

بررسی روش‌های دفع مواد زائد مهمات جنگی

محمد مهدی خلیلی^۱، میلاد کیشانی فراهانی^۲

۱- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد ایمنی، سلامت و محیط زیست (HSE)، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران

Email: mm.khalili@ut.ac.ir

۲- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد ایمنی، سلامت و محیط زیست (HSE)، دانشگاه نقش جهان، اصفهان، ایران

Email: miladfarahanik1365@gmail.com

چکیده:

یکی از موضوعات مهم در حوزه مدیریت مهمات، انهدام و دفع مواد زائد آنها است. تکنیک‌های موجود به منظور انهدام این اقلام عبارتند از: سوزاندن یا انفجار روباز، انفجار محبوس، سوزاندن درون کوره‌ها و بسترهای سیال که هر کدام دارای مزایا و معایبی هستند. علاوه بر موارد یاد شده تحقیقات گسترده‌ای در سطح جهان بر روی این دسته از مواد زائد صورت گرفته که کاربردهای مختلفی را برای آنها فراهم ساخته است. به عنوان نمونه با استخراج ماده پیروکسیدین از برخی مهمات منقضی شده و در ادامه انجام اصلاحات بر روی آنها امکان تولید ماده منفجره با کاربری صنعتی میسر می‌گردد. روش دیگر، استفاده از مهمات منقضی شده به عنوان ماده خام ثانویه در تولید سیمان است؛ آزمایش‌های صورت گرفته قابلیت این مواد را در تولید مطلوب سیمان نشان می‌دهند. پژوهش‌هایی نیز در زمینه تصفیه خاک آلوده به ماده منفجره تری‌نیترو تولوئن^۱ به عمل آمده است که در آن با بهره‌برداری از روش زیست‌پالایی^۲ و همچنین فعالیت بیولوژیکی باکتری‌ها، خاک مورد نظر را تصفیه می‌شود. در انتها یادآور می‌شود روش‌هایی دیگری نیز برای دفع زائدات مهمات ممکن است وجود داشته باشند و فقط محدود به موارد یاد شده نمی‌گردد. هدف این مجموعه شرح مختصری از برخی اصول انهدام، دفع و بکارگیری مجدد مواد زائد مهمات می‌باشد.

واژگان کلیدی: مواد زائد حاوی مهمات، مواد منفجره، انهدام، روش‌های دفع، زیست‌پالایی.

مقدمه

می‌تواند تهدیدی برای سلامت انسان و آبریزان باشد. فروش این زائدات ممکن در نظر اول گزینه مناسبی برای بازگشت سرمایه گذاری صورت گرفته در این زمینه باشد، هرچند مهمات فروخته شده باید قابلیت استفاده را داشته باشند. ولی این مورد نیز به دلیل مسائل امنیتی و گسترش یافتن سلاح‌های جنگی با محدودیت‌هایی مواجه است. معدوم‌سازی شامل استخراج مواد منفجره یا خنثی‌سازی قابلیت انفجاری مهمات بوده به گونه‌ای که مواد شیمیایی مورد استفاده در آنها تخریب شده یا به دیگر مواد قابل استفاده تبدیل شود [۲].

انتخاب روش‌های مناسب برای انهدام به مقدار و ماهیت موادی که لازم است منهدم شوند و تاسیسات موجود بستگی دارد. اکثر مواد پر انرژی را نمی‌توان با حل کردن در حلال و دفع به عنوان فاضلاب به شکلی ایمن منهدم نمود، زیرا اغلب آنها در آب حل نمی‌شوند و عموماً سمی بوده و برای محیط زیست خطرناک هستند [۳]. شاید به عنوان یک روش جهت مدیریت این مواد زائد بتوان آنها را با مهماتی که تاریخ مصرف آنها به اتمام نرسیده است جایگزین نمود یا اینکه در

تمامی مهمات جنگی دارای دوره مصرف معینی می‌باشند که در صورت عدم استفاده کارایی خود را از دست داده و به دلیل اینکه قابل مصرف نمی‌باشند به عنوان مواد زائد شناخته می‌شوند. نگهداشت آنها پرهزینه است و مشکلاتی را در زمینه ایمنی، سلامت و محیط زیست به وجود می‌آورد، لذا باید اینگونه مهمات به روش صحیح معدوم شده تا محیط از وجود آنها پاک و عاری گردد. امروز موضوع دفع پسماندهای نظامی به یک چالش بزرگ برای بسیاری از کشورها تبدیل شده است [۱].

روش‌های دفع این نوع مواد زائد شامل تلنبار کردن، فروش یا معدوم‌سازی^۳ است. تلنبار کردن در اعماق دریا مطابق با توافقنامه لندن ممنوع شده است. تلنبار کردن در زمین نیز با محدودیت‌های قانونی زیادی روبرو است. از دلایل ممنوعیت دفن، خطر نفوذ شیرابه سمی این مواد به خاک و منابع آبی (سطحی یا زیرزمینی) است که

1 2,4,6-Trinitrotoluene(TNT)
3 Dumping

2 Bioremediation or Biodegradation
4 Demilitarization

البته ذکر این نکته نیز ضروری است که سوزاندن یا انفجار این نوع پسماندها به نوبه خود منجر به آلودگی های زیست محیطی خصوصاً در فاز خاک می شود اما استفاده از روش زیست پالایی کمک بسیار قابل توجهی در خنثی نمودن اثرات زیان بار آنها ارائه می دهد که مطالعه Clark and Boopathy در سال ۲۰۰۷ به بررسی این تکنیک پرداخته است [۱۳]. هدف این مطالعه تشریح روش های متداول در انهدام پسماندهای حاوی مهمات است که در ادامه روش های بازیافت مواد منفجره به همراه آنالیز و تجزیه و تحلیل هر روش مورد بحث قرار گرفته است.

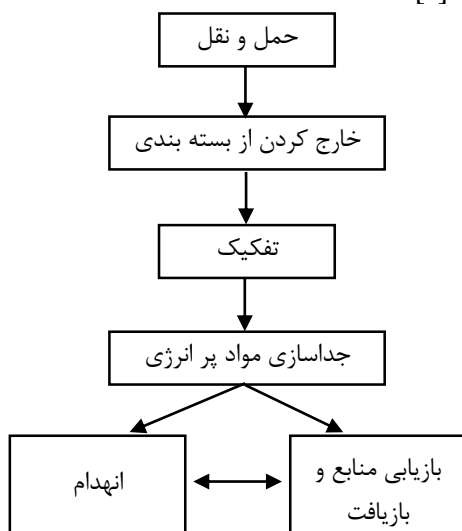
روش تحقیق

اصول انهدام

در حالت کلی، فرآیند خنثی سازی یا منهدم کردن مهمات شامل مواد زیر است:

- انتقال به سایت انهدام
- خارج کردن مهمات از بسته بندی های مربوطه
- تقسیم بندی یا تفکیک مهمات به اجزای کوچک تر
- منهدم کردن یا نابود کردن (عموماً مواد پر انرژی یا عناصری که قابلیت تخریب را دارند).
- بازیابی منابع و بازیافت^۲

انجام تمامی مواد بالا ممکن است مورد نیاز نباشد. مثلاً مهمات می توانند بدون انجام شدن عمل تفکیک یا جداسازی مواد شیمیایی موجود در آن منهدم شوند. در برخی شرایط نیاز به تولید دوغاب^۸ جهت تصفیه می باشد [۲].



شکل ۱: فرآیند انهدام و خنثی سازی

آموزش نیروهای نظامی و در برگزاری رزمایش های نظامی مورد استفاده قرار داد. در حالت کلی روش های معمول برای معدوم سازی مهمات شامل سوزاندن و انفجار می باشند. روش های دیگر عبارتند از: تصفیه حرارتی از طریق سوزاندن مواد زائد درون کوره^۵ یا تصفیه از طریق اکسیداسیون^۶ و تجزیه زیستی (زیست پالایی) [۲].

مواد منفجره از هر نوعی برای اهداف تجاری و نظامی در بسیاری از کشورها و در تمام نقاط دنیا ساخته می شود. با این وجود بدست آوردن هر نوع تصویری که ایده ارزشمندی از بزرگی صنعت مواد منفجره نشان دهد مشکل است. مواد منفجره نظامی معمولاً تحت شرایط سری ساخته شده و هیچ گونه اطلاعاتی در این خصوص منتشر نمی شود. برای مواد منفجره تجاری مطالب چاپ شده بسیار کم است و از کشوری به کشور دیگر به طور قابل توجهی تغییر می کند [۴]. به همین دلیل ارائه آمار و ارقام درخصوص میزان مواد زائدی که در این صنایع بوجود می آیند مقدور نیست. هدف این مقاله بیان روش های مختلف دفع زائدات مهمات و آنالیز خطرات آن، استفاده از روش زیست پالایی در پاکسازی خاک مناطق آلوده به مواد منفجره و همچنین تبدیل این مواد و بکارگیری آنها به عنوان مواد خام در ساخت اقلامی مانند مواد منفجره صنعتی یا ساخت سیمان است.

