

پالایش خاک‌های آلوده به بنزین در محیط‌های شهری با استفاده از روش واجذبی حرارتی

سعید گیتی‌پور^{۱*}، عماد صنعتی‌فروش^۲، نگار کرامتی^۳، پیمان یعقوب‌زاده^۴، مسعود رضایی^۵

۱. دانشیار مهندسی محیط‌زیست دانشکده محیط‌زیست دانشگاه تهران

Emad.sanati@gmail.com

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی محیط‌زیست دانشگاه تهران

negarkaramati@yahoo.com

۳. کارشناس ارشد مهندسی محیط‌زیست دانشگاه تهران

p.yaghoobzadeh@ut.ac.ir

۴. کارشناس ارشد مهندسی محیط‌زیست دانشگاه تهران

masrezaee@ut.ac.ir

۵. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی محیط‌زیست دانشگاه تهران

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۴/۱۲/۳

تاریخ وصول مقاله: ۹۳/۴/۸

چکیده

نشت بنزین و آلودگی خاک ناشی از آن به علت ارتباط مستقیم خاک با آب‌های زیرزمینی، منعی برای آلودگی آب و اتمسفر مجاور آن شده است و تهدیدی جدی برای سلامتی انسان‌ها به شمار می‌آید. در این تحقیق، خاک نمونه از اطراف پالایشگاه تهران جمع‌آوری و در غلظت‌های ۴۰۰۰ ppm و ۱۰۰۰۰ ppm با بنزین آنالیز شد. به منظور بررسی اثر دما و زمان ماند در غلظت بنزین در خاک از روش واجذبی حرارتی با دمای پایین (LTDD) در دماهای ۹۰، ۱۱۰ و ۱۵۰ درجه سلسیوس و زمان‌های ماند ۱۰، ۲۰ و ۲۵ دقیقه استفاده شد. پس از انجام آزمایش‌ها نمونه‌ها از طریق دستگاه کروماتوگرافی گازی آنالیز شدند. نتایج آنالیز نمونه‌ها نشان داد که حداکثر درصد حذف آلاینده از خاک ۹۴/۵ درصد برای نمونه‌هایی با غلظت ۴۰۰۰ ppm در دمای ۱۵۰ درجه سلسیوس و زمان ماند ۲۵ دقیقه به دست آمد. همچنین، نتایج آزمایش‌ها حاکی از این بود که افزایش دما و درجه حرارت موجب افزایش حذف بنزین از نمونه‌های خاک شد. با توجه به درصد‌های بالای حذف بنزین از نمونه‌های آزمایش شده می‌توان نتیجه گرفت که پالایش خاک به طریق واجذبی حرارتی روشی مؤثر برای حذف هیدروکربن‌های نفتی از قبیل بنزین برای خاک‌های آلوده به شمار می‌آید.

کلیدواژه

آلودگی خاک، آلاینده‌های نفتی، نشت بنزین، واجذبی حرارتی.

۱. سرآغاز

شود که سلامت انسان را به خطر می‌اندازد (Deshpande, et al., 1999; Whyte, et al., 2001). آلودگی خاک به هیدروکربن‌های نفتی از جمله معضلات مهم زیست‌محیطی به شمار می‌رود (عالی، ۱۳۸۲; Dobler, et al., 2000; Juhász and Naidu, 2000). ورود هیدروکربن‌های نفتی به داخل خاک می‌تواند در اطراف پالایشگاه‌ها، جایگاه‌های سوخت‌گیری، لوله‌های انتقال، مخازن ذخیره نفت و فرآورده‌های نفتی صورت گیرد. نشت ترکیبات نفتی در لایه‌های مختلف زمین، آب‌های زیرزمینی و آب‌های

توسعه روزافزون استفاده از ترکیبات نفتی در تولید صنعتی سالیانه مقادیر شایان توجهی زوائد خطرناک تولید می‌کند که این زوائد اغلب به آلودگی محیط‌زیست منجر می‌شوند (Rittman and McCarty, 2001; Gitipour, et al., 2014). طی سال‌های اخیر نیاز شدید جوامع به سوخت‌های فسیلی و ترکیبات شیمیایی صنعتی موجب شده است که بخشی از این‌گونه ترکیبات به هوا، خاک و آب رها شده و سبب ایجاد خطرهای بالقوه زیست‌محیطی

