

پاکسازی زیستی آلاینده‌های نظامی: راه حلی برای آینده

*دکتر محمود ظهوری نیا، دکتر خدایار قربان، دکتر آرمن اسکندری^۲

تاریخ اعلام قبولی مقاله: ۸۶/۹/۳

تاریخ دریافت مقاله اصلاح شده: ۸۶/۴/۲

تاریخ اعلام وصول: ۸۵/۱۲/۸

چکیده

سابقه و هدف: تولید صنعتی مهمات در مقیاس وسیع درصد سال گذشته باعث دفع مقادیر زیادی مواد زاید محتوی مواد منفجره و محصولات جانبی نیترا ته به محیط شده است. در ایالات متحده، طبق تخمین ارتش آن کشور، ۱/۲ میلیون تن خاک با مواد منفجره آلوده شده است. گسترش نگرانی‌ها درباره اثرات زیست محیطی و بهداشتی مواد شیمیایی ساخته دست بشر باعث شده است تا مطالعات زیادی در مورد سمیت مواد منفجره انجام شود و در نتیجه جهش زایی و سمیت برخی از انواع مواد قابل انفجار رایج در مقاصد نظامی به اثبات رسیده است.

این مقاله بصورت مروری و توصیفی نوشته شده است. بطور سیستماتیک و با استفاده از کلمات کلیدی Bioremediation, explosive contaminated soil, biodegradation, adsorption, phytoremediation, science direct, medscape, etc. google scholar جستجو شد. حدود ۱۵۰ مقاله مرتبط منتشر شده بین سال‌های ۱۹۸۷ تا ۲۰۰۶ مرور شد و اطلاعات مورد نیاز از ۲۷ مقاله استخراج گردید.

روش‌های رایج پاکسازی زیستی عبارتند از: کودسازی، Bioslurry و فیتورمدیشن. از میان اینها، روشهای کودسازی و bioslurry توانسته‌اند به حد مطلوب آلودگی زدایی دست یابند.

اجبار قانونی برای پاکسازی محیط زیست از مواد منفجره در برخی کشورها سبب شده است تا تلاش‌های فراوانی برای یافتن روش‌های مقرون به صرفه زدودن آلودگی‌ها صورت پذیرد. روش‌های پاکسازی طبیعی به علت کم هزینه بودن همواره مورد توجه بوده‌اند. در مرور حاضر سعی شده است علاوه بر معرفی آلاینده‌های نظامی شایع، "پاکسازی زیستی" به عنوان یک روش طبیعی، ارزان و کارآمد معرفی شود.

کلمات کلیدی: آلودگی خاک، پاکسازی زیستی، مواد منفجره

مقدمه

است (۱) و میزان آلودگی خاک در سایر کشورها تقریباً به همین اندازه است. در سال‌های اخیر، نگرانی‌های فزاینده درباره اثرات زیانبار مواد شیمیایی ساخته دست بشر بر محیط زیست و سلامتی سبب شده است تا مطالعات گسترده‌ای درباره اثرات سمی مواد منفجره و مواد حاصل از تغییر شکل آنها انجام شود. پاکسازی

تولید صنعتی مهمات در مقیاس وسیع درصد سال گذشته باعث دفع مقادیر زیادی مواد زاید محتوی مواد منفجره و محصولات جانبی نیترا ته به محیط شده است. در ایالات متحده، طبق تخمین ارتش آن کشور، ۱/۲ میلیون تن خاک با مواد منفجره آلوده شده

۱- استادیار، دانشگاه علوم پزشکی ارتش جمهوری اسلامی ایران، اداره بهداشت و درمان نهجا، گروه میکروبیولوژی بالینی (*نویسنده مسؤل)

تلفن: ۰۹۱۲۳۰۲۸۱۷۹ آدرس الکترونیک: dr_zohourinia@yahoo.com

۲- استادیار، دانشگاه علوم پزشکی ارتش جمهوری اسلامی ایران، دانشکده پزشکی، گروه ایمنی شناسی

۳- دکترای حرفه‌ای پزشکی، مرکز تحقیقات اداره بهداشت درمان نهجا

(Propellents) نیز استفاده می‌شود ولی آلودگی و سمیت ناشی از آنها به اندازه مواد منفجره پر قدرت، شایع و مهم نیست.

(Trinitrotoluene) TNT

از نظر تاریخی، رایج‌ترین ماده منفجره‌ی پر قدرت به شمار می‌رود. تولید آسان و ارزان، پایداری و قابلیت ذوب و قالبگیری، سبب استفاده‌ی گسترده از TNT در ساخت بمب‌ها شده است. TNT شایع‌ترین نوع مواد منفجره است که در مناطقی که سابقاً تجهیزات نظامی در آنها ساخته می‌شده، یافت می‌شود.

