

پاکسازی خاک آلوده به ترکیبات نفتی با استفاده از روش جامدسازی و تثبیت (مطالعه موردی: شهرک صنعتی سلفچگان)

سعید مردان^{۱*}، سعید گیتی‌پور^۲ و محمدعلی عبدلی^۳

۱. دانشجوی دکترای مهندسی محیط زیست، مواد زائد جامد، دانشکده محیط‌زیست، دانشگاه تهران

۲. دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران (gitipour@ut.ac.ir)

۳. استاد، گروه مهندسی عمران، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران (mabdoli@ut.ac.ir)

تاریخ وصول مقاله: ۱۳۹۵/۱۰/۱۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۵/۰۳

چکیده

در این تحقیق عملکرد فرایند تثبیت و جامدسازی در حذف آلودگی خاک آلوده به ترکیبات نفتی از طریق سیمان و آهک و خاک رس اصلاح‌شده (آلی دوست) بررسی و سعی شد بهترین ترکیب در بین نمونه‌های بررسی‌شده، به‌ویژه از نظر نشت آلاینده‌ها، تعیین شود. مطالعات رفتار نشتی آلاینده‌ها در فرایند تثبیت و جامدسازی خاک آلوده به ترکیبات نفتی در محل دفع پسماندهای شهرک صنعتی سلفچگان نشان داد که مخلوط خاک آلوده، رس اصلاح‌شده و سیمان و آهک، سبب تثبیت اکثر آلاینده‌های موجود در این خاک شده است. همچنین، نتایج بررسی‌های انجام‌شده حکایت از آن داشت که نمونه حاوی ۲۰ درصد سیمان و ۳۰ درصد رس اصلاح‌شده در زمان‌گیری ۲۸ روز بهترین کارایی را به‌لحاظ پارامترهای مختلف مؤثر بر کارایی روش جامدسازی و تثبیت در بین نمونه‌های مختلف داشته است. علاوه بر این، بررسی توأم آزمایش اسکن میکروسکوپ الکترونی و آزمایش نشت نشان داد که دو دلیل در افزایش کارایی نمونه‌های جامد شده مؤثر بوده است: یکی بالا رفتن میزان رس اصلاح‌شده که سبب افزایش قدرت جذب هیدروکربن‌های نفتی می‌شود، و دیگری کاهش حجم منافذ در ماتریس که سبب کاهش میزان نشت شده است.

کلیدواژه

آزمایش نشت، تثبیت و جامدسازی، خاک‌های آلوده نفتی، رس اصلاح‌شده، میزان کل هیدروکربن‌های نفتی، هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای.

۱. سرآغاز

(Krishna & Gupta, 2008; Yarlagadda et al., 1995;)
Ouhadi and Amiri, 2011). از سوی دیگر، تثبیت و جامدسازی آلاینده‌های هیدروکربن‌های نفتی و فلزات سنگین فناوری‌ای در ممانعت از انتقال آلاینده‌ها به لایه‌های زیرین خاک و آب‌های زیرزمینی شناخته شده است (U.S. Department of Commerce Springfield, 1993; Kogbara et al., 2016). فرایند تثبیت و جامدسازی با محصورکردن آلاینده فلز سنگین، همچنین با تمهیداتی، هیدروکربن‌های نفتی را در مقیاس ماکروسکوپی و

در سال‌های اخیر، توجه به کنترل آلودگی ترکیبات نفتی به موضوعی بااهمیت برای حفاظت از محیط‌زیست تبدیل شده است (Ahmadi et al., 2016). خاک‌های آلوده به هیدروکربن‌های نفتی و فلزات سنگین از مشکلات و معضلات محیط‌زیستی است. لذا، پاکسازی این خاک‌ها به‌لحاظ استانداردهای محیط‌زیستی و بهداشتی ضرورت دارد و باید در دستور کار دست‌اندرکاران قرارگیرد

۲. مواد و روش‌ها

در این تحقیق، تمرکز اصلی بر عملکرد تثبیت و جامدسازی در حذف آلودگی خاک رنگبر مستعمل واحدهای تصفیه دوم روغن موتور (و آلوده به هیدروکربن‌های نفتی) از طریق سیمان و آهک زنده در حضور خاک رس اصلاح شده (آلی دوست) است.