روش کار

مطالعه حاضر حاصل بررسی دقیق و عمیق منابع (هر چند محدود) قابل دسترس در زمینه مدیریت دفع مواد زائد حاوی مهمات جنگی همانند: کتب لاتین و ترجمه شده به همراه مقالات علمی معتبر منتشر شده در سایت (ScienceDirect) و همچنین تعدادی از مقالات فارسی چاپ شده با موضوع انهدام مهمات می باشد که اطلاعات کامل آنها شامل نویسندگان، سال چاپ و... در قسمت منابع اعلام شده است. در ابتدا روش های متداولی که در خنثی سازی یا انهدام مهمات منقذی شده استفاده می شوند مورد بحث قرار گرفته است. مطالعات مختلف نشان داده اند این ترکیبات منقذی شده می توانند کاربردهای گسترده ای در صنایع مختلف داشته باشند به عنوان مثال با انجام برخی تغییرات در ساختار آنها قابلیت کاربری مجدد به عنوان ماده منفجره در صنایع را دارند همانطور که Davit Khomeriki و همکاران در سال ۲۰۱۵ به بررسی این موضوع پرداخته است [۸]. این ترکیبات قابلیت استفاده در صنعت سیمان را نیز دارا می باشند، مطالعه K.G. Kolovos در سال ۲۰۰۶ مشخص کرد که بکارگیری این مواد باعث کاهش قابل توجه مصرف مواد اولیه در ساخت سیمان می شود [۹].

روش های انهدام و دفع مهمات

سوزاندن روباز^۹

یکی از روشهای مرسوم و متداول جهت انهدام ضایعات مواد پرنرژی غیر قابل انفجار، سوزاندن در محیط های باز است، این روش در مناطق دورافتاده و معمولاً در محل رزمایش های نظامی قابل اجرا است [۵]. مواد منفجره درون چاله های ساخته شده از بتون قرار داده شده و به صورت معمول در دمای پائین تر از ۵۰۰ درجه سانتیگراد می سوزند. سوزاندن روباز به صورت گسترده برای اکثر مهمات ها استفاده می شود. مهمات های کالیبر کوچک به صورت کامل درون چاله ها قرار می گیرند و مهمات حجیم را پس از کاهش اندازه درون چاله ها برای سوزاندن قرار می دهند [۶]. از معایب این روش، انتشار آلایندهای خطرناکی مانند گازهای اسیدی (اسید کلریدریک، اسید هیدروسولفیک، مونوکسید کربن، اکسید نیتروژن و غیره)، ذرات فلزات سنگین (کادمیوم، کرم، سرب، جیوه و...) در هوا است. مزیت این روش سادگی فرآیند و عدم نیاز به طراحی های صنعتی است [۲، ۵].

انفجار روباز^{۱۰}

در عمل انفجار روباز تجزیه شمیایی بیشتری بر روی محصولات نسبت به سوزاندن روباز ایجاد می شود اما این روش منجر به پراکنده شدن داسه های فلزات سنگین در مقیاس وسیع و در نهایت آلودگی خاک و هوا می گردد. انفجار روباز به همراه سوزاندن روباز از متداول ترین روش های دفع مواد منفجره می باشند. این روش می تواند برای گونه های متنوعی از مهمات ها استفاده شده و بر خلاف روش سوزاندن، اندازه مهمات تأثیری در کار آن ندارد.

انفجار محبوس^{۱۱}

تفاوت این روش با انفجار روباز این است که عمل انفجار در محفظه ای بسته انجام می شود که می تواند تشعشعات وارده به محیط زیست را کنترل نماید. بسته به نوع مهمات و ابعاد محفظه انفجاری کاهش ابعاد مهمات می تواند مورد نیاز باشد. مجموعه وسایل و تجهیزات انفجار محبوس قابلیت حمل و جابجایی را داراست [۶].

سوزاندن در کوره های ثابت^{۱۲}

سوزاندن داخل کوره ها شامل حرارت دهی ضایعات مواد پرنرژی و تجزیه آنهاست. در این روش از منبع گرمایش خارجی جهت انجام عملیات حرارتی استفاده می کنند. محفظه آب بندی شده این کوره ها می تواند علاوه بر فراهم نمودن شرایط لازم برای گرم شدن، سوختن و تجزیه مواد، تشعشعات وارده به محیط زیست را نیز کنترل نماید.

بسته به نوع مهمات و ابعاد محفظه انفجاری کاهش ابعاد مهمات می تواند مورد نیاز باشد [۵، ۶].



شکل ۲: کوره ثابت

عوامل اصلی در طراحی این کوره عبارتند از: محاسبه ضخامت جداره کوره، انتخاب مناسب ترین ماده جهت عایق کوره و محاسبه ضخامت آن است. در ساخت بدنه کوره از فولاد نمره ۲۰ استفاده می شود. جهت تعیین ضخامت بدنه کوره فاکتورهای مختلفی از جمله میزان خوردگی مجاز و در ادامه کاهش ضخامت استیل می بایست در نظر گرفته شود. بنابراین یک ضخامت اضافی برای فلز مورد استفاده در بدنه در نظر می گیرند، میزان ضخامت کل با در نظر گرفتن موارد مذکور ۳۰ میلیمتر است. پوشاندن جداره بیرونی کوره با لایه های عایق علاوه بر اینکه موجب کاهش اتلاف انرژی حرارتی می شود از پرسنل عملیاتی در برابر تشعشعات حرارتی نیز محافظت می کند. در این زمینه از پشم سنگ به ضخامت ۱۳۰ میلیمتر استفاده می کنند. برای این نوع کوره ها یک سیستم خنک کننده در نظر گرفته شده تا دمای سطح بیرونی کوره را زیر ۱۰۰ درجه سانتیگراد نگه دارد. سیال مورد استفاده جهت خنک کردن بدنه کوره آب است [۷].

سوزاندن در کوره های گردان^{۱۳}

این کوره استوانه ای از یک دیواره ضخیم ساخته شده و به صورت افقی (با زاویه انحراف ۳ تا ۵ درجه) مستقر شده است. مواد زائد از دریچه تغذیه که در ارتفاع بالاتری از درجه خروجی قرار دارد وارد می شوند. چرخش آهسته کوره (سرعتی معادل ۲ تا ۵ دور در دقیقه) باعث می شود این مواد به صورت آبشاری ضمن هدایت به قسمت تحتانی کوره در طول مسیر حرارت دهی و سوزانده شوند و در پایان از انتهای پائینی کوره خارج می گردند. ضایعات سوختی معمولاً برای سوزاندن و ایجاد شعله در نازل های کوره استفاده می شود. این کوره ها مجهز به فیلتر برای کنترل آلاینده های خروجی هستند.

12 Static Kiln Incineration
13 Rotary Kiln Incineration

9 Open Burning (OB)
10 Open Detonation (OD)
11 Closed Detonation (CD)

نتایج حاصل از اندازه گیری گاز های سمی در انفجار مواد منفجره ترکیب شده با نیترات آمونیوم که در جدول شماره ۲ درج شده است نشان می دهد در این حالت غلظت گازهای مذکور به طور محسوسی کاهش می یابند. که دلیل آن افزودن آمونیوم نیترات است. میزان اضافه کردن نیترات آمونیوم به اندازه ای باید باشد که منجر به حفظ تعادل اکسیژن پیروکسیلین در محدوده صفر شود [۸].

روش های دیگری نیز در ارتباط با استفاده از مواد زائد مهمات جنگی وجود دارد. به عنوان مثال تحقیقات انجام گرفته در کشور یونان، نشان می دهد زائدهات فشنگ های جنگی، قابلیت استفاده به عنوان ماده خام ثانویه در تولید سیمان را دارا می باشند.

