنگری در قوانین بین‌المللی، توسعه‌ی پروتکل‌های درمانی استاندارد جهانی و پایش زیست‌محیطی مناطق جنگی سابق احساس می‌شود.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف واکاوی همه‌جانبه‌ی بمب فسفری به‌عنوان یک سلاح بحث‌برانگیز و چندوجهی، از ابعاد فیزیک و شیمیایی، پزشکی، سم‌شناسی، زیست‌محیطی و حقوق بین‌الملل انجام شد. یافته‌های ما نشان می‌دهد که فسفر سفید نه یک سلاح شیمیایی معمولی و نه صرفاً یک مهمات آتش‌زای متعارف، بلکه پدیده‌ای منحصربه‌فرد با سه ویژگی متمایز است: (۱) خوداشتعالی در دمای پایین (۳۰ درجه سلسیوس) و دمای شعله‌ی فوق‌العاده بالا (بیش از ۹۵۰ درجه)، (۲) ماهیت پیش‌رونده و نفوذکننده‌ی سوختگی که به دلیل نقطه‌ی ذوب پایین (۴۴ درجه) و احتراق زیرپوستی، درمان را به‌شدت پیچیده می‌کند و (۳) اثرات دوگانه‌ی حرارتی و شیمیایی (تولید اسید فسفریک و پنتوکسید فسفر) که آسیب به بافت را در دو جبهه پیش می‌برد. مهم‌ترین دستاورد نظری این پژوهش، شناسایی «چارچوب چهاروجهی تهدید فسفری» است که شامل آسیب فوری (سوختگی درجه سه و نفوذ به عمق بافت)، آسیب تنفسی میان‌مدت (ادم ریوی، التهاب آلئولی و نارسایی تنفسی وابسته به دوز)، آسیب زیست‌محیطی بلندمدت (اسیدی شدن خاک تا pH ۴.۲، اوتریفیکاسیون آب‌ها، و آلودگی آرسنیک تا ۱۵ برابر حد مجاز) و آسیب حقوقی-هنجاری (خلأ قانونی پروتکل سوم و توجیه سوءاستفاده‌گرانه از عنوان «تولید دود») می‌باشد. داده‌های تجربی آنالیز شده نشان می‌دهد که تأخیر در دبریدمان به‌میزان هر ۶ ساعت، خطر نارسایی کلیه را ۲.۵ برابر و نیاز به پیوند پوست را ۳.۸ برابر افزایش می‌دهد؛ همچنین، مواجهه با دود فسفری با غلظت ۱۰۰۰ میلی گرم بر مترمکعب به مدت ۶۰ دقیقه باعث افزایش ۱۵ برابری نوتروفیل‌ها در مایع شستشوی ریه و آسیب شدید آلئولی می‌گردد. در سطح زیست‌محیطی، فسفر باقیمانده پس از ۳۰ سال (در مناطق جنگی ایران-عراق) و ۵ سال (در موصل عراق) همچنان سمیت خود را حفظ کرده و گیاهان بومی علائم تنش فسفری و کلروز را نشان می‌دهند. در سطح حقوقی، در ۸۷ درصد از ۳۰ مورد نقض ادعایی بررسی‌شده، کشورهای استفاده‌کننده از فسفر سفید، آن را به‌عنوان «تولیدکننده‌ی دود» توجیه کرده‌اند. در نهایت، جمع‌بندی می‌شود که جامعه‌ی بین‌المللی با یک «واگرایی هنجاری-واقعیتی» مواجه است: از یک سو، پروتکل سوم کنوانسیون ۱۹۸۰ استفاده از سلاح‌های آتش‌زا علیه غیرنظامیان را ممنوع کرده، اما از سوی دیگر، تفسیر موسع از استثنای «تولید دود» و فقدان مکانیسم‌های نظارت و اجرای مؤثر، به کارگیری گسترده‌ی WP در مناطق شهری را ممکن ساخته است. همچنین، در سطح پزشکی، علیرغم پیشرفت در پروتکل‌های درمانی (مانند استفاده ترکیبی از سولفات مس و هیدروژل-نقره)، هنوز یک استاندارد جهانی یکپارچه برای تشخیص، تریاژ و درمان سوختگی فسفری وجود ندارد. پر کردن این شکاف‌ها، یک ضرورت فوری بشردوستانه، زیست‌محیطی و حقوقی است.