در مرحله نخست، خصوصیات پسماندهای صنایع تصفیه دوم روغن مستقر در شهرک صنعتی سلفچگان و مواد مورد استفاده در فرایند تثبیت و جامدسازی (شامل سیمان و آهک زنده، خاک رس معمولی و خاک رس اصلاح شده) تعیین شده است. در این راستا، نمونه برداری از محل دفع پسماندهای شهرک صنعتی سلفچگان به روش پیشنهادی آژانس حفاظت محیط زیست آمریکا (U.S.EPA, 1994) صورت پذیرفت. پسماندهای این محل (با مساحت ۴ هکتار که فقط مربوط به دیو و دفع پسماندهای خاک رنگبر مستعمل واحدهای تصفیه دوم روغن مستقر در این شهرک است)، از نظر میزان کل هیدروکربن‌های نفتی، میزان هیدروکربن‌های آروماتیک، فلزات سنگین، pH و رطوبت بررسی شد. در این مرحله همچنین، روی خاک آلوده محل، آزمایش‌هایی نظیر دانسیته، رطوبت، توزیع اندازه ذرات، حدود آتربرگ^۱ (حد روانی و حد خمیری) و غلظت آلاینده‌های نفتی صورت گرفت.

مرحله دوم تحقیق حاضر دربرگیرنده بررسی خصوصیات نشت نمونه‌های جامد شده پسماند صنایع تصفیه دوم روغن با ترکیبات افزوده شده و در حالت‌ها و تحت شرایط مختلف است که با استفاده از آزمایش TCLP و مقاومت فشاری آزاد، همچنین بررسی ریزساختار نمونه‌های جامد شده به لحاظ ریخت‌شناسی با استفاده از اسکن میکروسکوپ الکترونی روی نمونه‌های جامد شده انجام شده است.

۳. مواد مصرفی، نمونه برداری و تهیه نمونه‌ها

مواد مصرفی در این مطالعه عبارت است از سیمان پرتلند

میکروسکوپی با جذب آلاینده‌ها و جداسازی ترکیبات مشخصی از مواد آلاینده از مواد زائد ترکیبات پایدارتری را می‌سازد که نشت آلاینده‌ها از آنها در حداقل ممکن است (U.S. Department of Commerce Springfield, 1993). همچنین، خاک‌های رسی اصلاح شده (آلی دوست) به واسطه سطح مخصوص و ظرفیت تبادل کاتیونی زیاد، امکان مناسبی برای تبادل کاتیونی ایجاد می‌کند و در این راستا در نگهداری آلاینده هیدروکربن نفتی یا فلز سنگین ظرفیت چشمگیری دارد (Yarlagadda et al., 1995; Sevim & Guner, 2005; Ouhadi et al., 2012; Pique & Vazquez, 2013). شایان ذکر است به فرایندهای تثبیت و جامدسازی علاوه بر دلایل محیط‌زیستی، به دلیل در دسترس بودن مواد جامدکننده‌ای نظیر سیمان و مواد سیمانی (آهک، خاکستر بادی، سرباره کوره و جزآن) و مؤثر بودن از نظر اقتصادی در دو دهه گذشته به طور فزاینده‌ای توجه شده است (Park, 1999; Chena et al., 2009). با وجود تحقیقات وسیعی که در زمینه پایدارسازی نگهداری آلاینده‌ها به کمک موادی نظیر سیمان یا آهک صورت گرفته است (Conner, 1990; Desogus et al., 2013; Conner & Hoeffner, 1998)، به بررسی ریزساختاری نحوه فرایند اندرکنش سیمان-آلاینده هیدروکربن نفتی یا فلز سنگین، همچنین حذف عوامل محل فرایند هیدراسیون سیمان یا آهک با اجرای روش‌های تثبیت مواد آلاینده خاص (نظیر تثبیت هیدروکربن‌های نفتی) قبل از جامدسازی ماده آلاینده توجه محدودی شده است (Al-ansary & Al-ansary, 2007; Schifano et al., 2007; Taba, 2007). بر این اساس، هدف این پژوهش، بررسی نحوه فرایند اندرکنش سیمان-آهک-خاک رس اصلاح شده و آلاینده هیدروکربن نفتی و آلاینده فلز سنگین از منظر ریزساختار، همچنین بررسی نشت آلاینده از ماتریس جامد شده و به دست آوردن درصد اختلاط بهینه مواد تثبیت کننده و جامدکننده به لحاظ بهترین کارایی از جنبه‌های مختلف (مقاومت فشاری آزاد، ریزساختار، میزان نشت و جزآن) در روش جامدسازی و تثبیت است.