توجه به شرایط خاک و غلظت آلاینده‌ها ممکن است از یک یا چند روش برای پاک‌سازی خاک استفاده شود (U.S.EPA, 1993). روش‌های پاک‌سازی محوطه‌های آلوده به روش‌های محلی و خارج از محل^۲ آلوده طبقه‌بندی می‌شوند (تقی‌زاده، ۱۳۸۵). روش واجذبی حرارتی^۳ روشی خارج از محل است که در آن از حرارت برای تبخیر و جداسازی آلاینده‌ها از خاک استفاده می‌شود (Troxler, et al., 1993). استفاده از روش حرارتی اولین بار در دهه ۱۹۸۰ میلادی به منظور پاک‌سازی سایت‌های آلوده به آلاینده‌های خطرناک از آمریکا آغاز شد (U.S.EPA, 1992). در این روش با استفاده از حرارت و گرما، تغییر فیزیکی در آلاینده‌ها به وجود آمد که سبب جدایی آلاینده‌ها از خاک و سایر محیط‌های آلوده می‌شود (U.S.EPA, 2003; FRTR, 2009). روش حرارتی با دمای پایین^۴ (LTTD) یکی از روش‌های جداسازی حرارتی است که در آن دما حداکثر تا ۴۰۰ درجه سلسیوس افزایش می‌یابد (Araruna, et al., 2004) و معمولاً بین ۹۰ تا ۳۱۵ درجه سلسیوس محدود می‌شود (Sparr and Bjorklund, 2000; Falciglia, et al., 2011; U.S.EPA, 1999). در شکل ۱ تجهیزات LTTD در مقیاس اجرایی نشان داده شده‌اند.

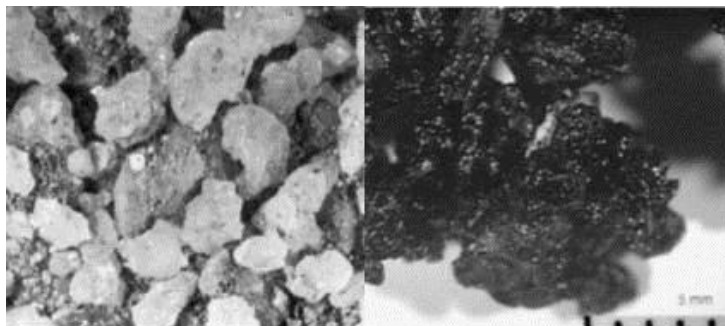
سطحی موجبات آلودگی آب و خاک را فراهم می‌کند (EPA, 1995). در ایالات متحده آمریکا حدود ۷۵۰۰۰۰ مخزن ذخایر زیرزمینی مواد سوختی وجود دارد که اکثر آن‌ها در حال نشست‌اند (EPA, 2000). همچنین، سالانه بیش از ۲ میلیون تن نفت در جهان تولید می‌شود که حدود ۱۰ درصد از آن در حوادث مختلف از قبیل شکستن خطوط انتقال یا نشست از تانک‌های ذخیره وارد محیط‌زیست می‌شود (Ewies, et al., 1998). در ایران، پالایشگاه نفت تهران که در جنوب تهران واقع شده و متعلق به سازمان تولید و پخش فرآورده‌های نفتی ایران است به تولید بنزین و انتقال آن به پمپ بنزین‌های سطح تهران می‌پردازد. این پالایشگاه به دلیل سیستم ذخیره‌سازی فرآورده‌های نفتی و خطوط لوله فرسوده، سبب آلودگی‌های زیست‌محیطی فراوانی در جنوب تهران شده است که از جمله آن‌ها می‌توان به آلودگی خاک و آب‌های زیرزمینی منطقه به هیدروکربن‌های نفتی اشاره کرد (Gitipour, et al., 2008). متداول‌ترین آلاینده‌های نفتی شامل بنزین، نفت، گازوییل، حلال‌های کلردار، بنزن، تولوئن، اتیل بنزن، زایلین و هیدروکربن‌های چندحلقه‌ای^۱ هستند (Mouton, et al., 2009).

انتخاب راه‌حل برای پاک‌سازی خاک‌های آلوده به هیدروکربن‌های نفتی، به عوامل متعددی بستگی دارد که با



شکل ۱. تجهیزات LTTD

می‌شوند، اما سوزانده و از بین نمی‌روند (Bonnard, et al., 2010; U.S.EPA, 1994). با حرارت دادن خاک‌های آلوده در این روش آلاینده‌های با نقطه جوش پایین به گاز تبدیل و از خاک جدا می‌شوند. این تبخیرات سپس جمع‌آوری و به بخش تصفیه فرستاده می‌شوند (George, et al., 1995). در شکل ۲ نمونه‌ای از خاک آلوده به هیدروکربن‌های نفتی قبل و پس از اصلاح با روش LTDD نمایش داده شده است.



شکل ۲. تصویری از خاک آلوده (سمت راست) و خاک پاک‌سازی شده به روش LTDD (سمت چپ) (۱۸)

خاک از اعماق ۱۰ تا ۳۰ سانتی‌متر برداشت شدند و پس از انتقال به آزمایشگاه، آزمایش تعیین رطوبت روی آن‌ها صورت گرفت. سپس، نمونه‌های خاک برای تعیین خصوصیات ژئوتکنیکی آن‌ها از قبیل دانه‌بندی، حدود اتربرگ، طبقه‌بندی خاک و میزان مواد آلی آزمایش شدند. برای انجام این آزمایش‌ها از استانداردهای ذکر شده در جدول ۱ استفاده شد.