کاربری مهمات منقضی در تولید سیمان

محیط زیست ما تحت تأثیر فلزات سنگین و سمی شامل سرب (Pb)، مس (Cu)، روی (Zn)، آنتیموان (Sb)، قلع (Sn)، نیکل (Ni)، کروم (Cr)، کادمیوم (Cd)، جیوه (Hg)، آرسنیک (As) و... است [۹]. مطالعات مختلفی در خصوص ایجاد سمیت های حاد یا مزمن بوسیله این ترکیبات برای سلامت انسان گزارش شده است [۱۰-۱۲]. در این میان سرب و آنتیموان به صورت گسترده در ساخت مهمات جنگی استفاده می شوند. خصوصیات از قبیل نرمی، نیروی ثقل نسبتاً بالا و هزینه های کم تولید باعث می شوند که سرب برای ساخت فشنگ های جنگی و ساچمه های تفنگ بادی مناسب باشد و به همین علت مشکل است تا با مواد دیگر جایگزین شود. استفاده از آنتیموان نیز باعث سخت تر شدن گلوله با توجه به خصوصیات مورد نیاز می شود. از سوی دیگر پوک و مرمی فشنگ ها محتوی مقادیر مختلفی از عناصر Cu, Zn, Ni, Sn, Fe, Sb, Cd است. غلظت این عناصر با توجه به نوع مهمات جنگی می تواند متفاوت باشد. مرمی ها یا تکه های آنها (بقایای آنها) در صورتی که بدون کنترل بر روی زمین رها شوند در طولانی مدت منجر به آلودگی لایه های خاک می شوند. البته آمار و ارقام موجود در این خصوص محدود است. به عنوان نمونه در کشور فنلاند که در زمینه تولید مهمات و فشنگ برای تفنگ های تفریحی فعالیت دارد و بیشترین تعداد مناطق تیراندازی کاربردی در اروپا را داراست به طور متوسط بیش از ۷۰۰۰ کیلوگرم گلوله به صورت سالانه در محیط رها می شود. در بیشتر کشورهای تولید کننده مهمات، معضل اصلی در زمینه اهداف نظامی می باشد که معمولاً به علت ناهمگونی و هزینه های بالای جمع آوری، به مدت طولانی در طبیعت رها می شوند. بنابراین قابل تصور است که این مواد جزء مواد زائد خطرناک باشند و باید احتیاطات لازم در خصوص دفع آنها در محیط زیست در نظر گرفته

بکارگیری در انفجار معادن روباز، آنها را در شرایط آزمایشگاهی مورد بررسی قرار می دهند. بدین منظور ماده پیروکسیلین از توپ های ۱۲۲ و ۱۳۰ میلیمتری و سوخت موشک مدل PCT-4K استخراج و در شرایط آزمایشگاه بررسی شدند. ابتدا این مواد را پس از خرد کردن و آسیاب کردن به صورت پودر تبدیل می شوند. ماده اصلی این پودر، پیروکسیلین (نیترو سلولز) است که دارای اکسیژن منفی است. جهت ایجاد تعادل در آن مقداری نیترات آمونیوم به همراه اکسیژن مثبت به آن اضافه می کنند و به منظور بهتر کردن کارایی پودر آن را با ژلاتین غلیظ می کنند سپس پودر مذکور را در شرایط خلاء در جداره یک بمب افکن تزریق کرده و یک انفجار ساختگی در تونلی آزمایشگاهی با بکارگیری این بمب افکن در زیر زمین (معدن سنگ آهک) ایجاد می کنند. گاز های تولید شده در اثر این انفجار از سنگ های آهک موجود در محل استخراج شده و مقدار این گازها را با میزان آنها در شرایطی که از همین مواد منفجره در کاربری روتین استفاده می شود مورد مقایسه و تحلیل قرار می دهند.

جدول ۱: غلظت گازهای سمی در دو نمونه از مواد منفجره منقضی

نوع ماده منفجره	مقدار (کیلوگرم)	غلظت گازهای سمی (گرم/مترمکعب)			
		SO ₂	H ₂ S	NO ₂	CO
پیروکسیلین	۱۰	۰	۰	۰/۱۰۳	۲۵
	۲۰	۰	۰	۱/۱۳	۱۲/۵
	۴۵	۰	۰	۲/۰۵	۲۳۵
سوخت موشک PCT-4K	۱۰	۰	۰	۰/۱۰۳	۳/۷۵
	۳۵	۰	۰	۰/۲۰۵	۳۰۵

با توجه به اینکه حداکثر غلظت مجاز مونوکسید کربن جهت انتشار در هوا ۵ میلیگرم بر مترمکعب و دی اکسید نیتروژن ۰/۰۸۵ میلیگرم بر مترمکعب است با مقایسه این مقادیر با جدول فوق مشخص می شود مقادیر اندازه گیری شده خیلی بیشتر از حد استاندارد هستند.

جدول ۲: غلظت گازهای سمی در نمونه های اصلاحی مواد منفجره

نوع ماده منفجره	مقدار (کیلوگرم)	غلظت گازهای سمی (گرم/مترمکعب)			
		SO ₂	H ₂ S	NO ₂	CO
پیروکسیلین اصلاح شده (حاوی نیترات آمونیوم)	۱۰	۰	۰	۱/۱۳	۶/۲۵
	۳۵	۰	۰	۰/۱۰۳	۳۲/۵
سوخت موشک PCT-4K اصلاح شده (حاوی نیترات آمونیوم)	۱۰	۰	۰	۰/۰۱۰۳	۱/۲۵
	۴۵	۰	۰	۰/۱۰۳	۳/۷۵

T2 در مواد خام معدنی موجب افزایش قابل توجه عنصر سرب می شود ولی در ترکیب T3 روی و مس این وضعیت را دارا هستند.

جدول ۳: درصد وزنی ترکیب شیمیایی در گروه های مختلف مواد زائد مهمات

عنصر (درصد وزنی)	نمونه اول (T1)	نمونه دوم (T2)	نمونه سوم (T3)
Pb	۹۹/۰۶	۹۶/۳۸	۰/۰۶
Sn	۰/۰۱	۲/۵۲	۰/۰۵
Cu	-	۰/۱۲	۷۰/۳۲
Zn	-	۰/۰۳	۲۷/۹۱
Sb	۰/۶۴	۰/۸۳	۰/۰۲
Fe	-	۰/۰۰۶	۰/۰۳
Al	-	۰/۰۰۴	۰/۰۲
Ni	۰/۰۱	۰/۰۰۱	۰/۲۰
Cr	-	۰/۰۰۱	۰/۰۳
As	-	۰/۰۱	۰/۰۰۱
Hg	-	۰/۰۰۱	۰/۰۰۴
Bi	-	-	۰/۰۰۱

در شرایط دمایی بالا بیشتر فلزات سنگین اکسید می شوند. ترکیبات سرب در اثر سوخت و تولید خاکستر کاملاً فرار بوده و تنها مقادیر کمی از آن در کلینکر سیمانی باقی می ماند. سرب اکساید نقش تأخیری در هیدراسیون را داراست. از طرفی اکسید مس نیز به عنوان ماده معدنی ساز عمل نموده و منجر به کاهش دمای ذوب می شود. همچنین اکسید روی نیز رفتار سوخت مواد خام را اصلاح نموده و شکل گیری کلینکر را تسریع می کند. از آنجایی که سرب در شرایط دمایی بالا فراریت بالایی دارد به منظور جلوگیری از انتشار این فلز در محیط و از سوی دیگر افزایش اثرات معدنی فلزات مس و روی در سیمان مورد آزمایش، تصمیم بر این شد که هنگام آماده سازی مخلوط، از ترکیب T1 و T3 بیش از ۲ درصد وزنی استفاده نشود و این ترکیب با مخلوط T3 غنی شود.

مطالعات حرارتی پس از گرم کردن نمونه ها در کوره صورت گرفت. نمودار شماره ۲، محنی آنالیز پتانسیل حرارتی هر سه نمونه را با منحنی مرجع مورد مقایسه قرار داده است. همانطور که مشاهده می شود میزان گرمایی یا به عبارت دیگر ارزش حرارتی تولید شده نمونه ها نسبت به نوع مرجع بالاتر است که نشان می دهد آزمایش انجام شده در پخت سیمان و تجزیه کلسیم کربنات مؤثر می باشد. تأثیر ترکیبات

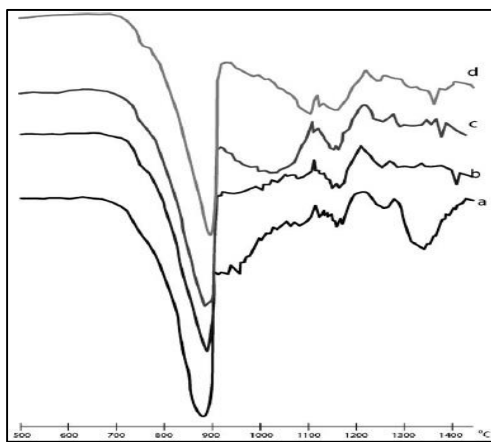
شود. علیرغم پیشرفت ها و تکنولوژی هایی که در خصوص تصفیه زباله بعمل آمده است متأسفانه اطلاعات ناچیزی در خصوص دفع یا پردازش مواد زائد مهمات جنگی موجود است. یکی از راه حل های موجود در کنار بازیافت این مواد، استفاده از آنها به عنوان ماده خام ثانویه در تولید کلینکر سیمان است.