حلالیت TNT در آب ۱۰۱/۵ mg/L در ۲۵°C است و طبق مطالعات انجام شده حمل آن در آب بخوبی انجام می‌گیرد. بعلاوه TNT قابلیت اتصال خوبی به رس و مواد معدنی سیلیکاتی دارد. در بسیاری از مناطق آلودگی ناشی از TNT، بالا گزارش شده است و به علت وجود کریستالهایی که مخزن کاذبی برای اندازه‌گیری در روش‌های آزمایشگاهی فراهم می‌سازند، ماهیت ناهمگونی دارد (۲). بر طبق مدلی براساس حلالیت و احیا خود TNT از محل انباشت مسافت زیادی طی نمی‌کند (۳) و همچنین نزدیک به سطح خاک قرار می‌گیرد و انتشار آن در سفره‌های آب زیر زمینی به خوبی مواد منفجره غیر آروماتیک (مانند RDX: Research Department Explosive) نیست. آب مورد استفاده برای شستشو در زمان تولید و حمل TNT نیز با مواد قابل انفجار آلوده می‌شود. "آب صورتی" در واقع فاضلابی است که در هنگام تولید TNT و نیز در فرآیندی که طی آن TNT از خاک زدوده می‌شود تولید می‌شود؛ این فاضلاب سپس به داخل چشمه‌ها ریخته می‌شود و به آلودگی خاک منجر می‌شود. آلودگی همچنین در اثر تخریب و انفجار ناکامل TNT ایجاد می‌شود.

سایر مواد منفجره نیتروآروماتیک

اسید پیکریک (Picric Acid) از نیترواسیون و سولفوناسیون موقت فنول بدست می‌آید. اسید پیکریک و نمک‌های پایدار آن در اوایل قرن حاضر، ابتدا در اردونانس نیروی دریایی و سپس در اردونانس سایر نیروها قرار گرفت. تمایل اسید پیکریک به تشکیل نمک‌های ناپایدار فلزی و نقطه ذوب بالای آن (۱۲۲°C) باعث شد که توسط سایر مواد جایگزین شود.

محیط از مواد منفجره در بسیاری از کشورها اجبار قانونی دارد و این امر دانشمندان را وادار به کشف روش‌های کارآمد و ارزان برای زدودن آلودگی‌های محیط ساخته است. در میان انواع روش‌ها "پاکسازی زیستی (Bioremediation)" یک روش کاملاً طبیعی، نسبتاً کارآمد و مقرون به صرفه‌ی پاکسازی محیط است.

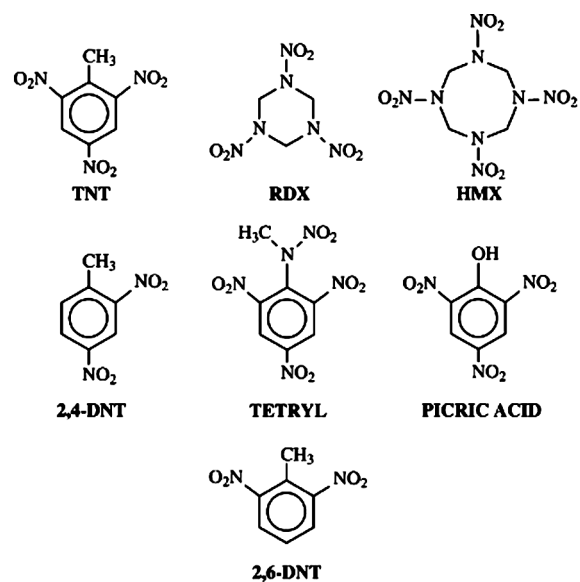
مواد و روشها

مقالات مرتبط با پاکسازی زیستی با استفاده از کلمات کلیدی "explosive contaminated soil, biodegradation, bioremediation, adsorption, phytoremediation" در سایت‌های "medscape, science direct, google scholar" حدود ۱۵۰ مقاله مرتبط منتشر شده بین سال‌های ۱۹۸۷ تا ۲۰۰۶ مرور شد و اطلاعات مورد نیاز از ۲۷ مقاله استخراج گردید.