با توجه به تعریف ارائه شده از سوی سازمان حفاظت محیط‌زیست آمریکا روش جداسازی حرارتی LTDD، روشی کاربردی برای جداسازی مواد آلی از پسماندهای پالایشگاهی، پسماندهای قطران، پسماندهای تصفیه چوب، همچنین خاک‌های آلوده به هیدروکربن‌ها، پسماندهای مخلوط (رادایواکتیو و خطرناک)، پسماندهای حاصل از ساینده‌های سنتتیک و محصولات رنگرزی است (Uyesugi, et al., 1994). در این روش آلاینده‌ها تبخیر

هدف از این تحقیق بررسی اثر دما، زمان‌های ماند مختلف و غلظت بنزین در میزان حذف آن با استفاده از روش واجذبی حرارتی با دمای پایین به منظور اصلاح خاک‌های آلوده در اطراف پالایشگاه تهران است.

۲. مواد و روش‌ها

نمونه‌های خاک از اطراف پالایشگاه تهران در منطقه باقرشهر جمع‌آوری شدند. برای این منظور، نمونه‌هایی از

جدول ۱. استانداردهای استفاده شده در برداشت نمونه و آزمایش‌های اولیه

| آزمایش | استاندارد | منبع |
|--------------------------|---------------------|--------------------------|
| نمونه‌برداری از خاک | U.S.EPA Method 5035 | (McGuire et al., 2014) |
| تعیین رطوبت خاک | ASTM D2216 | (Gitipour et al., 2014) |
| تعیین میزان مواد آلی خاک | ASTM D 2974 | (Gitipour et al., 2014) |
| تعیین دانه‌بندی خاک | ASTM D 422-63 | (Gitipour et al., 2014) |
| اندازه‌گیری حدود اتربرگ | ASTM D4318-05 | (Di Matteo et al., 2009) |



شکل ۳. ظرف واکنش (الف: محفظه واکنش، ب: دماسنج داخلی، ج: دماسنج گاز خروجی و د: چگالنده)

دماهای ۹۰، ۱۱۰ و ۱۵۰ درجه سلسیوس بود. دماهای آزمایش به گونه‌ای انتخاب شدند که بتوانند معرف کل بازه نقطه جوش بنزین باشند، به طوری که دماهای بالا و نزدیک به ۲۲۵ درجه به دلیل دشواری در رسیدن به این دماها استفاده نشدند. ابتدا ۸ آزمایش در دماهای ۹۰ و ۱۵۰ درجه سلسیوس و زمان ماند ۱۰ و ۲۵ دقیقه انجام شد که نتایج آن حاکی از حذف قابل قبول در آزمایش با دما و زمان ماند بالاتر (به ترتیب ۱۵۰ درجه سلسیوس و ۲۵ دقیقه) و بازه حذف کم در دما و زمان (به ترتیب ۹۰ درجه سلسیوس و ۱۰ دقیقه) کم بود. همچنین، آزمایش‌ها در سه زمان ماند ۱۰، ۲۰ و ۲۵ دقیقه انجام گرفت. مشخصات نمونه‌های آزمایش که در مجموع ۱۸ آزمایش است، در جدول ۲ آورده شده است.

برای آلوده کردن نمونه‌های خاک از یک نمونه بنزین (با چگالی ۰/۷۲ گرم بر سانتی متر مکعب) از پمپ بنزینی واقع در تهران تهیه و به منزله آلاینده استفاده شد. مقادیری از این آلاینده، هر یک جداگانه به دو نمونه خاک یک کیلوگرمی اضافه و به کمک یک میله شیشه‌ای تمیز در ظرفی در بسته به مدت ۱۰ دقیقه مخلوط شدند تا غلظت نمونه‌های خاک به ۴۰۰۰ ppm و ۱۰۰۰۰ ppm برسد.

برای انجام آزمایش‌های واکنشی حرارتی با دمای پایین از یک راکتور شیشه‌ای مطابق شکل ۳ که دارای یک محفظه واکنش و دو دماسنج برای اندازه‌گیری دمای داخل محفظه و گاز خروجی و چگالنده برای جمع‌آوری گازهای خروجی بود استفاده شد.

در این پژوهش دمای آزمایش به منظور افزایش بازه حذف در محدوده نقطه جوش بنزین (۲۲۵-۴۰) و در

جدول ۲. مشخصات آزمایش واکنشی حرارتی نمونه‌های خاک آلوده به بنزین

| شماره نمونه | غلظت اولیه آلاینده (ppm) | دماهای آزمایش (درجه سلسیوس) | زمان‌های ماند (دقیقه) |
|-------------|--------------------------|-----------------------------|-----------------------|
| ۱ - ۹ | ۴۰۰۰ | ۹۰، ۱۱۰ و ۱۵۰ | ۱۰، ۲۰ و ۲۵ |
| ۲ - ۱۸ | ۱۰۰۰۰ | ۹۰، ۱۱۰ و ۱۵۰ | ۱۰، ۲۰ و ۲۵ |

دردار منتقل شدند و درون یخچال قرار گرفتند. روش استخراج بنزین از خاک بر مبنای متد U.S.EPA SW846-

پس از انجام آزمایش‌های واکنشی حرارتی نمونه‌های خاک از درون فلاسک آزمایش به درون ظروف شیشه‌ای