در صنعت سیمان، استفاده از مواد خام جایگزین یا روان ساز جهت بهبود قابلیت سوخت مواد خام و تأثیر در شکل گیری کلینکر سیمان به صورت گسترده مورد بحث می باشد. مطالعات انجام شده نشان می دهد برخی عناصر بیگانه علیرغم غلظت پائین، تأثیر قابل توجهی در فرآیند سوختن، بهبود واکنش پذیری مواد خام و تشکیل ساختار و بافت کلینکر سیمان و همچنین واکنش پذیری مناسب با آب را دارند. در شروع کار سه نمونه از مواد زائد مهمات جنگی^۷ مورد مطالعه قرار گرفت؛ نمونه اول (T1) شامل گلوله های با کالیبر ۴/۵ میلیمتر از روی ۱۰ سیل با برد ۱۰ متر جمع آوری شد. نمونه دوم (T2) حاوی گلوله هایی با کالیبر ۷/۶۲ و ۹/۶۵ میلیمتر است و از ۱۰ سیل با برد ۲۵ و ۵۰ متر بدست آمد. در نمونه سوم (T3) کالیبر گلوله ها ۷/۶۲ و ۹/۶۵ میلیمتر بوده که جمع آوری آنها در فضای باز (محدوده ۲۵ تا ۵۰ متر) انجام گرفت. برای انجام آزمایش می بایست اقداماتی در خصوص آماده سازی نمونه ها انجام شود از جمله اینکه تمامی نمونه ها درون مخازن اولتراسونیک که محتوی اسید نیتریک ۱۰ درصد است برای مدت ۱۰ دقیقه قرار گرفته تا کلیه ناخالصی ها از آنها جدا شوند. سپس با آب مقطر شستشو و درون دستگاه خشک کن^۸ قرار می گیرند. در مرحله بعد تحت شرایط آزمایشگاهی آسیاب شده و این عمل تا آنجا ادامه می یابد که اندازه ذرات به کمتر از ۹۰ میکرون برسد. ترکیب شیمیایی هر گروه از این مواد زائد توسط اسپکتروسکوپی جذب اتمی اندازه گیری و در جدول شماره ۳ ارائه شده است.

در ادامه سه مخلوط مختلف به نام های B1، B2 و B3 از ترکیب کردن سه نمونه T1، T2 و T3 با نسبت های ترکیبی متفاوت (مطابق با جدول شماره ۴) ایجاد می گردد. در این روش یک آسیاب چرخان در شرایط آزمایشگاهی برای مدت ۱ ساعت نمونه ها را با یکدیگر مخلوط می کند. پس از آن هر گروه از نمونه ها را به شکل یک گلوله فشرده در آورده و درون یک کوره الکتریکی قرار می دهند. مدت زمان گرمایش ۲۰ دقیقه بوده که تا دمای ۱۴۵۰ درجه سانتیگراد حرارت داده می شوند و پس از آن بلافاصله سرد می گردند. همانطور که در جدول شماره ۳ مشاهده می شود ترکیب شدن T1 و

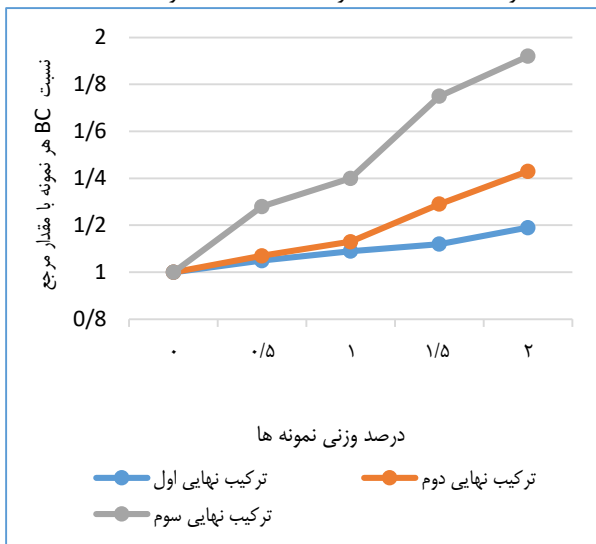
جدول ۴: درصد وزنی ترکیب خام حاصل از مخلوط شدن زائدات مهمات و سیمان خام

ترکیب نهایی اول (B1) (حاوی: Ti %۳۵، T2 %۳۰ و T3 %۳۰)	ترکیب نهایی دوم (B2) (حاوی: Ti %۲۵، T2 %۲۵ و T3 %۵۰)		ترکیب نهایی سوم (B3) (حاوی: Ti %۱۵، T2 %۱۵ و T3 %۷۰)
M1-05	M1-10	M1-15	M1-20
۰/۵٪ ترکیب نهایی اول	۱٪ ترکیب نهایی اول	۱/۵٪ ترکیب نهایی اول	۲٪ ترکیب نهایی اول
۹۹/۵٪ سیمان خام	۹۹٪ سیمان خام	۹۸/۵٪ سیمان خام	۹۸٪ سیمان خام
M2-05	M2-10	M2-15	M2-20
۰/۵٪ ترکیب نهایی دوم	۱٪ ترکیب نهایی دوم	۱/۵٪ ترکیب نهایی دوم	۲٪ ترکیب نهایی دوم
۹۹/۵٪ سیمان خام	۹۹٪ سیمان خام	۹۸/۵٪ سیمان خام	۹۸٪ سیمان خام
M3-05	M3-10	M3-15	M3-20
۰/۵٪ ترکیب نهایی سوم	۱٪ ترکیب نهایی سوم	۱/۵٪ ترکیب نهایی سوم	۲٪ ترکیب نهایی سوم
۹۹/۵٪ سیمان خام	۹۹٪ سیمان خام	۹۸/۵٪ سیمان خام	۹۸٪ سیمان خام



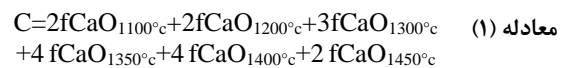
نمودار ۱: آنالیز پتانسیل حرارتی - (a) سیمان خام،

(b) نمونه M1-20، (c) نمونه M2-20، (d) نمونه M3-20



نمودار ۲: نمودار تغییر میزان BC در نمونه های مختلف مواد زائد حاوی مهمات

WAM اضافه شده به ماده خام بر اساس اندازه گیری میزان اکسید کلسیم باقیمانده (وارد واکنش نشده) در نمونه ها پس از فرآیند پخت بدست می آید بدین صورت که میزان اکسید کلسیم (C) را در سه نمونه حرارت دیده (B1، B2، B3) مطابق با معادله (۱) بر حسب درصد محاسبه می کنند.



در انتها قابلیت سوختن نمونه های ترکیبی با استفاده از فرمول $BC = 600/C$ قابل محاسبه خواهد بود. بیشتر بودن مقدار BC از عدد ۱ به معنی مساعد بودن ماده اضافه جهت عملیات پخت سیمان است. قابلیت سوختن (BC) هر نمونه در جدول شماره ۵ ارائه شده است.

جدول ۵- مقادیر کلسیم اکسید و BC در محصولات حرارت دیده

ترکیب خام (BC)	درصد کلسیم اکسید						
	دما (درجه سانتیگراد)						
	۱۴۵۰	۱۴۰۰	۱۳۵۰	۱۳۰۰	۱۲۰۰	۱۱۰۰	
مرجع	۲/۴۶	۱/۹۹	۴/۸۸	۸/۶۲	۱۴/۴۷	۳۱/۷۷	۳۹/۷۱
M1-05	۲/۶۰	۱/۷۷	۴/۱۱	۸/۱۰	۱۳/۱۲	۲۹/۸۴	۳۹/۶۷
M1-10	۲/۶۸	۱/۵۲	۴/۰۰	۷/۶۱	۱۲/۵۱	۲۹/۰۷	۳۹/۴۱
M1-15	۲/۷۶	۱/۳۴	۳/۷۶	۷/۵۲	۱۱/۷۱	۲۸/۵۲	۳۸/۷۲
M1-20	۲/۹۴	۱/۱۰	۳/۴۳	۶/۸۱	۱۰/۳۳	۲۷/۱۱	۳۷/۷۰
M2-05	۲/۶۵	۱/۵۳	۳/۸۶	۷/۶۷	۱۲/۹۱	۲۹/۶۱	۳۹/۵۱
M2-10	۲/۷۸	۱/۳۹	۳/۶۱	۷/۰۲	۱۲/۰۹	۲۸/۰۷	۳۹/۱۱
M2-15	۳/۱۸	۰/۹۱	۲/۸۶	۵/۸۵	۹/۸۶	۲۶/۵۲	۳۸/۴۱
M2-20	۳/۵۲	۰/۶۳	۲/۲۷	۵/۱۲	۸/۱۱	۲۴/۱۱	۳۷/۱۰
M3-05	۳/۱۶	۱/۰۱	۲/۵۱	۵/۵۵	۱۱/۵۱	۲۱/۴۳	۳۹/۰۷
M3-10	۳/۴۵	۰/۷۷	۱/۸۴	۴/۳۱	۱۰/۴۱	۲۰/۱۱	۳۸/۲۱
M3-15	۴/۳۱	۰/۳۱	۱/۵۲	۲/۱۵	۶/۳۳	۱۷/۳۸	۳۶/۷۰
M3-20	۴/۷۲	۰/۱۷	۰/۶۲	۱/۵۸	۵/۷۱	۱۵/۴۵	۳۵/۱۰

ویال های شیشه ای را درون محفظه حاوی آب نگهداری می کنند تا رطوبت کافی برای نمونه ها تأمین شود. پس از اتمام زمان آزمایش، شیرابه های ایجاد شده را از نمونه ها استخراج نموده و از طریق طیف سنجی انتشار پلاسما (ICP) آمیزان فلزات سنگین موجود در آن را اندازه گیری می کنند.