یافته‌ها

خصوصیات شیمیایی مواد منفجره آلاینده

ساختمان مواد شیمیایی مورد استفاده در اردونانس و نام و علامت اختصاری آنها در شکل (۱) نشان داده شده است. مواد منفجره‌ی پر قدرت یا ثانویه بخش عمده حجم بمب‌ها و خمپاره‌ها را تشکیل می‌دهند که برای فعال‌سازی آنها از مواد منفجره اولیه بعنوان چاشنی استفاده می‌شود. در موشک‌ها و گلوله‌ها از "پیش‌برنده‌ها



شکل ۱- ترکیبات موجود در خاک آلوده با مواد منفجره

نیتروآمین‌ها (Nitramines)

بیولوژیک احیای گروه نیترو است. در پستانداران، بلع TNT سبب دفع هیدروکسیل آمینودی نیتروتولون‌ها، آمینودی نیتروتولون‌ها، دی‌آمینونیتروتولون‌ها، اسید تری‌نیتروبنزویک، الکل تری نیتروبنزیل و آزوکسی تولون‌ها در ادرار می‌شود (۹).

TNT و ایزومرهای DNT (Dinitrotoluene) آن به عنوان مواد سمی و جهش‌زا (Mutagen) شناخته شده‌اند (۱۰)، بعلاوه TNT بعنوان یک کارسینوژن گروه C توسط EPA (Environmental Protection Agency) طبقه‌بندی شده است. در مطالعه‌ای محققان افزایش بروز CML (Chronic Myeloid Leukemia) و AML (Acute Myeloid Leukemia) را در منطقه‌ای آلوده در آلمان مشاهده نمودند ولی نتوانستند وجود رابطه‌سببی را بین وجود مواد دفعی آلوده و افزایش بروز لوکمی اثبات کنند (۱۱). سمیت TNT و سایر ترکیبات نیتروآروماتیک ممکن است به علت رادیکال‌های نیتروآرن (nitroarene) و یا مشتقات هیدروکیل آمینو و نیتروزو (nitroso) باشد. جدیداً نشان داده شده است که TNT و متابولیت‌های آن مانع عملکرد مونوسیت‌ها و لنفوسیت‌های انسان در محیط آزمایش در خارج بدن (In vitro) می‌شوند (۱۲).

نیتروآمین‌های منفجره سمیتی متوسط و حتی بیشتر از TNT دارند ولی جهش‌زانیستند (۹). در موش‌ها RDX-C به CO₂ و نوعی متابولیت ناشناخته که در ادرار دفع می‌شود تبدیل می‌شود (۱۳) نتایج مشابهی درباره HMX وجود دارد.

ورود، تغییر شکل زیستی و سرانجام مواد منفجره در طبیعت میکروب‌ها را می‌توان آخرین حلقه زنجیر باز یافت کربن آلی در زیست کره دانست که وظیفه تجزیه مواد آلی مختلف را به CO₂ بر عهده دارند. وقتی سرانجام محیطی مواد شیمیایی ساخته دست بشر را بررسی می‌کنیم، امیدواریم به فرایندهایی دست پیدا کنیم که بتوانند بدون دارا بودن اثرات سمی برای انسان و اکوسیستم آنها را تجزیه کنند. مثال‌های فراوانی وجود دارند از موادی که قبل از ساخته شدن توسط انسان در طبیعت وجود نداشته‌اند ولی در متابولیسم اولیه میکروارگانیسم‌ها بعنوان منبع کربن و انرژی وارد شده‌اند. چنین مثال‌هایی توانایی تخریب کامل ترکیب مورد سؤال را بوسیله روندهای طبیعی و بدون دخالت انسان روشن می‌سازند. بکارگیری جمعیت‌های میکروبی طبیعی برای زدودن آلودگی‌های آلی "رم‌داسیون درون‌زا" (Intrinsic Remediation) یا

نیتروآمین‌های مورد استفاده در ساخت مهمات عبارتند از RDX (Research Department Explosive) و HMX (High Melting Explosive). در ایالات متحده آمریکا RDX، به عنوان مهمترین ماده منفجره نظامی، جایگزین TNT شده است. قدرت انفجاری RDX و HMX، برابر TNT است. هر دوی نیتروآمین‌ها از نیتراسیون هگزامتیلن تتراآمین یا پارافرم آلدئید در اسیداستیک بی آب بدست می‌آیند. ناخالصی‌های RDX و HMX ترکیبات نیتراته و مونواسیتیل‌های هستند که (۱-acetyl-۳,۵-dinitrocyclotrimethylenetriamine) TAX و (۱-acetyl-۳,۵,۷-trinitrocyclotrimethylenetriamine) SEX نام دارند. معمولاً RDX را با TNT مخلوط می‌کنند (مخلوط B: ۶۰ درصد RDX و ۴۰ درصد TNT) زیرا نقطه ذوب بالای RDX مانع از قالبگیری بی‌خطر آن در شکل خالص می‌شود. حلالیت RDX (۴۲/۳ mg/L) در ۲۰°C و HMX (۵ mg/L) در ۲۵°C به مراتب کمتر از حلالیت TNT است. طبق تحقیقات اتصال RDX به سطوح خاکی کمتر از TNT و تحرک آن بیشتر است (۴). اخیراً ماده جدیدی به نام CL-۲۰ بعنوان جایگزینی برای RDX و HMX معرفی شده است و جالب این است که آلودگی فراگیر آب و خاک با مواد منفجره در گذشته سبب شده است که قابلیت تجزیه زیستی CL-۲۰ حتی قبل از معرفی آن بعنوان یک ماده منفجره و تولید انبوه مورد بررسی قرار گیرد (۵).