۳. بحث و نتایج

۱.۳. مشخصات خاک

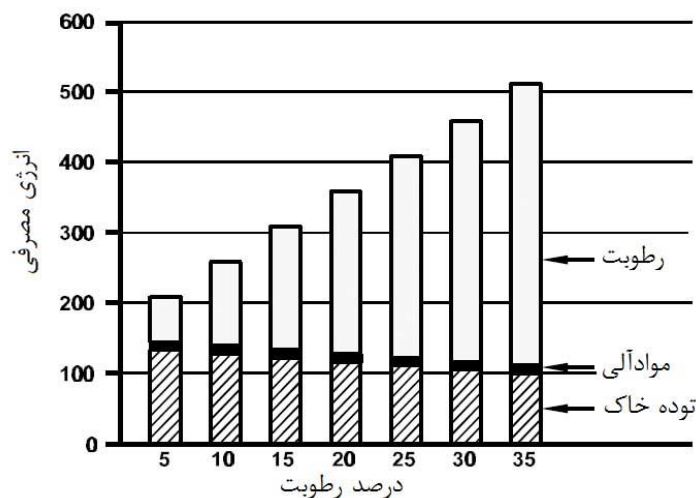
در جدول ۳ نتایج آزمایش دانه بندی به صورت درصد ذرات مختلف خاک نشان داده شده است. بر اساس سیستم طبقه بندی متحده و نتایج ارائه شده در جدول ۳، خاک استفاده شده در آزمایش‌ها از نوع ML (لایم‌ساده‌دار) است.

جدول ۳. درصد ذرات خاک

| نوع ذرات | شن | ماسه | لای | رس |
|----------|----|------|-----|----|
| درصد | ۱۸ | ۲۸ | ۴۶ | ۸ |

میزان رطوبت خاک از اثرگذارترین پارامترهای حاکم بر واجذبی حرارتی است (Camel, 2000). در بسیاری از تحقیقات رطوبت بهینه بین ۱۰ تا ۲۰ درصد و در برخی منابع میزان آن ۱۷ درصد در نظر گرفته شده است (Schreier, et al., 1999; Pal, et al., 1998; Brusseau, et al., 1991). طی پروسه حرارت‌دهی، ابتدا خاک خشک می‌شود، سپس آلاینده‌های آن تبخیر می‌شوند، بنابراین با افزایش رطوبت در مدت زمان طولانی تری به درصد حذف ثابتی می‌رسد و همان‌گونه که در شکل ۴ نشان داده شده است، میزان انرژی بیشتری برای خشک کردن خاک با رطوبت بالا نیاز است (U.S.EPA, 2003). متوسط رطوبت ۳ نمونه خاک در این تحقیق ۱۵ درصد بوده است که در بازه بهینه قرار می‌گیرد.

(METHOD 8260B (1986) است. قبل از آغاز استخراج نمونه‌ها، تمامی ابزارها و ظروف شیشه‌ای استفاده شده پس از شستشو با آب و خشک شدن آن‌ها، با استفاده از حلال متانول شستشو شدند، سپس درون آن در دمای ۱۵۰ درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت قرار گرفتند. سپس، یک گرم از خاک آلوده درون ظرف شیشه‌ای در دار ریخته و دو گرم سولفات سدیم برای حذف آب نمونه به آن اضافه شد. یک میلیه نازک فلزی برای اختلاط خاک و سولفات سدیم استفاده شد. سپس دو سی سی از حلال متانول از طریق سرنگ مخصوص (سرنگ با حجم پنج سی سی) روی نمونه اضافه شد. پس از آن ظرف حاوی محلول به مدت ۱۰ دقیقه درون دستگاه اولتراسونیک قرار گرفت تا سبب تسهیل در جدا شدن بنزین از خاک و حل شدن آن در حلال شود. سپس برای جدا کردن کامل آلاینده از خاک، ظرف حاوی نمونه به مدت دو دقیقه درون دستگاه سانتریفیوژ قرار گرفت. پس از این مرحله یک سی سی از محلول بالای خاک از طریق سرنگ برداشته و درون ظرف شیشه‌ای دردار منتقل و تا زمان تزریق به دستگاه کروماتوگرافی گازی (GC) درون فریزر نگهداری شد. دستگاه کروماتوگرافی استفاده شده، ساخت شرکت Unicam از نوع مدل سری ۶۱۰ با آشکارساز یونازیسین شعله‌ای (GC FID) بوده است.