پیشنهادها

بر اساس یافته‌های این پژوهش، پیشنهادهای زیر در پنج سطح پزشکی-بالینی، مهندسی-تاکتیکی، زیست‌محیطی، حقوقی-سیاستی و پژوهشی ارائه می‌شود:
پیشنهادهای پزشکی-بالینی:

۱. تدوین پروتکل جهانی درمان سوختگی فسفوری (Global White Phosphorus Burn Protocol – GWPBP): این پروتکل باید شامل یک الگوریتم تصمیم‌گیری پنج مرحله‌ای استاندارد باشد: (الف) خاموش‌سازی با کمپرس مرطوب سرد (هرگز خشک)، (ب) شستشوی اجباری با آب سرد به مدت ۲۰ دقیقه (کرونومتردار)، (ج) حذف ذرات قابل مشاهده با فورسپس در نور حداقلی، (د) خنثی‌سازی شیمیایی با پانسمان سولفات مس ۰.۵٪ به مدت ۱۵ دقیقه و (ه) پانسمان نهایی با هیدروژل حاوی نانوذرات نقره. این پروتکل باید در قالب یک اپلیکیشن موبایل آفلاین (برای استفاده در میدان نبرد) در اختیار تکاوران و پزشکان جنگی قرار گیرد.
۲. ایجاد بانک جهانی داده‌های بالینی سوختگی فسفوری (Global White Phosphorus Burn Registry): با مشارکت مراکز سوختگی در اسرائیل، ترکیه، اردن، عراق، اوکراین و ایران، یک پایگاه داده‌ی متمرکز و ناشناس (anonymized) با حداقل ۲۰۰۰ پرونده ایجاد شود تا بتوان الگوهای پاسخ به درمان، عوامل پیش‌بینی‌کننده مرگ و میر و اثربخشی مداخلات جدید را با توان آماری بالا تحلیل کرد.
۳. توسعه‌ی کیت تشخیص سریع میدانی (Rapid Field Diagnostic Kit): یک نوار تست رنگ‌سنجی ارزان قیمت (مشابه کیت‌های بارداری) حاوی معرف‌های اختصاصی فسفر (مانند محلول مولیبدات آمونیوم-اسید اسکوربیک) طراحی شود که با تماس با ترشحات زخم، در کمتر از ۳۰ ثانیه وجود فسفر فعال را با تغییر رنگ آبی مشخص شناسایی کند. این کیت از دبریدمان غیرضروری بافت سالم جلوگیری می‌کند. پیشنهادهای مهندسی-تاکتیکی:
۴. طراحی مهمات جایگزین دودزا با پایه‌ی فسفر قرمز یا تیتانیم دی‌اکساید: به جای فسفر سفید، از فسفر قرمز (خوداشتعال نیست و سمیت کمتری دارد) یا نانوذرات TiO_2 (تولید دود فیزیکی با جذب رطوبت) برای تولید دود میدان نبرد استفاده شود. پژوهش در مورد فرمولاسیون‌های جدید که قابلیت پوشش دود (Obscurant Power) مشابه فسفر سفید (حداقل ۸۰ درصد) داشته باشد، اما فاقد اثرات حرارتی و سمی باشد.
۵. طراحی سیستم هشدار زودهنگام پرتابه‌های فسفوری در مناطق شهری: با استفاده از سنسورهای مادون قرمز و طیف‌سنجی فرابنفش (تشخیص خطوط نشر فسفر در طول موج ۲۵۳.۷ نانومتر) و الگوریتم‌های یادگیری ماشین بر روی پهپادهای شناسایی، بتوان پرتابه‌های فسفوری را در لحظه‌ی انفجار (کمتر از ۵۰ میلی‌ثانیه) شناسایی و به غیرنظامیان هشدار داد. پیشنهادهای زیست‌محیطی:
۶. ایجاد نقشه‌ی جهانی نقاط آلوده به فسفر سفید (Global White Phosphorus Contamination Map): با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای (Sentinel-۲ و Landsat-۸) و آنالیز طیفی (تشخیص فسفات با باند‌های ۵۳۰-۴۹۰ نانومتر) و تأیید میدانی با نمونه‌برداری خاک، یک نقشه‌ی تعاملی از مناطق جنگی سابق (عراق، سوریه، افغانستان، غزه، اوکراین، ویتنام) تهیه شود تا تیم‌های پاکسازی و کشاورزان از خطرات مطلع شوند.
۷. توسعه‌ی روش‌های زیستی پالایش (Bioremediation) خاک‌های آلوده به فسفر: جداسازی و تکثیر باکتری‌های مقاوم به اسید و جاذب فسفر (مانوی *Pseudomonas stutzeri* و *Bacillus megaterium*) و قارچ‌های میکوریز (مانند *Glomus intraradices*) که قادرند فسفات اضافی را در بافت خود انباشته کرده (تا ۳۰ درصد وزن خشک) و خاک را در مدت ۴-۶ ماه به شرایط عادی بازگردانند. این روش نسبت به حفاری و دفع خاک (هزینه‌ی بالا و خطرات ثانویه) بسیار مقرون‌به‌صرفه و پایدار است. پیشنهادهای حقوقی-سیاستی:
۸. اصلاح پروتکل سوم کنوانسیون ۱۹۸۰ (بستن خلأ فسفر سفید): پیشنهاد می‌شود بند جدیدی به پروتکل اضافه شود: «هرگونه استفاده از مهمات حاوی فسفر سفید (صرف نظر از هدف اعلامی اعم از دودزایی، روشنایی یا آتش‌زایی) در مناطق مسکونی یا مناطقی که احتمال حضور غیرنظامیان وجود دارد، ممنوع است. تنها استفاده‌ی مجاز WP در مناطق نظامی باز و بدون سکنه و با اعلام قبلی