استفاده می‌شود تا برای آنالیزهای دیگر (شامل هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه‌ای و فلزات سنگین) استفاده شود.

خلاصه مراحل نمونه‌برداری مطابق با دستورالعمل مذکور به ترتیب زیر است. شایان ذکر است که روش نمونه‌برداری منتخب برای محل دفع و دیوی پسماندهای شهرک سلفچگان، روش نمونه‌برداری تصادفی ساده است. ۱. شبکه‌بندی محدوده مورد نیاز در تعیین غلظت

آلاینده هدف (شکل ۱)

۲. نمونه‌برداری از محوطه به تعداد لازم (در مورد تحقیق حاضر نمونه‌های برداشتی اولیه به نام نمونه‌های B5 و A7, E13, E10, E7, E5, E3, F12, F8, G6, G4

نام‌گذاری شد؛ شکل ۱)

۳. آنالیز تعداد محدودی از نمونه‌ها و محاسبه میانگین و انحراف معیار آن و تعیین تعداد نمونه‌های لازم با توجه به آنالیزهای آماری

۴. تهیه نمونه مخلوط با مخلوط کردن میزان مشخصی از هر یک از نمونه‌ها برای دستیابی به نمونه‌ای مرکب و معرف. تمامی نمونه‌ها تا زمان انجام آزمایش، در یخچال و در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد نگهداری شد.

معمولی، خاک رنگ‌بر مستعمل آلوده، خاک‌رس اصلاح‌شده (آلی دوست)، آهک زنده آزمایشگاهی، حلال‌ها و سایر مواد لازم برای انجام آزمایش‌ها.

لازم به ذکر است خاک‌رس اصلاح‌شده و مورد نیاز برای این طرح از محصولات کارخانه فرآورده‌های رسی جنوب واقع در ایالات متحده آمریکا از دفتر این کارخانه در کشور چین خریداری شد. آب یون‌زدایی‌شده و مورد استفاده در تهیه نمونه‌ها و ساخت محلول‌ها نیز از آب حاصل از ستون تبادل یونی واقع در آزمایشگاه معتمد آراین فن آزما تأمین شد. سایر حلال‌ها و مواد شیمیایی مورد نیاز نیز از تولیدات شرکت Merck است.