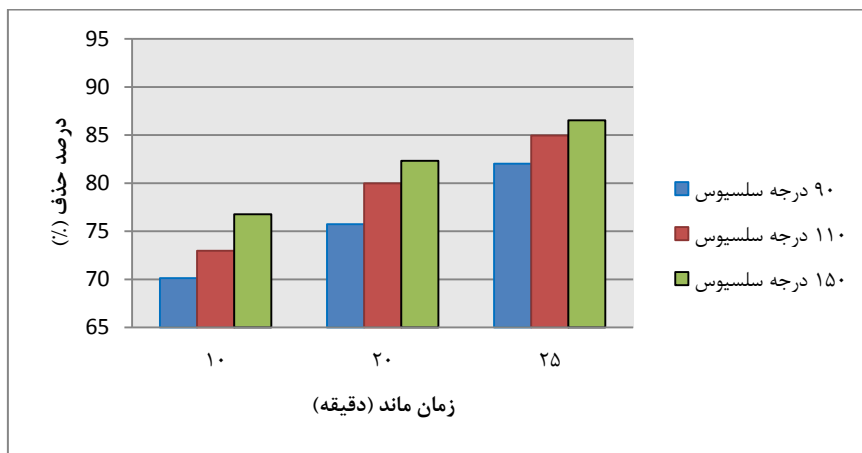


شکل ۴. میزان انرژی مورد نیاز با توجه به میزان رطوبت خاک

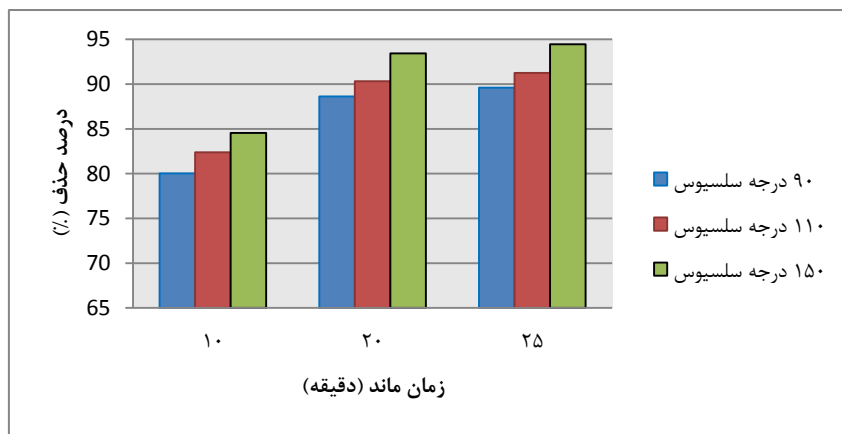
۲.۳. درصد حذف بنزین

شکل‌های ۵ و ۶ درصد حذف بنزین برای نمونه‌های خاک با غلظت‌های ۴۰۰۰ ppm و ۱۰۰۰۰ ppm را نمایش می‌دهند. همان‌گونه که در اشکال زیر نشان داده شده است، کمترین مقدار حذف بنزین از خاک، ۷۰/۱ درصد برای نمونه با غلظت ۱۰۰۰۰ ppm در زمان ماند ۱۰ دقیقه و دمای

آزمایش ۹۰ درجه سلسیوس و بیشترین مقدار حذف آن (۹۵/۴۵ درصد) مربوط به نمونه با غلظت ۴۰۰۰ ppm در زمان ماند ۲۵ دقیقه و دمای ۱۵۰ درجه سلسیوس است که بر درصد حذف بیشتر بنزین برای نمونه‌های با غلظت کمتر و زمان ماند و دمای آزمایش بیشتر دلالت دارد.



شکل ۵. درصد حذف بنزین از نمونه‌هایی با غلظت ۱۰۰۰۰ ppm



شکل ۶. درصد حذف بنزین از نمونه‌هایی با غلظت ۴۰۰۰ ppm

۳.۳. اثر دما و زمان ماند

همان‌گونه که در اشکال بالا نشان داده شده است، با افزایش زمان ماند خاک بازده حذف آلاینده از خاک نیز افزایش یافت. در نمونه‌های با غلظت ۴۰۰۰ ppm، حذف بنزین در بازه زمانی بین ۲۰ تا ۲۵ دقیقه به حداکثر خود رسید که همان زمان حذف بهینه بنزین برای نمونه‌های

خاک است. با توجه به روند حذف در اشکال می‌توان نتیجه‌گیری کرد که زمان ماند ۲۵ دقیقه بیشترین بازده حذف بنزین (۹۴/۵ درصد) در نمونه‌های با غلظت ۴۰۰۰ ppm است. در نمونه‌های با غلظت ۱۰۰۰۰ ppm، همان‌گونه که در شکل ۵ مشخص است بیشترین بازده حذف بنزین در درجه حرارت ۱۵۰ درجه سلسیوس و