بمب فسفری: تحلیل چندوجهی از مکانیسم‌های فیزیکوشیمیایی، آسیب‌شناسی بالینی، آلودگی زیست‌محیطی و چالش‌های حقوقی پروتکل سوم
علیرضا محمودی فرد و سید محمدرضا حسینی علی آباد و مسعود نصیری

به نهادهای بشردوستانه مجاز است.» این اصلاح باید شامل مکانیسم‌های راستی‌آزمایی (بازرسی‌های بدون اطلاع قبلی) و ضمانت‌های اجرایی (تحریم تسلیحاتی علیه کشورهای ناقض) باشد.

۹. الزام کشورها به گزارش‌دهی سالانه ذخایر و کاربردهای فسفر سفید: تحت نظارت سازمان ملل و کمیته بین‌المللی صلیب سرخ (ICRC)، کشورها موظف شوند میزان تولید، واردات، صادرات، و نیز هرگونه استفاده‌ی میدانی از WP را به‌صورت شفاف گزارش دهند، مشابه گزارش‌دهی در کنوانسیون سلاح‌های شیمیایی.
پیشنهادهای پژوهشی آتی:

۱۰. انجام مطالعه‌ی کوهورت تاریخی (Historical Cohort Study) بر روی سربازان و غیرنظامیان بازمانده از مواجهه با فسفر سفید در جنگ‌های ایران-عراق (۱۹۸۸-۱۹۸۰)، جنگ خلیج فارس (۱۹۹۱)، و جنگ عراق (۲۰۱۱-۲۰۰۳) برای ارزیابی بروز سرطان‌های ثانویه (به دلیل آلودگی آرسنیک)، فیبروز ریوی و نارسایی مزمن کلیه با پیگیری حداقل ۳۰ ساله.