خطرات ناشی از آلودگی محیط با مواد منفجره

مهمترین و زودرس‌ترین خطر مواد منفجره خاصیت فعالیت مجدد آنهاست. مواد قابل انفجار به شکل کریستال‌های کوچک تا توده‌های بزرگ در خاک و رسوبات یافت می‌شوند. اعمال یک منبع فعال کننده مناسب بر یکی از این کریستال‌ها می‌تواند سبب انفجار شود. وجود یا عدم آب تأثیر اندکی بر فعالیت مجدد مواد منفجره در خاک دارد (۶). براساس آزمون‌های انجام شده خاکی که ۱۲٪ یا کمتر مواد قابل انفجار داشته باشد توانایی انفجار در صورت گرم شدن را ندارد (۷).

تأثیر مواد منفجره بر سلامتی انسان در مطالعات مختلفی بررسی شده است. راه‌های تماس انسان با سطوح آلوده عبارتند از: استنشاق غبار آلوده، بلع خاک آلوده و جذب پوستی (۸). تغییر شکل غالب TNT و سایر ترکیبات نیتروآروماتیک در همه سیستم‌های

ترکیب بوسیله میکروارگانیسمی که از مغذی‌هایی غیر از ترکیب مورد نظر تغذیه می‌کند "کومتابولیسم (Cometaolism)" نام دارد. در این مورد ارگانیسم مورد نظر فایده‌ای از حضور ترکیب کومتابولیزه شونده کسب نمی‌کند. مثالی از این حالت تغییر شکل TNT بوسیله نوعی قارچ مخرب چوب بنام "Phanerochaete Chyrososporium" است (۱۷) که می‌تواند با استفاده از آنزیم‌هایی مانند منگنزپراکسیداز تا ۴۰٪ TNT را به شکل معدنی درآورد. در مطالعه‌ای دیگر پیشنهاد شده است که "هومیفیکاسیون" محتمل‌ترین سرنوشت کربن حلقه آروماتیک TNT است. در این مطالعه آنزیم‌های پراکسیداز با اتصال DNT ۲,۴ به گیاهک (Humus) مرتبط دانسته شده است (۱۸). قابلیت تجزیه RDX و HMX نیز توسط میکروارگانیسم‌ها بررسی شده است. نیتروآمین‌ها در برابر عمل باکتری‌های هوازی مقاوم هستند. البته گونه‌ای از ردوکک (Rhodococcus DNT۲) قادر به تبدیل RDX به فرمامید (Formamide) است (۱۹). Zhao و همکارانش (۲۰) نیز نشان دادند که کلبسیلای گونه SCZ-۱ می‌تواند RDX را به متانول و فرم آلدئید تبدیل کند. گیاهان نیز قادر به برداشت RDX هستند ولی اطلاعات موجود در این باره اندک است (۲۱).

روش‌های پاکسازی خاک توسط پاکسازی زیستی

پیش از پیدایش روش‌های روزآمد برای پاکسازی محیط، سوزاندن تنها روش مورد استفاده بود. سوزاندن اگر چه روشی است که کنترل خوب و کارایی کاملی دارد ولی معایب بزرگی نظیر هزینه فراوان دارد. بعلاوه، خاکستر تولید شده ممکن است برای دفن و انباشت مناسب نباشد. بطور کلی روش‌ها را می‌توان به دو گروه ۱- در محل (In Situ) و ۲- دور از محل (Ex Situ) تقسیم نمود.

کودسازی (Composting)

کودسازی اولین روش بیولوژیک بود که برای پاکسازی زیستی مناطق نظامی انتخاب، آزمایش و تأیید شد. از میان روش‌های گوناگون کودسازی روش "توده ایستا" (Static Pile) و "کودسازی در معرض باد" (Windrow Composting) رایج‌تر از بقیه هستند. در همه سیستم‌های کودسازی یک منبع تجزیه‌پذیر مواد زیستی، مانند فضولات حیوانی و گیاهی، با خاک آلوده و یک عامل حجم دهنده، به منظور بهبود بافت و هوادهی، مخلوط می‌شود. در مورد