نتایج بدست آمده از تست نمونه های اصلاحی با WAM نشان می دهد که رویه بکارگیری شده توانایی لازم برای تثبیت سرب را دارا است (جدول شماره ۶). به صورت مشابه این موضوع برای فلزات دیگر شامل مس، روی و قلع نیز صادق است. لازم به ذکر است هیچ گونه نشانه ای از وجود دیگر فلزات سنگین شامل آنتیموان، جیوه، کادمیوم، آرسنیک در شیرابه حاصل از سیمان های با بیشترین غلظت WAM مشاهده نگردید. این نتیجه نشان دهنده تلفیق و ترکیب مناسب فلزات سنگین با مواد کلینکر و افزایش تثبیت آنها در سیمان است.

با استفاده از تکنیک مذکور تقریباً تمامی مقادیر مهمات را می توان به عنوان ماده خام در تولید کلینکر سیمان استفاده نمود و بدین طریق می توان میزان اثرات سمی این مواد در محیط زیست را به مقدار قابل توجهی کاهش داد بدون آنکه تأثیر منفی در کیفیت سیمان نهایی داشته باشد. استفاده از مواد زائد مهمات به عنوان ماده خام ثانویه در تولید سیمان به حفظ منابع مصرفی نیز کمک می کند [۹]. در زمینه تصفیه خاک آلوده به مواد منفجره اقداماتی از جمله بکارگیری روش های زیست پالایی نیز صورت گرفته است. اقداماتی که در ادامه به شرح آن پرداخته می شود برگرفته از روش یاد شده در کارخانه مهمات سازی لویزیانا در کشور امریکا است.

تصفیه خاک آلوده به مواد منفجره از طریق بکارگیری روش زیست پالایی

از اواخر قرن ۱۹، استفاده از ماده تری نیترو تولوئن (TNT) به عنوان ماده منفجره و هم چنین پیشران در بسیاری از کارخانه های مهمات سازی رواج پیدا کرد و کاربرد آن منجر به آلودگی خاک شد. در کشور امریکا وجود حدود ۲ میلیون تن خاک آلوده به ماده منفجره تخمین زده شده است و طبق اعلام آژانس حفاظت از محیط زیست امریکا (EPA) TNT^{۲۲} عمده ترین ماده مورد استفاده ساخت مهمات است. خاک اطراف کارخانه مهمات سازی لویزیانا (LAAP)^۳ آلوده به

در نمودار ۲، نسبت مقادیر قابلیت سوختن هر نمونه با مقدار استاندارد سیمان خام نمایش داده شده است. با توجه به آن نتیجه بهینه در نمونه سوم (ترکیب نهایی سوم) حاصل شده است که در آن نسبت عناصر روی و مس از بقیه بیشتر است.

آزمون شیرابه^{۲۰}

روش آزمون بدین صورت است که نمونه ای از محصول مورد آزمایش را درون یک ویال شیشه ای حاوی آب مقطر (خالص) غوطه ور می کنند و میزان شیرابه ایجاد شده را در روزهای مختلف (۱، ۲، ۳ تا ۹۰ روز) اندازه گیری می کنند.

جدول ۶: غلظت عناصر سرب، روی، مس و قلع در شیرابه

نمونه	مدت زمان نگهداشت در آب (روز)				
	۱	۲	۷	۲۸	۹۰
سرب (میلی گرم بر لیتر)					
M1-10	۰/۰۳۹	۰/۰۴۳	۰/۰۷۶	۰/۱۵۰	۰/۱۹۷
M1-20	۰/۰۶۳	۰/۰۹۹	۰/۱۶۵	۰/۲۲۳	۰/۲۴۵
M2-10	۰/۰۲۲	۰/۰۳۳	۰/۰۴۹	۰/۰۹۹	۰/۱۴۰
M2-20	۰/۰۴۶	۰/۰۶۸	۰/۰۷۶	۰/۱۲۴	۰/۱۷۶
M3-10	۰/۰۱۲	۰/۰۱۷	۰/۰۲۸	۰/۰۳۹	۰/۰۸۷
M3-20	۰/۰۲۲	۰/۰۳۳	۰/۰۵۱	۰/۰۹۱	۰/۱۱۱
مس (میلی گرم بر لیتر)					
M1-10	-	-	۰/۰۱۱	۰/۰۲۳	۰/۰۲۱
M1-20	۰/۰۱۱	۰/۰۱۹	۰/۰۱۶	۰/۰۳۳	۰/۰۴۲
M2-10	-	-	۰/۰۱۵	۰/۰۲۹	۰/۰۴۰
M2-20	-	۰/۰۱۸	۰/۰۳۷	۰/۰۴۷	۰/۰۵۹
M3-10	۰/۰۱۱	۰/۰۱۷	۰/۰۲۸	۰/۰۳۹	۰/۰۸۷
M3-20	۰/۰۱۱	۰/۰۳۳	۰/۰۵۱	۰/۰۹۱	۰/۱۳۱
روی (میلی گرم بر لیتر)					
M1-10	-	-	-	۰/۰۱۱	۰/۰۱۶
M1-20	-	-	-	۰/۰۱۵	۰/۰۲۳
M2-10	-	-	۰/۰۱۶	۰/۰۲۴	۰/۰۲۹
M2-20	-	-	۰/۰۱۹	۰/۰۳۱	۰/۰۴۲
M3-10	-	۰/۰۱۰	۰/۰۱۸	۰/۰۴۱	۰/۰۶۳
M3-20	۰/۰۱۰	۰/۰۱۹	۰/۰۲۰	۰/۰۶۶	۰/۰۷۲
قلع (میلی گرم بر لیتر)					
M1-10	-	-	-	۰/۰۱۴	۰/۰۱۷
M1-20	-	-	-	۰/۰۱۵	۰/۰۲۹
M2-10	-	-	-	-	۰/۰۱۵
M2-20	-	-	-	-	۰/۰۱۹
M3-10	-	-	-	-	-
M3-20	-	-	-	-	-

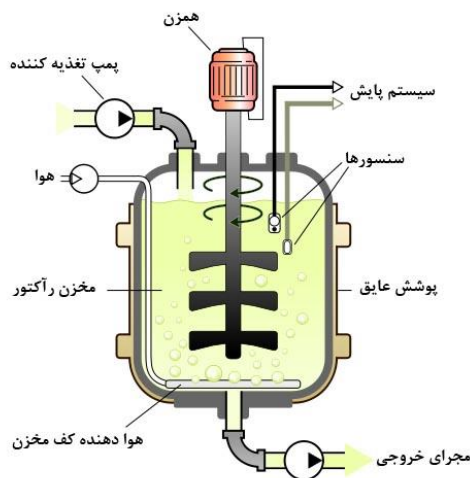
جدول ۷: غلظت ماده منفجره در خاک آلوده

ماده منفجره	غلظت (بر حسب میلی گرم ماده منفجره به کیلو گرم خاک)
TNT	۴۰۰۰-۱۰۰۰۰
RDX	۸۰۰-۱۹۰۰
HMX	۶۰۰-۹۰۰

دو روش آزمایش برای نمونه خاک آلوده به شرح ذیل انجام گرفت.

آزمایش اول - رآکتور رقیق کن خاک

در این آزمایش از ۴ رآکتور استفاده گردید. ابتدا مخلوط ۲۰ درصد از خاک آلوده در آب تهیه نموده سپس آنرا به درون مخزن رآکتورها تزریق می کنند. رآکتور ها را به دو گروه دو تایی تقسیم کرده در گروه دوم به مخلوط آب و خاک، شیره قند با نسبت ۰/۳ درصد حجمی اضافه می کنند. میزان تأمین هوا در روز به مدت ۱۰ دقیقه توسط یک پخش کننده هوا صورت می گرفت. خاک و آب نیز به صورت پیوسته با سرعت ۱۰۰ دور در دقیقه بوسیله یک مخلوط کن با یکدیگر ترکیب می شدند. غلظت آلودگی، رشد باکتری ها، PH و میزان اکسیژن به صورت هفتگی مورد پایش قرار گرفته و نتایج برای هر دو گروه از رآکتورها ثبت می شود.