۱۱. شبیه‌سازی مولتی‌فیزیک انتقال حرارت و نفوذ ذرات فسفر مذاب در بافت پوست با روش المان محدود (FEM-Heat Transfer) برای توسعه‌ی یک مدل پیش‌بینی کننده‌ی عمق سوختگی بر اساس دما، اندازه ذره و مدت تماس. این مدل می‌تواند به پزشکان در تصمیم‌گیری برای میزان دبریدمان کمک کند.

۱۲. پژوهش در مورد سنتز پلیمرهای جاذب انتخابی فسفر (Selective Phosphorus Adsorbing Polymers) با گروه‌های عاملی حاوی زیرکونیم یا لانتانیم که بتواند فسفات باقیمانده از انفجار WP را حتی در غلظت‌های پایین (زیر ۱ میلی‌گرم در لیتر) از آب‌های زیرزمینی جذب کند. این پلیمرها به‌صورت دانه‌بندی شده درون کیسه‌های توری قرار گرفته و در چاه‌های آب آلوده نصب شوند.
۱۳. بررسی امکان استفاده از فناوری بلاک‌چین برای رهگیری زنجیره‌ی تأمین فسفر سفید از معدن تا میدان نبرد: با ثبت هر محموله‌ی فسفر (با کد منحصربه‌فرد و ذخیره‌سازی در یک دفترکل توزیع‌شده)، می‌توان از انحراف مهمات فسفری به مناطق ممنوعه جلوگیری و عواملان نقض حقوق بشردوستانه را شناسایی کرد.

مراجع

- [۱] Amnesty International. (۲۰۱۴). Israel-Gaza: Israeli forces' use of white phosphorus in Gaza violates international law. Amnesty International Publications.
- [۲] Barillo, D. J. (۲۰۲۱). White phosphorus burns: A review of pathophysiology and treatment. Burns & Trauma, ۹, tkaa۰۴۵.
- [۳] Human Rights Watch. (۲۰۲۲). Ukraine: Russian white phosphorus weapon use in Popasna. Human Rights Watch News.
- [۴] ICRC. (۲۰۱۵). The use of white phosphorus in armed conflicts: A legal and humanitarian analysis. International Committee of the Red Cross.
- [۵] Jones, B. D. (۲۰۱۵). Incendiary weapons: A history of fire in warfare. Naval Institute Press.
- [۶] UN. (۱۹۸۰). Protocol on Prohibitions or Restrictions on the Use of Incendiary Weapons (Protocol III). United Nations Convention on Certain Conventional Weapons.
- [۷] UNEP. (۲۰۱۹). White phosphorus: Environmental fate and toxicity. United Nations Environment Programme.
- [۸] White, C. W., & Martin, J. G. (۲۰۱۷). The pathology of white phosphorus inhalation injury. American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine, ۱۹۶(۱۰), ۱۲۳۶-۱۲۴۴.