"تعدیل طبیعی" (Natural Attenuation) نام دارد. نیروی پیش برنده تعدیل طبیعی در همان منفعتی نهفته است که میکروارگانیسم‌ها از وجود مواد آلاینده، به عنوان منبع انرژی و غذایی برای رشد خود استفاده می‌کنند. در شرایط طبیعی، مواد منفجره در آبهای زیر زمینی و خاک سطحی بسیار پایدار هستند و نسبت به تبخیر و تجزیه طبیعی مقاومت نشان می‌دهند، در تعدادی از مناطق مطالعه شده غلظت‌های بالای آلودگی آب و خاک پس از گذشت ۲۰ تا ۵۰ سال از قطع دفع مواد منفجره مشاهده شده است. "پاکسازی زیستی" به هر فرایندی اطلاق می‌شود که در آن از میکروارگانیسم‌ها، قارچ‌ها، گیاهان سبز، یا آنزیم‌های آنها برای زدودن آلاینده‌ها و برگرداندن محیط زیست به وضعیت اولیه استفاده می‌شود. پاکسازی زیستی طبیعی قرن‌هاست که مورد استفاده قرار می‌گیرد، بعنوان نمونه نمک‌زدایی زمین‌های کشاورزی با استفاده گیاهان یک سنت دیرینه است. اما فن‌آوری پاکسازی زیستی نخستین بار توسط George M. Robinson در دهه ۱۹۶۰ معرفی شد. از کاربردهای پاکسازی زیستی علاوه بر پاکسازی خاک از مواد منفجره می‌توان به پاکسازی فلزات سنگین، کودهای سولفاته و نشت‌های نفتی اشاره کرد. حتی با استفاده از دستکاری ژنتیکی نوعی باکتری بنام *Dienococcus Radiodurans* برای پاکسازی ضایعات هسته‌ای استفاده می‌شود.

اولین گزارش از یک ارگانیسم جدا شده از یک محل آلوده به TNT در باره نوعی سودوموناس (سویه C۱S۱) بوده است که از TNT، ۲,۴ DNT و ۲-نیتروتولون بعنوان تنها منبع نیتروژن استفاده می‌کند (۱۴). *Enterobacter Cloacae* PB۲ و گونه‌ای از مایکروباکتریوم‌ها نیز بعنوان میکروارگانیسم‌هایی شناخته شده‌اند که از TNT بعنوان تنها منبع نیتروژن بهره می‌برند و با تولید کمپلکس H-TNT باعث آزاد شدن نیتريت از حلقه آروماتیک می‌شوند (۱۵).

محققین دیگر توانایی میکروارگانیسم‌های هوازی را در استفاده از TNT بعنوان منبع نیتروژن گزارش کرده‌اند (۱۶) ولی این عمل فقط بخش کوچکی از تغییر شکل TNT را تشکیل می‌دهد. در بیشتر موارد احیای گروه نیترو بخش عمده تغییر شکل TNT را تشکیل می‌دهد.

مسیرهای تغییر شکلی که شامل بیش از یک گونه میکروبی بوده، روندهای غیر زیستی را در بر گرفته و یا سبب معدنی شدن گردند، برای پاکسازی مفید به نظر می‌رسند. تغییر شکل تصادفی یک

روش‌ها درجاتی از محرومیت از اکسیژن را اعمال می‌کنند. ساز و کار اصلی این روش تسهیل در روند احیای گروه نیترو TNT است.

اولین فرایند bioslurry در مقیاس عملیاتی (Fermentative Anaerobic) FAST (Soil Treatment) نام دارد که برای پاکسازی نوعی علف کش بنام Dinoseb بکار گرفته می‌شد (۲۵). در این فرایند یک منبع کربوهیدرات (مانند ملاس یا ضایعات سیب‌زمینی) را به مخلوط ۴۰ درصد خاک - آب که با فسفات و آمونیوم غنی شده است اضافه می‌کنند. پس از به هم زدن، کود مایع را در شرایط بیهوازی قرار می‌دهند تا میکروارگانیسم‌های طبیعی متابولیسم کامل افزودنی‌های زیستی را تکمیل کنند که مهمترین واکنش در این روند احیای گروه نیترو است. هزینه‌های اصلی این روش در الک کردن خاک، ساخت دریاچه‌ها و تجهیزات صرف می‌شود و معادل ۲۰۰ تا ۶۰۰ دلار برای هر تن است. همه فرایندهای bioslurry به سطوح آلودگی زدایی مطلوب برای TNT و HMX و RDX دست پیدا می‌کنند.