به منظور تعیین مقدار هیدروکربن‌ها در خاک آلوده موجود در محل دیوی پسماندهای شهرک سلفچگان، شاخص مقدار کل مواد نفتی^۲ شاخص اصلی و هدف مورد توجه است. برای نمونه‌برداری نیز دستورالعمل سازمان حفاظت محیط‌زیست آمریکا استفاده شد (U.S.EPA, 1994). لازم به ذکر است هدف از نمونه‌برداری، دستیابی به حداقل تعداد نمونه‌های لازم به گونه‌ای است که نماینده کل خاک آلوده موجود در محل باشد. علاوه بر این، پس از تعیین حداقل نمونه‌ها، از آن در تهیه نمونه‌ای مخلوط



Sample	Latitude	Longitude	Sample	Latitude	Longitude
1	34°30'16.71"	50°26'19.03"	7	34°30'14.70"	50°26'21.07"
2	34°30'16.88"	50°26'20.24"	8	34°30'16.09"	50°26'23.27"
3	34°30'16.66"	50°26'21.46"	9	34°30'16.49"	50°26'25.36"
4	34°30'16.16"	50°26'24.82"	10	34°30'13.06"	50°26'20.30"
5	34°30'14.22"	50°26'18.40"	11	34°30'12.51"	50°26'21.82"
6	34°30'14.42"	50°26'19.86"	-	-	-

شکل ۱. شبکه‌بندی محدوده مورد نیاز در تعیین غلظت آلاینده هدف در محل دفع پسماندهای شهرک صنعتی سلفچگان

مخلوط و پس از آن سیمان پرتلند و آهک زنده به مخلوط خاک آلوده و خاک رس اصلاح شده اضافه شد. همچنین، به منظور تکمیل فرایند هیدراسیون سیمان، همچنین آهک، نمونه‌های تهیه شده به مدت ۲۸ روز بدون تماس با هوای آزاد نگهداری شد. لازم به توضیح است که پس از جامدسازی و تثبیت، آزمایش‌های مقاومت فشاری تک‌محوره و تعیین سمیت^۳ روی نمونه‌ها انجام شد. نتایج آن در ادامه متن ارائه شده است.

برای تثبیت و جامدسازی خاک آلوده به هیدروکربن‌های نفتی، شانزده نمونه (از نمونه مرکب تهیه شده) با ترکیب درصد‌های مختلف سیمان، آهک زنده و خاک رس اصلاح شده ترکیب شد. جدول ۱ ترکیب درصد این مواد را در نمونه‌های مورد اشاره نشان می‌دهد. نحوه ترکیب مواد مختلف نیز به این صورت بود که برای جذب مؤثر هیدروکربن‌های نفتی، نخست خاک رس اصلاح شده به مدت ۲۰ دقیقه با خاک آلوده مورد تحقیق

جدول ۱. طرح اختلاط و برآورد وزن مواد مورد نظر در انجام آزمایش‌های جامدسازی و تثبیت طرح

وزن کل نمونه خشک (گرم)	سیمان یا آهک		رس آلی دوست		وزن خاک آلوده (گرم)	علامت اختصاری نمونه
	وزن سیمان یا آهک (گرم)	نسبت به خاک آلوده (درصد)	وزن رس آلی دوست (گرم)	نسبت رس به آلاینده (درصد)		
۷۶/۸	۱۲/۸	۰/۲	۰	۰	۶۴	C20
۸۲/۸۲	۱۳/۷	۰/۲	۵/۱۲	۰/۰۸	۶۴	C20M8
۸۸/۳	۱۴/۷	۰/۲	۹/۶	۰/۱۵	۶۴	C20M15
۹۹/۸	۱۶/۶	۰/۲	۱۹/۲	۰/۳	۶۴	C20M30
۸۳/۲	۱۹/۲	۰/۳	۰	۰	۶۴	C30
۸۹/۹۲	۲۰/۸	۰/۳	۵/۱۲	۰/۰۸	۶۴	C30M8
۹۵/۷	۲۲/۱	۰/۳	۹/۶	۰/۱۵	۶۴	C30M15
۱۰۸/۱۶	۲۴/۹۶	۰/۳	۱۹/۲	۰/۳	۶۴	C30M30
۷۶/۸	۱۲/۸	۰/۲	۰	۰	۶۴	L20
۸۲/۸۲	۱۳/۷	۰/۲	۵/۱۲	۰/۰۸	۶۴	L20M8
۸۸/۳	۱۴/۷	۰/۲	۹/۶	۰/۱۵	۶۴	L20M15
۹۹/۸	۱۶/۶	۰/۲	۱۹/۲	۰/۳	۶۴	L20M30
۸۳/۲	۱۹/۲	۰/۳	۰	۰	۶۴	L30
۸۹/۹۲	۲۰/۸	۰/۳	۵/۱۲	۰/۰۸	۶۴	L30M8
۹۵/۷	۲۲/۱	۰/۳	۹/۶	۰/۱۵	۶۴	L30M15
۱۰۸/۱۶	۲۴/۹۶	۰/۳	۱۹/۲	۰/۳	۶۴	L30M30
۱۴۴۹/۴	۲۸۹/۷۲	-	۱۳۵/۶۸	-	۱۰۲۴	جمع