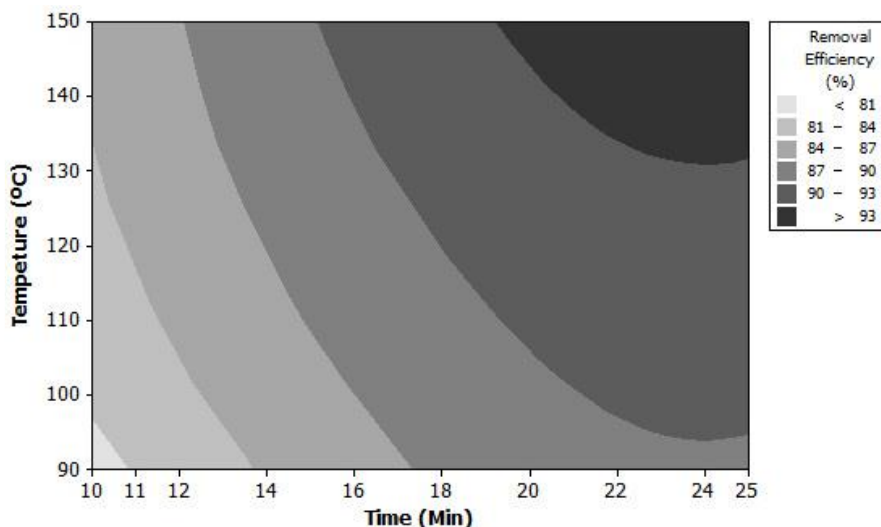
همکاران (۱۹۹۵) درهم‌کنش خاک و آلاینده‌های حلقوی (PAHs) را بررسی کردند. نتایج آزمایش‌های این محققان نشان داد که دمای مورد نیاز برای حذف PAHها از خاک به منظور رسیدن به درصد‌های حذف قابل قبول در محدوده دمای جوش این آلاینده‌هاست.

با مقایسه درصد حذف در نمونه‌هایی با غلظت ppm ۴۰۰۰ و ۱۰۰۰۰ می‌توان به راحتی دریافت که با افزایش غلظت آلاینده نیاز به زمان ماند بالاتر و دمای بالاتری برای دستیابی به درصد حذف برابر داریم که به دلیل بیشتر بودن مقدار آلاینده در خاک است.

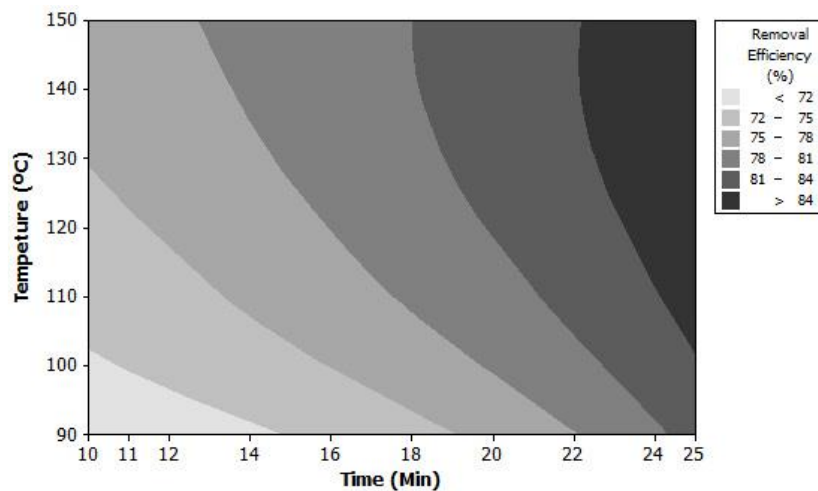
به منظور پیش‌بینی درصد حذف بنزین از خاک از طریق روش واجذبی حرارتی با دمای پایین در بازه دماهای بین ۹۰ تا ۱۵۰ درجه سلسیوس و زمان‌های ماند ۱۰ تا ۲۵ دقیقه شکل‌های ۷ و ۸ که حاصل درون‌یابی نتایج از طریق نرم‌افزار Minitab نسخه ۱۶ است رسم شده است. با کمک این شکل‌ها می‌توان دما و زمان ماند را برای دستیابی به درصد حذف مورد نیاز در فرایند پالایش خاک به دست آورد. برای مثال، بر اساس شکل ۷، به منظور دستیابی به درصد حذفی در بازه ۹۰ تا ۹۳ درصد در خاک‌هایی با آلودگی ppm ۴۰۰۰، فرایند واجذبی حرارتی باید در ۱۰۰ درجه سلسیوس و زمان ماند ۲۲ دقیقه یا در ۱۵۰ درجه سلسیوس و زمان ماند ۱۸ دقیقه انجام شود.

زمان ماند ۲۵ دقیقه صورت پذیرفت که حاکی از حذف ۸۷ درصد جهت این آلاینده‌هاست. به طور کلی، می‌توان گفت که در تمامی آزمایش‌ها، با افزایش زمان ماند، درصد حذف بنزین افزایش داشته است. مشابه این نتایج در تحقیق Falciglia و همکاران (۲۰۱۱) روی پنج نمونه خاک در زمان‌های ماند ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ دقیقه روی آلاینده دیزل، نیز به دست آمد. نتایج آزمایش‌های این محققان نشان می‌دهد که قسمت عمده‌ای از هیدروکربورها در مدت ۱۸ دقیقه از خاک حذف شدند (Falciglia, et al., 2011). علت چنین دستاوردی را می‌توان به فراریت بیشتر آلاینده‌ها در زمان‌های ماند طولانی‌تر و پاک‌سازی بهتر خاک در چنین زمان‌هایی نسبت داد.