شکل ۵: نحوه عملکرد رآکتور رقیق کن خاک

آزمایش دوم - روش کشاورزی^{۲۸}

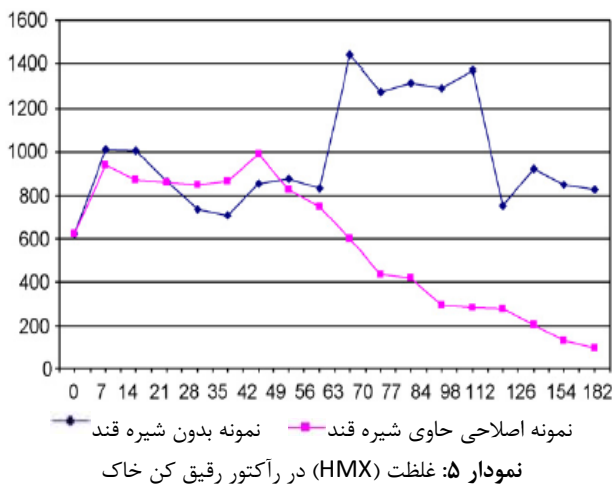
در این روش ۴ ظرف آلومینیومی به ابعاد $۸ \times ۳/۷۵ \times ۲/۳۷۵$ اینچ تهیه شده و هر کدام را درون یک ظرف فولادی به ابعاد $۲/۷ \times ۵/۲ \times ۹/۵$ اینچ قرار می دهند. انتهای ظروف کوچکتر منفذی درست می

مواد $\text{RDX}^{۲۴}$ و $\text{HMX}^{۲۵}$ می باشد [۱۳، ۱۴]. در گذشته روش های مورد استفاده برای دفع مواد زائد مهمات سازی شامل تلبار کردن در دریاها و زمین های خاص یا سوزاندن بوده که هر دو روش باعث آلودگی آب، خاک و هوا می گردد. هم چنین روش سوزاندن مستلزم مصرف انرژی برای حمل و نقل و خاکبرداری است. اخیراً روش های زیستی برای تصفیه خاک توصیه شده که شامل رآکتور رقیق کن خاک^{۲۶}، کمپوست سازی^{۲۷} و روش زیست پالایی گیاهی است. هر کدام از این روش های دارای مزایا و معایبی می باشد. رآکتور رقیق کن خاک، از روش مکانیکی همراه با عمل هوادهی به منظور انتقال بهینه مواد مغذی و الکترون های مورد نیاز جهت تصفیه استفاده می کند. در روش کمپوست سازی و کشاورزی، خاک آلوده با مواد مغذی و رطوبت ترکیب می شود و به صورت دوره ای به منظور هوادهی، خاک را به صورت مکانیکی زیر و رو می کنند. در روش کمپوست به منظور افزایش ساز و کار باکتری ها و بالا رفتن ظرفیت تجزیه آنها مواد مکمل حاوی کربن به خاک اضافه می کنند. در روش زیست پالایی از گیاهان برای انتقال آلودگی به توده گیاهی استفاده می کنند که پس از رشد و افزایش غلظت آلودگی در گیاه آن را درو کرده و در انتها تحت شرایط کنترل شده می سوزانند. سرعت تجزیه در رآکتور نسبت بقیه روش ها بیشتر است ولی این روش گران تر و نیاز به سرمایه گذاری بیشتری دارد، روش کشاورزی و کمپوست سازی هزینه کمتری نیاز دارند. روش کمپوست در تجزیه TNT مؤثر بوده ولی نیازمند مقادیر زیادی از بسترهای آلی طبیعی شامل کاه، تراشه چوب و کود حیوانی است که میزان تصفیه خاک بدین روش کند صورت می گیرد. به هر حال هر کدام از روش های مذکور در شرایط مخصوصی می توانند کاربردی باشند که می بایست قبل از اجرا به صورت دقیق ارزیابی شوند. به منظور شروع کار، خاک آلوده از کارخانه مذکور مورد نمونه برداری قرار گرفته و پس از آنالیز نمونه، مقادیر مواد منفجره موجود مطابق جدول زیر اعلام ارائه گردید. لازم به یادآوری است که این ترکیب یک تهدید کننده جدی برای سلامت انسان است از آنجایی که یک محرک پوستی است و منجر به اختلالات کبدی و تنفسی می گردد [۱].

27 Composting
28 Land Farming

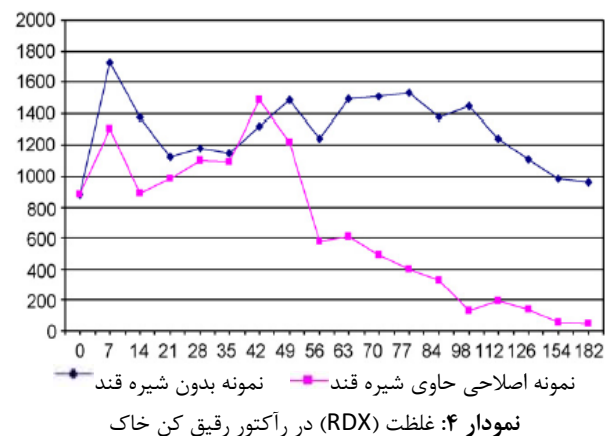
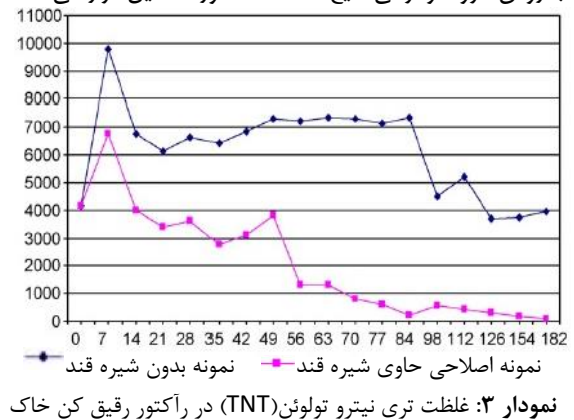
24 Hexahydro-1,3,5-trinitro-1,3,5-triazine
25 Octahydro-1, 3,5,7-tetranitro-1,3,5,7-tetrazocine
26 Soil slurry reactor

با انجام عملیات یاد شده و ترسیم نمودارهای تغییر میزان غلظت تری نیترو تولوئن در بازه های زمانی مختلف و پس از آن تجزیه و تحلیل نتایج مشخص گردید میکرو ارگانسیم های موجود در خاک بدون اضافه کردن ماده مغذی قادر به تجزیه TNT نمی باشند. بنابراین جهت افزایش سرعت عمل باکتری ها در فرآیند تجزیه از یک منبع حاوی کربن مانند شیره قند استفاده می کنند. شیره قند در مقایسه با دیگر منابع کربن (مانند گلوکز، استات و سیترات) قابلیت بیشتری در افزایش رشد و تکثیر باکتری ها دارد. بدین روش می توان میزان غلظت TNT موجود در خاک را پس از گذشت ۱۸۲ روز به کمتر از ۵۰ میلی گرم بر کیلوگرم کاهش داد یا به عبارت دیگر مقدار آن را تا ۹۹ درصد کاهش داد (نمودار ۳). این بررسی ها بر روی مواد منفجره RDX و HMX نیز انجام گرفته است، هرچند که میزان جداسازی مؤثر آنها به اندازه TNT نبوده است که شاید علت آن پیچیدگی شکل مولکولی آنها باشد (نمودارهای ۴ و ۵). البته مطالعاتی در این زمینه انجام شده که نشان دهنده قابلیت تجزیه RDX و HMX با صرف مدت زمان بیشتری می باشد.

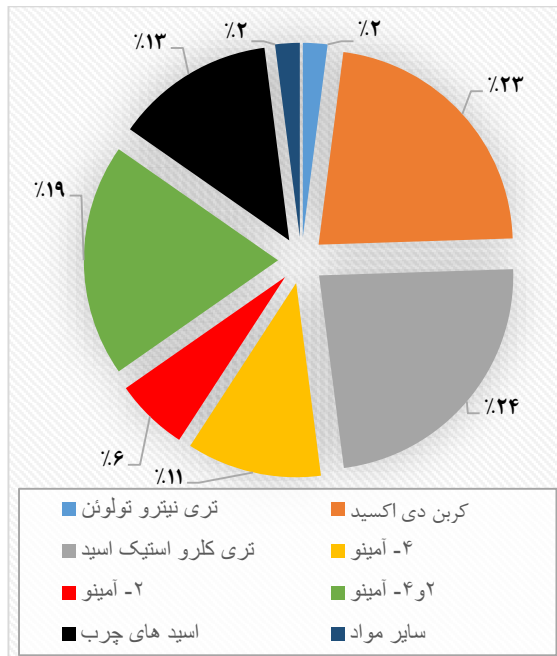


مطالعات تبدیل TNT به مواد معدنی با استفاده از کربن ۱۴ پس از گذشت ۴۹ روز از شروع آزمایش، مقدار ۲۰ میلی لیتر از دوغاب و ۱۰ گرم از خاک خشک تحت کشت را جدا نموده و نمونه ها را در مجاورت TNT برانگیخته شده (labeled TNT) حاوی کربن ۱۴ قرار می دهند تا پس از رسیدن به تعادل، کربن دی اکسید که محصول این متابولیت می باشد بدست آید [۱۳]. در این مطالعه با استفاده از روش پرتویابی، یک ماده شیمیایی حاوی یک یا چند اتم ناپایدار به نمونه اضافه می شود. این اتم های ناپایدار به دلیل قابلیتی که در