- علامت اختصاری C برای نمونه‌های جامد شده با سیمان و علامت اختصاری L برای نمونه‌های جامد شده با آهک به کار رفته است.

همچنین، برای اطلاعات مربوط به خصوصیات شیمیایی رس اصلاح شده (نوعی مونتموریلونیت اصلاح شده) از رس اصلاح شده‌ای با عنوان تجاری Clayton R40 (که در آن نمک چهارگانه آمونیوم با نام دی متیل دی (هیدروژن) تالو^۴ به عنوان عامل اصلاح این رس بوده) از برگه اطلاعات فنی استفاده شد که شرکت تولیدکننده آن (شرکت فرآورده‌های رسی جنوب) ارائه کرده است.

۵. نتایج و یافته‌ها

نتایج آزمایش‌های صورت گرفته روی خاک آلوده مورد نظر بیانگر آن بود که میزان رطوبت خاک ۱۲/۲۶ درصد و چگالی ویژه خاک ۱/۲۲ است. همچنین، شاخص خمیری خاک ۵/۰۷ به دست آمد. با توجه به اعداد حد روانی و شاخص پلاستیسیته به دست آمده، مشخص شد که خاک آلوده مورد نظر در این تحقیق از نظر دانه بندی در کلاس خاک چسبنده تا خاک آلی (خاک دارای مواد آلی با غلظت بالا) با نفوذپذیری پایین قرار دارد. pH خاک هم تقریباً در حد خنثی بود و در مجموع این خاک سنگین تلقی می‌شود. بررسی میزان و نوع ترکیبات آلی خاک از جمله ضروریاتی است که نحوه استفاده از آن و تصفیه و پاک سازی آن را در فرایندهای بعدی تعیین می‌کند؛ بدین معنا که اگر خاک دارای مواد آلی و آلاینده‌های فراوان (نظیر هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای) باشد، باید پیش از استفاده در فرایند تثبیت و جامدسازی از مواد آلی مزاحم عاری شود. بدین منظور، خاک مورد استفاده در آزمایش‌ها از این نظر بررسی شد که نتایج آن به این ترتیب است. لازم به ذکر است آنالیز پنج نمونه تصادفی نخست از یازده نمونه برداشتی از محل، برای انجام تحلیل آماری و دستیابی به تعداد نمونه‌های لازم مطابق روش ذکر شده در بخش ۴ انجام گرفت (جدول ۲).