نتایج آزمایش‌های این تحقیق همچنین حاکی از همسوبودن درصد حذف بنزین و دمای آزمایش در تمامی نمونه‌هاست. برای نمونه افزایش دمای آزمایش واجذبی خاک از ۹۰ به ۱۵۰ درجه سلسیوس موجب افزایش تنها ۵ درصد حذف بنزین در زمان ماند ۲۵ دقیقه برای نمونه‌های بالا شد. در کل می‌توان گفت با انتخاب دمای پاک‌سازی خاک در بازه ۹۰ تا ۱۵۰ درجه از آنجا که در محدوده نقطه جوش بنزین (۲۲۵-۴۰) (Troxler, et al., 1993) قرار دارد و از اکثر ترکیبات بنزین بیشتر است، می‌توان به درصد حذف مناسبی دست یافت. در پژوهشی Maguire و



شکل ۷. پیش‌بینی درصد حذف بنزین از نمونه‌هایی با غلظت ppm ۴۰۰۰



شکل ۸. پیش‌بینی درصد حذف بنزین از نمونه‌هایی با غلظت ۱۰۰۰۰ ppm

۴. نتیجه‌گیری

به طور متوسط به درصد حذفی بیشتر از ۹۰ درصد افزایش یابند. برای خاک‌های آلوده به غلظت‌های بالاتر از ppm ۴۰۰۰ برای دسترسی به بازده حذف بیشتر از ۹۰ درصد به افزایش دما یا زمان ماند به بالاتر از ۱۵۰ درجه سلسیوس و ۲۵ دقیقه نیاز است. نتایج بالا همچنین دلالت بر کارایی بالای روش واجذبی حرارتی در حذف هیدروکربن‌های فرار از خاک‌های آلوده دارند و این روش را می‌توان در مقیاس‌های اجرایی برای پالایش خاک‌های آلوده به ترکیبات نفتی توصیه کرد.

یافته‌های به دست آمده از حذف بنزین با روش واجذبی حرارتی نشان داد که افزایش دمای آزمایش‌ها از ۹۰ به ۱۱۰ و ۱۵۰ درجه سلسیوس سبب افزایش حذف بنزین در نمونه‌های خاک آلوده شد. نتایج آنالیزهای خاک همچنین بر حذف بیشتر هیدروکربن‌های فرار در زمان‌های ماند طولانی‌تر دلالت دارد. برای مثال، برای نمونه‌های با غلظت ppm ۱۰۰۰۰ متوسط درصد حذف از ۷۴ به ۸۴/۵ درصد افزایش یافت. یافته‌های آزمایش‌های اصلاح نمونه‌های خاک با غلظت ppm ۴۰۰۰ نیز این مشاهدات را با روش واجذبی حرارتی تأیید می‌کنند. همچنین، داده‌های آزمایش‌ها نشان می‌دهند که برای رسیدن به درصد حذف مناسب هیدروکربن‌های فرار به زمان ماند بیشتری نسبت به غلظت‌های پایین نیاز است. به طوری که خاک‌های آلوده به بنزین با غلظت ppm ۴۰۰۰ و زمان ماند ۲۵ دقیقه می‌توانند

یادداشت‌ها

1. PAHs, Poly Aromatic Hydrocarbon
2. In-situ and Ex-Situ
3. TD, Thermal Desorption
4. Low Temperature Thermal Desorption

منابع

- تقی زاده، غ. ۱۳۸۵. «تصفیه خاک‌های آلوده به ترکیبات نفتی به روش دفع حرارتی در درجه حرارت پایین با استفاده از امواج مایکروویو»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد دانشگاه تربیت مدرس تهران، ایران.
- عالی، ه. ۱۳۸۲. «پاک‌سازی خاک‌های آلوده به مواد نفتی با استفاده از روش خاک‌شویی»، تهران، ایران: پایان‌نامه کارشناسی ارشد، بخش مهندسی عمران - محیط‌زیست، دانشگاه تربیت مدرس.