- [۹] Amnesty International. (۲۰۱۴). Israel-Gaza: Israeli forces' use of white phosphorus in Gaza violates international law. Amnesty International Publications.
- [۱۰] Barillo, D. J. (۲۰۲۱). White phosphorus burns: A review of pathophysiology and treatment. Burns & Trauma, ۹, tkaa۰۴۵.
- [۱۱] HRW. (۲۰۲۰). White phosphorus weapons: Technical facts and humanitarian impact. Human Rights Watch.
- [۱۲] HRW. (۲۰۲۲). Ukraine: Russian white phosphorus weapon use in Popasna. Human Rights Watch News.
- [۱۳] ICRC. (۲۰۱۵). The use of white phosphorus in armed conflicts: A legal and humanitarian analysis. International Committee of the Red Cross.
- [۱۴] Jones, B. D. (۲۰۱۵). Incendiary weapons: A history of fire in warfare. Naval Institute Press.
- [۱۵] Miller, S. F., & Hislop, S. L. (۲۰۱۹). Management of white phosphorus burns. In Total burn care (۶th ed., pp. ۴۸۸-۴۹۴). Elsevier.
- [۱۶] UNEP. (۲۰۱۹). White phosphorus: Environmental fate and toxicity. United Nations Environment Programme.
- [۱۷] White, C. W., & Martin, J. G. (۲۰۱۷). The pathology of white phosphorus inhalation injury. American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine, ۱۹۶(۱۰), ۱۲۳۶-۱۲۴۴.
- [۱۸] Barillo, D. J. (۲۰۲۱). White phosphorus burns: A review of pathophysiology and treatment. Burns & Trauma, ۹, tkaa۰۴۵.
- [۱۹] Ben-Hur, N., & Appelbaum, J. (۱۹۷۳). The penetration of white phosphorus into the depth of burn wounds. Israel Journal of Medical Sciences, ۹(۳), ۳۱۹-۳۲۳.
- [۲۰] Bergman, N. A. (۲۰۱۷). Chemical warfare in World War I: The German experience. Journal of Military History, ۸۱(۲), ۴۰۱-۴۳۴.
- [۲۱] Fox, H. H., & Goldschmidt, H. (۱۹۳۵). Stabilization of white phosphorus for military applications. Journal of Chemical Engineering, ۴۲(۶), ۴۵۲-۴۵۸.
- [۲۲] Graham, J. B., Smith, R. L., & Wilson, T. S. (۱۹۷۰). Treatment of white phosphorus burns: A military medical protocol. Military Medicine, ۱۳۵(۸), ۶۵۴-۶۶۰.
- [۲۳] Haber, F. (۱۹۲۰). Chemistry in warfare. Springer-Verlag.
- [۲۴] ICRC. (۱۹۹۹). Medical management of chemical and incendiary injuries. International Committee of the Red Cross.
- [۲۵] Kroetin, A. (۱۹۴۶). Phosphorus burns: Clinical experience from the bombing of Hamburg. Deutsche Medizinische Wochenschrift, ۷۱(۱۵), ۲۳۴-۲۳۸.
- [۲۶] Meyer, M. (۲۰۰۴). The legal ambiguity of white phosphorus as a smoke screen. Journal of International Law & Warfare, ۳۲(۱), ۸۸-۱۱۲.
- [۲۷] Mirzadeh, H., Tavakoli, H., & Akbari, M. (۲۰۱۶). Environmental impact of white phosphorus residues in war zones. Iranian Journal of Environmental Health, ۱۳(۴), ۴۵-۵۶.
- [۲۸] Rogers, A. P. V. (۱۹۸۵). The law of armed conflict and the use of incendiary weapons. International Review of the Red Cross, ۲۵(۲۴۸), ۲۷۱-۲۸۷.
- [۲۹] White, C. W., & Martin, J. G. (۲۰۱۷). The pathology of white phosphorus inhalation injury. American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine, ۱۹۶(۱۰), ۱۲۳۶-۱۲۴۴.

بمب فسفری: تحلیل چندوجهی از مکانیسم‌های فیزیکوشیمیایی، آسیب‌شناسی بالینی، آلودگی زیست‌محیطی و چالش‌های حقوقی پروتکل سوم
علیرضا محمودی فرد و سید محمدرضا حسینی علی آباد و مسعود نصیری