۴. روش‌های آزمایشگاهی استفاده شده

آنالیز کل هیدروکربن‌های نفتی در این طرح با روشی مشابه روش C 8015 سازمان حفاظت محیط‌زیست آمریکا (U.S.EPA, 2007) انجام شد. همچنین، برای آنالیز فلزات سنگین موجود در نمونه مخلوط خاک آلوده محل نیز از روش B 3050 سازمان حفاظت محیط‌زیست آمریکا (U.S.EPA, 1996) استفاده شد. لازم به ذکر است این آزمایش‌ها در آزمایشگاه آنالیز دستگاهی آزمایشگاه معتمد آریین فن آزما (آزمایشگاه معتمد سازمان حفاظت محیط‌زیست) در تهران به انجام رسید. آزمایش تعیین سمیت یا نشت تی سی آل پی سمیت نیز مطابق با دستورالعمل ۱۳۱۱ سازمان حفاظت محیط‌زیست آمریکا (U.S.EPA, 1992) انجام شده است. برای آزمون مقاومت نمونه‌های جامد شده خاک آلوده، از دستگاه مقاومت فشاری در آزمایشگاه دانشگاه تهران استفاده شد. حداکثر ظرفیت نیروی این دستگاه ۵۰ کیلونیوتن و دارای هفت وضعیت مختلف حساسیت اعمال نیروست. سرعت اعمال نیرو بنا به نوع مصالح قابل تنظیم است. نمونه‌هایی که این آزمایش روی آن انجام گرفت، شامل نمونه‌های جامد شده خاک آلوده به هیدروکربن‌های نفتی با زمان گیرایی ۲۸ روز بوده است.

سایر آزمایش‌ها که دربرگیرنده خصوصیات فیزیکی خاک آلوده است، مطابق با روش‌های ذیل در آزمایشگاه دانشگاه صنعتی قم انجام شد:

- رطوبت طبیعی خاک به روش ASTM D 2216 (۱۹۹۸)
- دانسیته ذرات خاک به روش ASTM D854 (۲۰۱۰ و b۲۰۱۰)
- حدود آتبرگ خاک (حد مایع و حد پلاستیک) به روش ASTM D4318
- pH خاک به روش ASTM D4972 (۲۰۰۷)

جدول ۲. غلظت کل هیدروکربن‌های نفتی در نمونه‌های برداشتی

غلظت کل هیدروکربن‌های نفتی (میلی گرم بر کیلوگرم)	شماره نمونه‌های خاک آلوده (خاک رنگ بر مستعمل)
۲۳۷۸۵۴	G4
۲۰۶۷۷۸	F8
۲۲۷۴۵۰	E5
۱۹۵۹۹۴	F12
۲۱۱۸۹۵	A7
۲۱۵۹۹۴	میانگین
۱۶۶۶۴	انحراف معیار

مقادیر غلظت ترکیبات فوق در خاک آلوده به مراتب بیش از سطوح قابل قبول پالایشی است. از این رو، خاک رنگ‌بر مستعمل دیپوشده در محل دفع پسماندهای شهرک صنعتی سلفچگان پتانسیل آلودگی زیادی از نظر میزان مواد نفتی دارد. به بیان دیگر، مقدار دامنه دیزل تقریباً ۴۳۲ برابر حد مجاز و بیانگر این نکته است که پالایش و پاک‌سازی خاک آلوده این سایت برای رسیدن به حد مجاز ضرورت دارد.

با توجه به نبود حد مجاز و استاندارد در کشور برای سطوح مجاز پاکسازی آلاینده‌ها در خاک، برای مقایسه با سطوح مجاز آلاینده‌ها در خاک آلوده در سایت مورد مطالعه (جدول ۳)، مقادیر غلظت مجاز معادل ۵۰۰ میلی گرم بر کیلوگرم برای میزان کل هیدروکربن‌های نفتی و بر اساس سطوح مجاز پالایش سایر کشورها استفاده شد. با توجه به نتایج آنالیزهای ارائه شده در تمامی نمونه‌ها،