Phytoremediation

فیتورمدیشن به استفاده از گیاهان سبز برای پاکسازی آلودگی‌ها اطلاق می‌شود. آزمایش‌ها نشان داده‌اند که گیاهان توانایی خوبی در برداشت TNT در غلظت‌های پایین (۴ppm) دارند ولی این برداشت با افزایش غلظت (۲۰ppm) کم می‌شود (۲۶). برآورد هزینه حاکی از آنست که پاکسازی آب بوسیله گیاهان ارزان‌تر از استفاده از کربن فعال شده است. البته این روش محدودیت‌هایی دارد مانند دور بودن آلودگی از محل ریشه گیاهان و یاسمیت برخی آلودگی‌ها برای خود گونه گیاهی. تحقیقات جدید بر اتصال ژن نیترو ردوکتاز باکتریایی به ژنوم گیاهان متمرکز شده است.

بحث و نتیجه‌گیری

ماهیت ناهمگون آلودگی‌های قابل انفجار در خاک سبب شده است تا بررسی و ارزیابی از کارایی روش‌های پاکسازی زیستی دشوار باشد. کودسازی و bioslurry بیشترین پاکسازی و برداشت مواد آلاینده را در بر دارند و بعلاوه بیشترین کنترل را فراهم می‌کنند (۲۷). در جدول ۱ معیارهای مورد نظر برای دو روش کودسازی و bioslurry نشان داده شده است (جدول ۱).

خاک‌های شدیداً آلوده افزودن مواد زیستی بطور مؤثری غلظت مواد قابل انفجار را می‌کاهد و از مسمومیت جمعیت باکتریها جلوگیری می‌کند. تجزیه ماده زیستی از روش‌های هوازی و بیهوازی صورت می‌پذیرد و گرما تولید می‌کند. نوع سیستم‌های هوادهی متفاوت است و حتی برخی از هیچ نوع هوادهی استفاده نمی‌کنند. انواعی از راکتورهای کودسازی ساخته شده‌اند که بطور مکانیکی توده خاک را زیر و رو می‌کنند. کودسازی در معرض باد ارزان‌ترین روش است زیرا نیازی به هوادهی ندارد. بعلاوه برای جلوگیری از خشک شدن به توده آب اضافه می‌شود و در صورت استفاده از آب آلوده می‌توان بطور همزمان هر دو را پاکسازی نمود. نتیجه نهایی این فرایند اتصال کووالانسی کربن TNT به مواد زیستی موجود در مخلوط است (۲۲). انواع اصلی پیوند که توسط Thorny و Kennedy معرفی شده‌اند (۲۳) عبارتند از آمینو هیدروکینون، آمینو کینون، هتروسیکلیک و ایمین RDX (imine). HMX نیز توسط کودسازی تصفیه شده‌اند. آزمایشات انجام شده بر روی سویه‌های آزمونگر باکتریایی، بی‌مهرگان آبی، کرم خاکی، و موش نشان داده است که پاکسازی تقریباً کامل از نظر سمیت و جهش‌زایی پس از کودسازی خاک آلوده حاصل می‌شود.

انواع خاک و لجن را می‌توان بوسیله این روش پاکسازی نمود. پس از پاکسازی و کاهش مواد سمی و آلاینده، کود حاصل را می‌توان در محل انباشت و این کود قابلیت پرورش گیاهان را در خود دارد. ملاحظات اقتصادی عبارتند از: ساخت تجهیزات، هزینه افزودنی‌های زیستی، تجهیزات زیر و رو کردن و هوادهی توده خاک و هزینه حمل و نقل. هزینه این کار بین ۲۰۶ تا ۷۶۶ دلار به ازای هر تن خاک تخمین زده شده است که در مقیاس ۱۲۰۰ تا ۳۰۰۰۰ تن باعث ۴۰ تا ۵۰ درصد صرفه‌جویی نسبت به سوزاندن می‌شود (۲۴).

Bioslurry

در این روش از غنی‌سازی خاک با مغذی‌های ارزان قیمت برای پاکسازی آن استفاده می‌نمایند؛ به این ترتیب که خاک آلوده را با آب و مواد مغذی مخلوط می‌کنند تا نوعی کود مایع بدست آید، سپس این کود را داخل راکتورهای مخصوص قرار می‌دهند. اگر چه روش‌های هوازی برای bioslurry ابداع شده‌اند اما امروزه اکثر

جدول ۱- نظریه دو روش پاکسازی زیستی

| فن آوری | آزمون در مقیاس کوچک انجام شده است؟ | به حدود مجاز دست می‌یابد؟ | به نوع خاک حساس است؟ |
|-----------|------------------------------------|---------------------------|----------------------|
| کودسازی | بله | بله | خیر |
| bioslurry | بله | بله | بله |

محیط و خطرات ناشی از وجود مواد منفجره، نقش فعالتری در این زمینه در آینده ایفا کند.