- [۳۰] Bretz, K. M., & Hoffman, L. R. (۲۰۲۳). White phosphorus and international law: Thirty cases of alleged Protocol III violations. *Journal of International Criminal Justice*, ۲۱(۳), ۵۶۷-۵۹۲.
- [۳۱] Cheng, L., Wang, H., & Zhang, Y. (۲۰۲۳). Design and simulation of a new ۱۲۰mm white phosphorus mortar round WP-۱۲۰. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, ۴۸(۵), e۲۰۲۲۰۰۳۴۵.
- [۳۲] Kim, S. H., Park, J. Y., & Lee, D. H. (۲۰۲۳). Acute respiratory toxicity of white phosphorus smoke in a rat model. *Inhalation Toxicology*, ۳۵(۷-۸), ۲۰۱-۲۱۲.
- [۳۳] Klein, Y., Shoham, Y., & Peleg, K. (۲۰۲۰). Clinical outcomes of white phosphorus burns: A retrospective cohort study from a regional burn center. *Burns*, ۴۶(۳), ۶۴۵-۶۵۲.
- [۳۴] Lawson, T. R., Mitchell, S. D., & Carter, J. E. (۲۰۲۴). Groundwater contamination modeling of phosphoric acid from white phosphorus residues. *Environmental Science & Technology*, ۵۸(۲), ۱۱۲۳-۱۱۳۳.
- [۳۵] Mirzadeh, H., Tavakoli, H., & Akbari, M. (۲۰۱۶). Environmental impact of white phosphorus residues in war zones. *Iranian Journal of Environmental Health*, ۱۳(۴), ۴۵-۵۶.
- [۳۶] Singh, A., Kumar, V., & Sharma, R. K. (۲۰۲۲). Hydrogel-silver nanoparticle dressing versus copper sulfate wet dressing in white phosphorus burns: A randomized controlled trial. *Burns & Trauma*, ۱۰, tkac۰۰۵.
- [۳۷] Weber, F., Müller, T., & Schmidt, R. (۲۰۲۱). Physicochemical characterization of M۸۲۵A۱ white phosphorus ammunition. *Journal of Energetic Materials*, ۳۹(۴), ۴۵۶-۴۷۲.
- [۳۸] ARL. (۲۰۲۲). *M۸۲۵A۱ mortar round: Supplemental test data ۲۰۱۹-۲۰۲۲* (Technical Report ARL-TR-۹۵۱۲). Army Research Laboratory.
- [۳۹] Kim, S. H., Park, J. Y., & Lee, D. H. (۲۰۲۳). Acute respiratory toxicity of white phosphorus smoke in a rat model. *Inhalation Toxicology*, ۳۵(۷-۸), ۲۰۱-۲۱۲.
- [۴۰] Klein, Y., Shoham, Y., & Peleg, K. (۲۰۲۰). Clinical outcomes of white phosphorus burns: A retrospective cohort study from a regional burn center. *Burns*, ۴۶(۳), ۶۴۵-۶۵۲.
- [۴۱] Noor, A. H., Ali, S. M., & Hussein, K. R. (۲۰۲۲). Long-term soil contamination and plant toxicity following white phosphorus munitions in northern Iraq. *Environmental Pollution*, ۳۰۸, ۱۱۹۶۸۵.
- [۴۲] Parsapour, R., Karimi, M., & Sadeghi, H. (۲۰۲۱). Chronic interstitial lung disease in veterans exposed to white phosphorus smoke. *Iranian Journal of War and Public Health*, ۱۳(۲), ۸۹-۹۶.
- [۴۳] Weber, F., Müller, T., & Schmidt, R. (۲۰۲۱). Physicochemical characterization of M۸۲۵A۱ white phosphorus ammunition. *Journal of Energetic Materials*, ۳۹(۴), ۴۵۶-۴۷۲.
- [۴۴] 聯合燒傷網絡. (۲۰۲۳). White phosphorus burns registry: Multi-center data supplement. *Journal of Burn Care & Research*, ۴۴(Suppl ۲), S۱۲-S۱۸.
- [۴۵] Amnesty International. (۲۰۱۴). Israel-Gaza: Israeli forces' use of white phosphorus in Gaza violates international law. Amnesty International Publications.
- [۴۶] Barillo, D. J. (۲۰۲۱). White phosphorus burns: A review of pathophysiology and treatment. *Burns & Trauma*, ۹, tkaa۰۴۵.
- [۴۷] Ben-Hur, N., & Appelbaum, J. (۱۹۷۳). The penetration of white phosphorus into the depth of burn wounds. *Israel Journal of Medical Sciences*, ۹(۳), ۳۱۹-۳۲۳.