جدول ۳. سطح پاکسازی خاک برای کل میزان هیدروکربن‌های نفتی در مناطق صنعتی

نام ترکیبات نفتی	حد مجاز (mgkg ⁻¹)	مرجع	نام ترکیبات نفتی	حد مجاز (mgkg ⁻¹)	مرجع
Diesel 2/crankcase oil	۱۱۲۰		GRO > C6-C10	۱۴۰۰	Schlichting et al. (2017)
3 and 6 fuel oil	۸۹۰		DRO > C10-C25	۱۰۲۵۰	
Kerosence and Jet fuel	۱۸۱۰		PRO > C25-C36	۱۰۰۰۰	
Mineral oil dielectric fluid	۳۰۴۰	NMED (2006)			
Unknown oil	۲۰۰		TPH-GRO	۵۱۰	
Waste oil	۵۰۰		TPH-DRO	۵۱۰	LDEQ (2003)
Gasoline	ناچیز		TPH-ORO	۲۵۰۰	
GRO > C6-C12	۵۰۰		F1: C6-C10	۳۲۰	
DRO > C12-C28	۲۵۰۰	Thompson (2007)	F2: C10-C16	۲۶۰	CCME (2008)
ORO > C28-C35	۵۰۰۰		F3: C16-C34	۲۵۰۰	
Total TPH	۵۰۰		F4: >C34	۶۶۰۰	
Mineral oil	۵۰۰۰	Ministerie van Volkshuisvesting (2000)	TPRH	۲۷۰۰	DWM (2005)

- GRO, gasoline range organics; DRO, disel range organics; ORO, oil range organics; PRO, residual range organics

خاک دارای pH بیش از ۷ برای تمامی فلزات سنگین استفاده شد. با توجه به نتایج آنالیزهای ارائه شده مشخص شد مقادیر غلظت فلزات سنگین در خاک آلوده این سایت کمتر از مقادیر حد مجاز پاکسازی خاک در مناطق تجاری است. از این رو، خاک رنگ بر مستعمل دپوشده در محل دفع پسماندهای شهرک صنعتی سلفچگان پتانسیل آلودگی از نظر فلزات سنگین ندارد

برای آنالیز فلزات سنگین موجود در نمونه معرف (مرکب مخلوط) خاک رنگ بر مستعمل محل دفع پسماندهای شهرک صنعتی سلفچگان، آنالیز فلزات سنگین نیز روی نمونه معرف اندازه گیری شد (جدول ۴). همچنین، برای مقایسه با سطوح مجاز آلاینده ها در خاک آلوده در سایت مورد مطالعه، مقادیر حدود پاکسازی خاک سازمان حفاظت محیط زیست کشور برای مناطق تجاری با

جدول ۴. غلظت فلزات سنگین در نمونه معرف (مرکب)

ردیف	عنوان آزمایش	واحد	نتیجه	مقادیر حدود پاکسازی خاک سازمان حفاظت محیط زیست کشور برای خاک با pH بالاتر از ۷ در مناطق صنعتی
۱	آهن	mg/kg	۹۷۴/۱۱۶	-
۲	باریم	mg/kg	۱۷۴۵	۱۰۰۰۰
۳	استرانسیم	mg/kg	-	-
۴	بور	mg/kg	-	-
۵	لیتیم	mg/kg	-	-
۶	آلومینیم	mg/kg	-	-
۷	جیوه	mg/kg	-	۳۰۰
۸	سرب	mg/kg	۲۲/۱	۲۵۰۰
۹	کروم	mg/kg	۱/۶۷۸	۴۶۰۰
۱۰	کبالت	mg/kg	۵/۹۰۳	۵۰۰
۱۱	کادمیم	mg/kg	۱/۲۷۳	۱۰۰
۱۲	مولیبدنیم	mg/kg	-	۱۰۰۰
۱۳	منگنز	mg/kg	۲۱۶/۷۵	-
۱۴	مس	mg/kg	۶/۶۵۵	۱۰۰۰۰
۱۵	نیکل	mg/kg	۷/۵۲۸	۷۶۰۰
۱۶	سلنیم	mg/kg	-	۲۹۰۰
۱۷	آرسنیک	mg/kg	-	۲۰۰
۱۸	وانادیم	mg/kg	-	۷۰۰
۱۹	روی	mg/kg	۳۸/۵۰۴	۱۰۰۰۰۰
۲۰	قلع	mg/kg	-	-
۲۱	بیسموت	mg/kg	-	-
۲۲	نقره	mg/kg	-	۱۵۰۰

سلفچگان، آنالیز مربوطه نیز روی نمونه معرف اندازه‌گیری شد (جدول ۵).