- Araruna Jr, J. T., V. L. O. Portes, A. P. L. Soares, M. G. Silva, M. S. Sthel, D. U. Schramm, S. Tibana, and Vargas ,H. 2004. Oil spills debris clean up by thermal desorption, *Journal of hazardous materials* 110, no. 1, pp. 161-171.
- Bonnard, M., Devin, S., Leyval, C., Morel, J. L., & Vasseur, P. 2010. The influence of thermal desorption on genotoxicity of multipolluted soil. *Ecotoxicology and environmental safety*, 73(5), pp. 955-960.
- Brusseau, M., Jessup L., Rao, S.C. 1991. Non-equilibrium Sorption of Organic Chemicals: Elucidation of Rate-limiting Processes. *Environmental Science & Technology*, Vol. 25, pp. 134-142.
- Camel, V. 2000. Microwave-assisted solvent extraction of environmental samples. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 19(4), pp. 229-248.
- Waste Management, Vol. 15, pp. 407-416.
- Deshpande, S., Shiao, B.J., Wade, D., Sabatini, D.A. & Harwell, J.H. 1999. Surfactant Selection For Enhancing Ex-Situ Soil Washing. *Wat. Res.*, Vol. 33, pp. 351-360.
- Di Matteo, L., Bigotti, F., & Ricco, R. 2009. Best-fit models to estimate modified proctor properties of compacted soil. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 135(7), pp. 992-996.
- Dobler, R., Saner, M. and Bachofen, R. 2000. Population Changes of Soil Microbial Communities Induced by Hydrocarbon & Heavy Metal Contamination. *Bioremediation*, Vol. 4, pp. 41-56.
- EPA. 1995. 542-K-94-003. properties of Surfactants: Appendix, C.
- EPA. 2000. 510-B-00-003. Financial Responsibility For Underground Storage Tanks: A Reference Manual.
- Ewies, J.B., Ergas, S.J., Chang, D.P.V. & Schroeder, E.D. 1998. *Bioremediation Principles*, McGraw-Hill Book Company Europe.
- Falciglia, P.P., Giustra, M.G. and Vagliasindi, F.G.A. 2011. Low-temperature thermal desorption of diesel polluted soil: Influence of temperature and soil texture on contaminant removal kinetics. *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 185, pp. 392-400.
- FRTR. 2009. Ex-Situ Soil remediation Technology "Thermal Desorption". <http://WWW.FRTR.gov>. [Online].
- George, C. E., Azwell, D. E., Adams, P. A., Rao, G. V., & Averett, D. E. 1995. Evaluation of steam as a sweep gas in low temperature thermal desorption processes used for contaminated soil clean up. *Waste management*, 15(5), 407-416.
- Gitipour, S., Narenjkar, K., Sanati Farvash, E., & Asghari, H. 2014. Soil flushing of cresols contaminated soil: application of nonionic and ionic surfactants under different pH and concentrations. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 12(1), 129.
- Gitipour, S., Taheri, E., Heidarzadeh, N., Givehchi, S. 2008. Assessment of clean up levels due to inhalation of polyaromatic hydrocarbons in contaminated soils. *Asian Journal of Chemistry*. 20(2), pp.1599-608.
- Juhasz, A.L and Naidu, R. 2000. Bioremediation of High Molecular Weight Polycyclic Aromatic Hydrocarbons: A Review of The Microbial Degradation of Benzo[a]pyrene. *International Biodeterioration & Biodegradation*, Vol. 45, pp. 57-88.
- McGuire, M. E., Schaefer, C., Richards, T., Backe, W. J., Field, J. A., Houtz, E., & Higgins, C. P. 2014. Evidence of remediation-induced alteration of subsurface poly- and perfluoroalkyl substance distribution at a former firefighter training area. *Environmental science & technology*, 48(12), pp. 6644-6652.
- Mouton, J, Mercier, G, Blais, J.F. 2009. Amphoteric surfactants for PAH and lead polluted- soil treatment using flotation. *Water, Air, and Soil Pollution*. 197(1-4), pp.381-93.
- Pal, D., Fann, S., Wight, S. 1998. *Application Guide for Thermal Desorption Systems* (No. NFESC-TR-2090-ENV). Naval Facilities Engineering Service Center Port Hueneme CA.
- Rittman, B.E. and McCarty, P.L. 2001. *Environmental Biotechnology Principles & Application*. Singapore. McGraw-Hill.
- Schreier, C. G., Walker, W. J., Burns, J., & Wilkenfeld, R. 1999. Total organic carbon as a screening method for petroleum hydrocarbons. *Chemosphere*, 39(3), pp. 503-510.
- Sparr E. C., Bjorklund E. 2000. Analytical-Scale Microwave-Assisted Extraction. *Chromatography A*, Vol. 902, pp. 227-250.
- Troxler, W. L., Cudahy, J. J., Zink, R. P., Yezzi Jr, J. J., & Rosenthal, S. I. 1993. Treatment of nonhazardous petroleum-contaminated soils by thermal desorption technologies. *Air & Waste*, 43(11), pp. 1512-1525.

- U.S.EPA. 1986. Test Methods for Evaluating SolidWaste, Physical/Chemical Methods, SW-846. Method 8270: Semivolatile OrganicCompounds. Washington, DC: US Environmental Protection Agency.
- U.S.EPA. 1992. 504/R-92/074. Guide for Conducting Treatability Studies Under CERCLA"Thermal Desorption Remedy Selection".
- U.S.EPA. 1993.625/R-93/013. Approaches for the Remediation of Federal Facility Sites Contaminated with Explosive or Redioactive Wastes.
- U.S.EPA. 1994. 540/S-94/501. Thermal Desorption Treatment.
- U.S.EPA. 1999. 540-k-99-007. Underatanding Oil Spill and Oil Spill Respons.
- U.S.EPA. 2003. 542-F-96-005. A Guide to Thermal Dosorption.
- Uyesugi, D. F.,Walter, W., Kovalick, J. R. 1994. Remediation Technologies Screening Matrix and Reference Guide, Second edition. DOD Environmental Technology Transfer Committee, October.
- Whyte, L.G., Goalen, B., Hawari, J., Labbe, D., Greer, C.W., Nahir, M. 2001. Bioremediation Treatability Assessment of Hydrocarbon-Contaminated Soils From Eureka, Nunavut.Cold Region Science & Technology, Vol. 32, pp. 121-132.