کند تا نشستی حاصل از آبیاری نمونه ها درون ظرف های بزرگتر جمع آوری شوند. هر کدام از ظروف کوچک محتوی ۳۰۰ گرم خاک آلوده است و طی مدت زمان دو هفته به میزان ۵۰۰ میلی لیتر به آنها آب داده می شود. پس از آن آب را از ظرف بزرگتر تخلیه کرده و برای مدت دو هفته دیگر خاک دوره خشک را طی می کند. در این روش نیز ظروف به دو گروه تقسیم شده و در گروه دوم هر هفته یکبار شیره قند با نسبت ۰/۳ درصد حجمی در زمان چرخه آبدهی اضافه می گردد. دوغاب بدست آمده از راکتور را درون دستگاه آون با دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد قرار می دهند تا خشک شود. سپس ۱ گرم از خاک خشک شده را با ۹ میلی گرم از استونیتریل مخلوط کرده (درون سرنگ) و بعد از آن مخلوط را به روش sonication به مدت ۱۸ ساعت مورد تجزیه قرار می دهند. پس از این مدت، ۳۰ دقیقه به مخلوط اجازه استراحت می دهند تا اجزای آن از یکدیگر تفکیک شوند. در ادامه ۱ میلی لیتر از ماده جدا شده (supernatant) را، با محلول ۵ گرم بر لیتر $CaCl_2$ برای مدت ۱۵ دقیقه ترکیب نموده و آن را داخل دستگاه سانتریفیوژ برای مدت ۵ دقیقه قرار می دهند تا اجزای آن از یکدیگر تفکیک شوند (سرعت ۱۰۰۰۰ دور بر دقیقه). در انتها ماده تجزیه شده حاصله را با روش کروماتوگرافی مایع (HPLC) مورد تحلیل قرار می دهند.

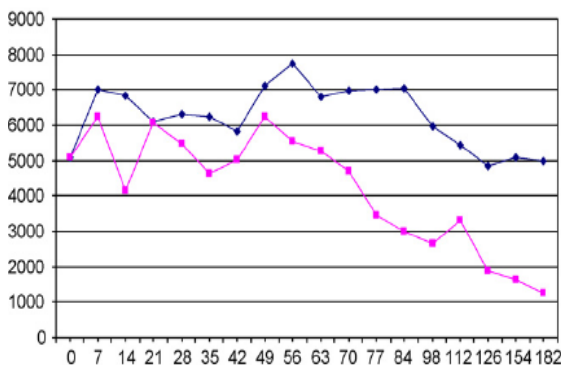


برانگیخته شده به مواد مداخله کننده و واسطه تبدیل شده است که نسبت به حالت تحت کنترلی بدون افزودن شیره قند میزان بیشتری از TNT به حالت معدنی تبدیل شده است.



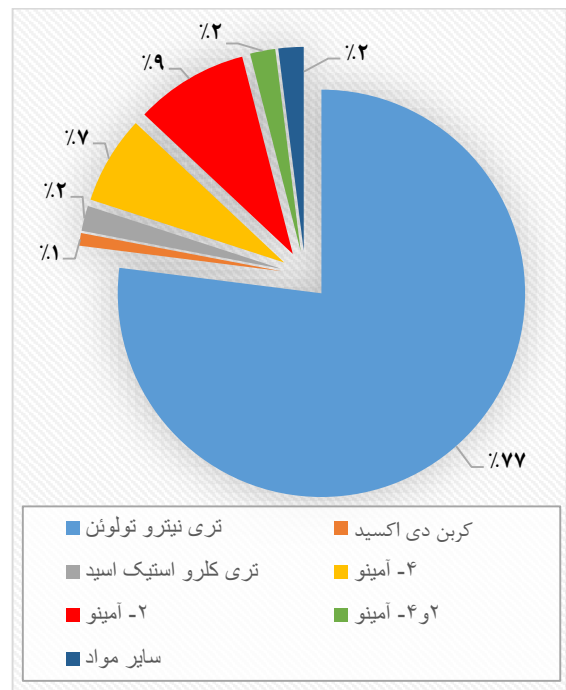
نمودار ۷: محصولات نهایی حاصل از افزودن TNT حاوی کربن ۱۴ به نمونه حاوی شیره قند راکتور رقیق کن خاک

نتایج بدست آمده از روش کشاورزی نیز مطابق نمودارهای زیر است. جهت انجام آزمایش، سه نمونه از هر ظرف برداشت شده و پس از تحلیل، میانگین داده ها به عنوان عدد نهایی در نمودار ۸ ثبت شده است. همانطور که ملاحظه می شود در حالتی که به نمونه شیره قند اضافه شود میزان افت TNT پس از گذشت ۱۸۲ روز به میزان ۱۲۵۰ میلی گرم بر کیلوگرم خاک رسیده که افت ۸۲٪ را نشان می دهد.



نمودار ۸: غلظت (TNT) در ظروف کشاورزی نمونه اصلاحی حاوی شیره قند - نمونه بدون شیره قند

و پاشی و تجزیه کردن ماده دارند با شناسایی سازوکار واکنش های شیمیایی انجام شده و دنبال کردن مسیری که رادیوایزوتوپ از زمان شروع واکنش تا رسیدن به محصول نهایی طی می کند مورد استفاده قرار می گیرند. معمولاً برای ردیابی این فعل و انفعالات بیوشیمیایی از رادیوایزوتوپ های هیدروژن، کربن، فسفر یا گوگرد استفاده می شود [۱۳]. در این آزمایش افزودن TNT برانگیخته شده حاوی کربن ۱۴ به دوغاب حاصل از راکتور درون یک رسیرومتر باعث می شود TNT با تبدیل شدن به تری کلرو استیک اسید تشکیل توده ای زیستی را داده و در نهایت ته نشین شود. ترکیبات موجود در ماده ته نشین شده همچنین میزان کربن دی اکسید مصرفی باکتری ها را بوسیله روش های طیف سنجی HPLC و Liquid Scintillation Spectrometer تعیین می کنند. هر قدر میزان بیشتری از کربن دی اکسید و تری کلرو استیک اسید در این روش تجزیه تولید شود می تواند نشان دهنده بالابودن ظرفیت متابولیت TNT باشد و این یعنی میزان کمتری از TNT حاوی کربن ۱۴ در محصول نهایی باقی خواهد ماند.



نمودار ۶: محصولات نهایی حاصل از افزودن TNT حاوی کربن ۱۴ به نمونه بدون شیره قند راکتور رقیق کن خاک

مطابق اطلاعات موجود در نمودارهای ۷ و ۸، افزودن TNT برانگیخته به توده موجود در راکتور موجب تغییر ماهیت و تبدیل TNT به مواد معدنی می شود. در نمودار حاوی شیره قند، افزودن آن موجب شد تا حدود ۲۳٪ آن تبدیل به کربن دی اکسید و ۲۳٪ به ماده معدنی (تری کلرو استیک اسید) تبدیل شود و در کل میزان ۹۸٪ مقدار TNT

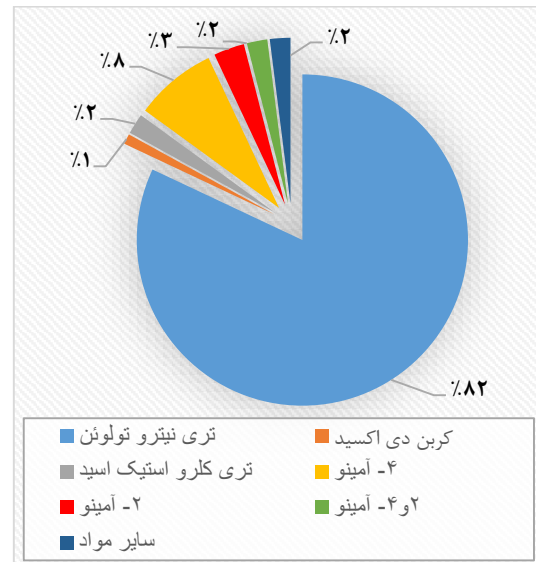
هر دو روش راکتور رقیق کن خاک و کشاورزی برای جداسازی TNT از خاک مؤثرند ولی سرعت عمل در روش راکتور بیشتر است ضمن اینکه در روش کشاورزی به جهت جلوگیری از ترشح شیرابه به درون خاک ایجاد لاینر بندی ضروری است. در هر دو روش از توانایی باکتری های موجود در خاک آلوده به منظور معدنی کردن TNT استفاده گردید. یکی از مزایای روش راکتوری این است که به صورت ساده راه اندازی می شود (فقط به یک مخلوط کن، منبع تولید هوا و منبع کربن نیاز دارد). شیره قند نیز یک منبع غنی از کربن بوده که بسیار ارزان است. روش راکتور تولید دوغاب روشی مؤثر و سریع برای تصفیه خاک آلوده به TNT است [۱۳].