در مجموع به نظر می‌رسد پاکسازی زیستی بعنوان یک روش طبیعی، کارا و مقرون به صرفه است و با توجه به الزام موجود برای پاکسازی

References

- Hampton, M.L., Sisk, W.E., 1997a. Cost and design for application of composting and bioslurry treatment of explosives-contaminated soils. In: Tedder, D.W., (Ed.), Emerging Technologies in Hazardous Waste Management IX, Division of Industrial and Engineering Chemistry, American Chemical Society, Washington, DC, p. 258.
- Comfort, S.D., Shea, P.J., Hundal, L.S., Li, Z., Woodbury, B.L., Martin, J.L., Powers, W.L., 1995. TNT transport and fate in contaminated soil. *J. Environ. Qual.* 24 (6), 1174–1182.
- Voudrias, E.A., Assaf, K.S., 1996. Theoretical evaluation of dissolution and biochemical reduction of TNT for phytoremediation of contaminated sediments. *J. Contam. Hydrol.* 23 (3), 245–261.
- Sheremata, T.W., Thiboutot, S., Ampleman, G., Paquet, L., Halasz, A., Hawari, J., 1999. Fate of 2,4,6-trinitrotoluene and its metabolites in natural and model soil systems. *Environ. Sci. Technol.* 33 (22), 4002–4008.
- Trott, S., Nishino, S.F., Hawari, J., Spain, J.C., 2003. Biodegradation of the nitramine explosive CL-20. *Appl. Environ. Microbiol.* 69 (3), 1871–74.
- W.E. Sisk, Reactivity Testing and Handling Explosive-Contaminated Soil, In: Proceedings of the 1992 Federal Environmental Restoration Conference, Vienna, VA, Hazardous Material Control Resources Institute (HMCRI), April 15-17, 1992.
- F.T. Kristoff, T.W. Ewing and D.E. Johnson, Testing to Determine Relationship Between Explosive Contaminated Sludge Components and Reactivity, Arthur D. Little, Inc., prepared for U.S. Army Toxic and Hazardous Materials Agency, Contract DAAK11-85-D-0008, Jan. 1987.
- H.D. Craig¹, W.E. Sisk, M.D. Nelson and W.H. Dana, Bioremediation of Explosives Contaminated Soils: A Status Review, In: Proceedings of the 10th Annual Conference on Hazardous Waste Research
- Gordon, L., Hartley, W.R., 1992. 2,4,6-Trinitrotoluene (TNT), Drinking Water Health Advisory: Munitions, Lewis Publishers, Boca Raton, FL, pp. 327–398.
- Honeycutt, M.E., Jarvis, A.S., McFarland, V.A., 1996. Cytotoxicity and mutagenicity of 2,4,6-trinitrotoluene and its metabolites. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 35 (3), 282–287
- Kilian, P.H., Skrzypek, S., Becker, N., Havemann, K., 2001. Exposure to armament wastes and leukemia: a case-control study within a cluster of AML and CML in Germany. *Leuk. Res.* 25 (10), 839–845.
- Beltz, L.A., Neira, D.R., Axtell, C.A., Iverson, S., Deaton, W., Waldschmidt, T.J., Bumpus, J.A., Johnston, C.G., 2001. Immunotoxicity of explosives-contaminated soil before and after bioremediation. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* 40 (3), 311–317.
- Schneider, N.R., Bradley, S.L., Andersen, M.E., 1977. Toxicology of cyclotrimethylenetrinitramine: distribution and metabolism in the rat and the miniature swine. *Toxicol. Appl. Pharmacol.* (39), 531–541.
- Duque, E., Haidour, A., Godoy, F., Ramos, J.L., 1993. Construction of a *Pseudomonas* hybrid strain that mineralizes 2,4,6-trinitrotoluene. *J. Bacteriol.* 175 (8), 2278–2283.
- French, C.E., Nicklin, S., Bruce, N.C., 1998. Aerobic degradation of 2,4,6-trinitrotoluene by *Enterobacter cloacae* PB2 and by pentaerythritol tetranitrate reductase. *Appl. Environ. Microbiol.* 64 (8), 2864–2868.
- Kalafut, T., Wales, M.E., Rastogi, V.K., Naumova, R.P., Zaripova, S.K., Wild, J.R., 1998. Biotransformation patterns of 2,4,6-trinitrotoluene by aerobic bacteria. *Curr. Microbiol.* 36 (1), 45–54.
- Hawari, J., Halasz, A., Beaudet, S., Paquet, L., Ampleman, G., Thiboutot, S., 1999. Biotransformation of 2,4,6-trinitrotoluene with *Phanerochaete chrysosporium* in agitated cultures at pH 4.5. *Appl. Environ. Microbiol.* 65 (7), 2977–2986.
- Held, T., Draude, G., Schmidt, F.R.J., Brokamp, A., Reis, K.H., 1997. Enhanced humification as an in-situ bioremediation technique for 2,4,6-trinitrotoluene (TNT) contaminated soils. *Environ. Technol.* 18 (5), 479–487.
- Fournier, D., Halasz, A., Spain, J., Fiurasek, P., Hawari, J., 2002. Determination of key metabolites during biodegradation of hexahydro-1,3,5-trinitro-1,3,5-triazine with *Rhodococcus* sp strain DN22. *Appl. Environ. Microbiol.* 68 (1), 166–172.