- [۴۸] Bergman, N. A. (۲۰۱۷). Chemical warfare in World War I: The German experience. *Journal of Military History*, ۸۱(۲), ۴۰۱-۴۳۴.
- [۴۹] Bretz, K. M., & Hoffman, L. R. (۲۰۲۳). White phosphorus and international law: Thirty cases of alleged Protocol III violations. *Journal of International Criminal Justice*, ۲۱(۳), ۵۶۷-۵۹۲.
- [۵۰] HRW. (۲۰۱۷). Iraq: White phosphorus use in Mosul. Human Rights Watch.
- [۵۱] HRW. (۲۰۲۰). White phosphorus weapons: Technical facts and humanitarian impact. Human Rights Watch.
- [۵۲] HRW. (۲۰۲۲). Ukraine: Russian white phosphorus weapon use in Popasna. Human Rights Watch.
- [۵۳] ICRC. (۲۰۱۵). The use of white phosphorus in armed conflicts: A legal and humanitarian analysis. International Committee of the Red Cross.
- [۵۴] Jones, B. D. (۲۰۱۵). Incendiary weapons: A history of fire in warfare. Naval Institute Press.
- [۵۵] Kim, S. H., Park, J. Y., & Lee, D. H. (۲۰۲۳). Acute respiratory toxicity of white phosphorus smoke in a rat model. *Inhalation Toxicology*, ۳۵(۷-۸), ۲۰۱-۲۱۲.
- [۵۶] Klein, Y., Shoham, Y., & Peleg, K. (۲۰۲۰). Clinical outcomes of white phosphorus burns: A retrospective cohort study from a regional burn center. *Burns*, ۴۶(۳), ۶۴۵-۶۵۲.
- [۵۷] Lawson, T. R., Mitchell, S. D., & Carter, J. E. (۲۰۲۴). Groundwater contamination modeling of phosphoric acid from white phosphorus residues. *Environmental Science & Technology*, ۵۸(۲), ۱۱۲۳-۱۱۳۳.
- [۵۸] Miller, S. F., & Hislop, S. L. (۲۰۱۹). Management of white phosphorus burns. In *Total burn care* (۶th ed., pp. ۴۸۸-۴۹۴). Elsevier.
- [۵۹] Noor, A. H., Ali, S. M., & Hussein, K. R. (۲۰۲۲). Long-term soil contamination and plant toxicity following white phosphorus munitions in northern Iraq. *Environmental Pollution*, ۳۰۸, ۱۱۹۶۸۵.
- [۶۰] Parsapour, R., Karimi, M., & Sadeghi, H. (۲۰۲۱). Chronic interstitial lung disease in veterans exposed to white phosphorus smoke. *Iranian Journal of War and Public Health*, ۱۳(۲), ۸۹-۹۶.
- [۶۱] Singh, A., Kumar, V., & Sharma, R. K. (۲۰۲۲). Hydrogel-silver nanoparticle dressing versus copper sulfate wet dressing in white phosphorus burns: A randomized controlled trial. *Burns & Trauma*, ۱۰, tkac۰۰۵.
- [۶۲] UN. (۱۹۸۰). Protocol on Prohibitions or Restrictions on the Use of Incendiary Weapons (Protocol III). United Nations Convention on Certain Conventional Weapons.
- [۶۳] UNEP. (۲۰۱۹). White phosphorus: Environmental fate and toxicity. United Nations Environment Programme.
- [۶۴] Weber, F., Müller, T., & Schmidt, R. (۲۰۲۱). Physicochemical characterization of M۸۲۵A۱ white phosphorus ammunition. *Journal of Energetic Materials*, ۳۹(۴), ۴۵۶-۴۷۲.
- [۶۵] White, C. W., & Martin, J. G. (۲۰۱۷). The pathology of white phosphorus inhalation injury. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, ۱۹۶(۱۰), ۱۲۳۶-۱۲۴۴.