نتیجه گیری

همانگونه که اشاره شد روش های مختلفی جهت انهدام مواد منفجره و مهمات وجود دارد که هر کدام دارای مزایا و معایبی می باشند. در بخش اول با عنوان "روش های انهدام و دفع مهمات"، ۷ روش مرسوم برای خنثی سازی شامل سوزاندن روباز، انفجار روباز، انفجار محبوس، سوزاندن در کوره های ثابت، سوزاندن در کوره های گردان، احتراق بسترهای سیار و سوزاندن در کوره های سیار تشریح گردید. انتخاب بهترین روش مقابله در خصوص خنثی سازی یا دفع مهمات به نوع و مقدار ماده منفجره بستگی دارد. مثلاً روش های روباز منجر به وارد شدن آلاینده های خطرناک به محیط زیست می شوند. شاید بتوان انفجار محبوس را به دلیل وابستگی به حضور عوامل انسانی در موقعیت و بکارگیری یک محفظه بسته تحت فشار به عنوان پر ریسک ترین روش در انهدام مهمات قلمداد نمود در حالی که استفاده از کوره های ثابت یا گردان علاوه بر جلوگیری از اتلاف انرژی که به دلیل بکارگیری لایه های عایق در جداره کوره می باشد با استفاده از فیلتر بر روی لوله خروجی، گازهای زیان آور را تحت کنترل در می آورد. البته می توان احتراق بسترهای سیال را یکی از ایمن ترین روش ها برای انهدام مهمات در نظر گرفت اما نباید از ریسک های مربوط به انتقال مهمات ها از انبار تا محل انهدام غافل شد.

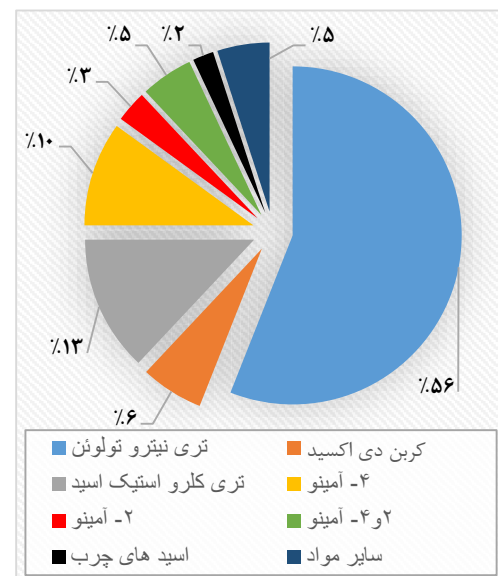
در بخش دوم با عنوان "کاربری مهمات منقضی در تولید مواد منفجره صنعتی"، مطابق با یافته های مطالعه Davit Khomeriki و همکاران در سال ۲۰۱۵ مشخص گردید برخی از مهمات منقضی شده قابلیت استفاده مجدد را دارند. در این زمینه ایجاد ترکیبات منفجره صنعتی جدید از طریق بکارگیری مواد سوختی جدا شده از موشک های نظامی که حاوی ترکیبات پیروکسیلین می باشند مورد تأکید است. ترکیب این پودر با آمونیوم نیترات و در شرایط تعادل اکسیژن صفر باعث می شود میزان گازهای سمی تولید شده به شدت کاهش یابد. مطابق با مطالعات اولیه، مواد منفجره مذکور قابلیت استفاده در : فعالیت های معدنی زیرزمینی، متلاشی کردن سنگ های با ابعاد بزرگ و متلاشی

همانند روش راکتور رقیق کن خاک ، TNT برانگیخته حاوی کربن ۱۴ به ظروف کشاورزی اضافه شده که نتایج حاصل از متابولیت آن به شرح نمودارهای ذیل (۹ و ۱۰) می باشد.



نمودار ۹: محصولات نهایی حاصل از افزودن TNT حاوی کربن ۱۴ به نمونه تحت کشت بدون شیره قند

افزودن TNT حاوی کربن ۱۴ به نمونه های تحت کشت باعث می شود میزان کربن دی اکسید تولیدی در نمونه دارای شیره قند ۶٪ شود در حالی که در نمونه بدون شیره قند این مقدار ۱٪ است. این موضوع نشان دهنده تأثیر منبع کربن در متابولیت TNT می باشد.



نمودار ۱۰: محصولات نهایی حاصل از افزودن TNT حاوی کربن ۱۴ به نمونه تحت کشت حاوی شیره قند

[۵] ف سیف، "بررسی روشهای ایمن تخلیه موشکهای سوخت جامد، انهدام یا بازیابی برخی از اجزاء سوخت،" تحقیقی و توسعه مواد پرانرژی، شماره ۱، صفحه ۱۱-۱۹، ۱۳۹۲.

[6] N J Duijm, "Hazard analysis of technologies for disposing explosive waste," *Journal of Hazardous Materials*, pp. 123-135, 2001.

[7] G An, Y Wang, W Li, J Liu, "Research on key designing parameters of destruction furnace for explosive waste," *Procedia Environmental Sciences*, pp.202-207, 2012.

[8] D Khomeriki, S Khomeriki, R Mikhelson, N Chikhradze, A Khvadagiani, "Production of Industrial Explosive Substances on the Basis of the Powder and Solid Rocket Fuel Released from the Utilization of the Expired Ammunition," *Procedia Earth and Planetary Science*, pp.738-741, 2015.

[9] K.G. Kolovos, "Waste ammunition as secondary mineralizing raw material in Portland cement production," *Cement & Concrete Composites*, pp.133-143, 2006.

[10] K G Brubakk, E L F Gjengedal, Ø Enger, K Sripada, "Ammunition Waste Pollution and Preliminary Assessment of Risks to Child Health from Toxic Metals at the Greek Refugee Camp Mavrovouni," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022.

[11] K Gębka, J Beldowski, M Beldowska, "The impact of military activities on the concentration of mercury in soils of military training grounds and marine sediments," *Environ Sci Pollut Res*, pp.23103-23113, 2016.

[12] J O. Hampton, M Laidlaw, E Buenz, J M. Arnemo, "Heads in the sand: public health and ecological risks of lead-based bullets for wildlife shooting in Australia," *Wildlife Research*, pp.287-306, 2018.

[13] B Clark, R Boopathy, "Evaluation of bioremediation methods for the treatment of soil contaminated with explosives in Louisiana Army Ammunition Plant, Minden, Louisiana," *Journal of Hazardous Materials*, pp. 643-648, 2007.

[14] W A. Alfaraj, B McMillan, A M. Ducatman, C L. Werntz III, "Tetryl exposure: forgotten hazards of antique munitions," *Annals of Occupational and Environmental Medicine*, 2016.

کردن سازه های ساختمانی را دارند.

در بخش سوم با عنوان "کاربری مهمات منقضی در تولید سیمان"، یافته های مطالعه K.G. Kolovos مورد بررسی قرار گرفت. این آزمایش در سال ۲۰۰۶ بر روی فشنگ های مصرف شده در یک میدان تیر انجام گرفت که هدف آن بررسی احتمال بکارگیری این اقلام به عنوان ماده خام در ساخت سیمان بود. نتایج نهایی مشخص نمود استفاده از این ترکیبات به صورت قابل توجهی در پخت مطلوب سیمان مؤثر هستند بدون اینکه بر روی کیفیت نهایی سیمان اثر منفی داشته باشد. آزمون انجام یافته بر روی شیرابه این نمونه نشان داد غلظت فلزات سنگین نیز در سطح پائین حفظ می شوند که نشان می دهد سیمان تولید شده به این روش سازگار با محیط زیست است ضمن اینکه با مصرف پسماندهای مواد منفجره در این روش منابع مصرفی در ساخت سیمان کاهش خواهد داشت.

بخش پایانی شامل تشریح دو روش زیست پالایی به نام های رآکتور رقیق کن خاک و روش کشاورزی به منظور تصفیه خاک آلوده به مواد منفجره در یک کارخانه مهمات سازی در لویزیانا بود که توسط Clark and Boopathy در سال ۲۰۰۷ انجام گرفته است. در این مطالعه نشان داده شد که خاک منطقه مطالعاتی حاوی غلظت بالایی از مواد تری نیترو تولوئن (TNT)، RDX و HMX بوده که با انجام تکنیک های یاد شده ثابت گردید که استفاده از روش رآکتور به همراه شیره قند که ماده ای بسیار غنی از کربن است باعث افزایش فعالیت باکتری های موجود در خاک می شود که می تواند به بالا رفتن میزان بازدهی جداسازی ماده TNT از خاک کمک کند ولی جداسازی RDX و HMX در هر دو روش به کندی انجام می گیرد.

مراجع

[1] S Letzel, Th Göen, M Bader, J Angerer, T Kraus, "Exposure to nitroaromatic explosives and health effects during disposal of military waste," *Occup Environ Med*, pp.483-488, 2003.

[2] J Wilkinson, D Watt, "Review Of Demilitarisation And Disposal Techniques For Munitions And Related Materials," 2006. pp. 4,5,22.

[۳] م سمنانی رهبر، م حبیبی، م یزدانفر، "روش انهدام مهمات، مواد منفجره و پیشرانها از طریق سوزاندن و انفجار،" فصلنامه مدیریت زنجیره تأمین، شماره ۳۱، صفحه ۵۶-۶۳، ۱۳۹۰.

[۴] اس. فورد هام، "مواد منفجره و پیشرانهای قوی،" صفحه ۶ و ۷، ۱۳۸۰.