- 20- Zhao, J.S., Halasz, A., Paquet, L., Beaulieu, C., Hawari, J., 2002. Biodegradation of hexahydro-1,3,5-trinitro-1,3,5-triazine and its mononitroso derivative hexahydro-1-nitroso-3,5-dinitro-1,3,5-triazine by *Klebsiella pneumoniae* strain SCZ-1 isolated from an anaerobic sludge. *Appl. Environ. Microbiol.* 68 (11), 5336–5341.
- 21- Burken, J.G., Shanks, J.B., Thompson, H.J., 2000. Phytoremediation and plant metabolism of explosives and nitroaromatic compounds. In: Spain, J.C., Hughes, J.B., Knackmuss, H.J. (Eds.), *Biodegradation of Nitroaromatic Compounds and Explosives*, Lewis Publishers, Boca Raton, FL, pp. 239–276.
- 22- Pennington, J.C., Patrick, W.J., 1990. Adsorption and desorption of 2,4,6-trinitrotoluene by soils. *J. Environ. Qual.* 19 (3), 559–567.
- 23- Thorn, K.A., Kennedy, K.R., 2002. ¹⁵N NMR investigation of the covalent binding of reduced TNT amines to soil humic acid, model compounds, and lignocellulose. *Environ. Sci. Technol.* 36 (17), 3787–3796.
- 24- Craig, H.D., Sisk, W.E., Nelson, M.D., Dana, W.H., 1995. Bioremediation of explosives-contaminated soils: A status review. Great Plains and Rocky Mountain Hazardous Substance Research Center, Kansas State University, Manhattan, KS, pp. 164–179.
- 25- Crawford, D.L., Stevens, T.O., Crawford, R.L., 1995. Biological system for degrading nitroaromatics in water and soils. US Patent 5, 387,271.
- 26- Behrends, L.L., Sikora, F.J., Coonrod, H.S., Pier, P.A., Almond, R.A., 1997. Phytoremediation of explosives in groundwater using constructed wetlands. In: Alleman, B.C., Leeson, A. (Eds.), *In situ and On-Site Bioremediation*, Battelle Press, Columbus, OH, p. 315.
- 27- Thomas A. Lewis, David A. Newcombe, Ronald L. Crawford., 2003. Bioremediation of soils contaminated with explosives. In: *Journal of Environmental Management* 70 (2004) 291–307.

Archive of SID

Archive of SID

Bioremediation of Explosives Contaminated Soil: A Solution For Future

*Zohourinia M; MD¹, Ghorban Kh; MD², Eskandari A; MD³

Abstract

The investigation of past operational and disposal practices at military facilities and formerly used defense sites has dramatically increased in the past several years. The manufacture; load, assembly and pack; demilitarization; washout operations; and open burn/open detonation of ordnance and explosives has resulted in contamination of soils with munitions residues. The primary constituents are nitroaromatic and nitramine organic compounds and heavy metals. A number of sites have soil contamination remaining where waste disposal practices were discontinued 20 to 50 years ago.

In conjunction with site investigations, biological treatment studies have been undertaken to evaluate the potential for full scale remediation of organic contaminants. Because the cleanup of areas contaminated by explosives is now mandated because of public health concerns, considerable effort has been invested in finding economical remediation technologies. Bioremediation is now available as an alternative cleanup remedy for explosives-contaminated soils. Bioremediation boosts the activity of naturally occurring microorganisms to degrade hazardous substances in soil or sediment into nontoxic materials. This paper reviews some of the best performed studies in the recent years and tries to introduce bioremediation as a proper alternative for the more conventional methods.

Keywords: Biodegradation, Bioremediation, Explosives contamination, Soil treatment

1- (*Corresponding Author) Assistant Professor, Army University of Medical Sciences, Faculty of Medicine, Department of Microbiology

Tel: 09123028179 E-mail: dr_zohourinia@yahoo.com

2- Assistant Professor, Army University of Medical Sciences, Faculty of Medicine, Department of Immunology

3- General Practitioner, Center of NEHAJA