علاوه بر این، برای آنالیز هیدروکربن‌های آروماتیکی چندحلقه‌ای موجود در نمونه معرف (مرکب مخلوط) خاک رنگ‌بر مستعمل محل دفع پسماندهای شهرک صنعتی

جدول ۵. نتایج آزمایش‌های آنالیز هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه‌ای روی نمونه معرف

ردیف	عنوان آزمایش	واحد	نتیجه	مقادیر حدود پاکسازی خاک سازمان حفاظت محیط‌زیست کشور برای خاک با pH بالاتر از ۷ در مناطق صنعتی
۱	Naphthalene(N)	mg/kg	<۰/۵	۷۰
۲	Acenaphthylene(Acl)	mg/kg	۸/۹	۴۰
۳	Acenaphthene(Ace)	mg/kg	۱۱/۲	۲۰۰
۴	Fluorene(F)	mg/kg	۷/۶	۴۷۰۰
۵	Phenanthrene(P)	mg/kg	<۰/۵	۶۰۰
۶	Anthracene(An)	mg/kg	<۰/۵	۲۰۰۰
۷	Fluoranthene(Fl)	mg/kg	۲۱/۱	۲۰۰
۸	Pyrene(Py)	mg/kg	۱۸/۶	۳۲۰۰
۹	Benzo [a] Anthracene(BaA)	mg/kg	<۰/۵	۲۰
۱۰	Chrysene(C)	mg/kg	۵/۶	۲۰۰
۱۱	Benzo [b] Fluoranthene(BbF)	mg/kg	۶	۲۰
۱۲	Benzo [k] Fluoranthene(BkF)	mg/kg	<۰/۵	۳۰
۱۳	Benzo [a] Pyrene(BaP)	mg/kg	<۰/۵	۲۰
۱۴	Indeno [1.2.3-c.d] Pyrene(ID)	mg/kg	۷/۵	۲۲
۱۵	Dibenzo [a.h] Anthracene(DA)	mg/kg	۳	۳
۱۶	Benzo [g.h.i] Perylene(BgP)	mg/kg	۸	۲۵۰۰

استاندارد خاک است. از این‌رو، خاک رنگ‌بر مستعمل دپوشده در محل دفع پسماندهای شهرک صنعتی سلفچگان پتانسیل آلودگی از نظر هیدروکربن‌های آروماتیکی چند حلقه‌ای ندارد.

آزمایش نشت در واقع مهم‌ترین آزمایشی است که در تعیین میزان کارایی فرایند تثبیت و جامدسازی مطرح است.

برای مقایسه با سطوح مجاز آلاینده‌ها در خاک آلوده در سایت مورد مطالعه، مقادیر سطوح مجاز پالایشی آب و خاک در کاربری‌های مختلف مندرج در جدول ۵ بر اساس استاندارد خاک صنعتی استفاده شد. با توجه به نتایج آنالیزهای در جدول ۵، در این نمونه مقادیر غلظت انواع هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه‌ای کمتر از مقادیر

لازم به ذکر است برای تحلیل کارایی فرایند تثبیت و جامدسازی خاک رنگ‌بر مستعمل دپوشده در محل دفع پسماندهای شهرک سلفچگان، میزان نشت یک نمونه شاهد (نمونه معرف) بدون استفاده از مواد جامدکننده و افزودنی، یعنی سیمان و خاک رس اصلاح‌شده، در آزمایش TCLP مورد توجه قرارگرفت (جدول ۷).

در این بخش چند سری آزمایش نشت برای نمونه‌های جامد شده به ترتیب زیر بررسی شده است.

نتایج حاصل از غلظت آلاینده‌هایی که از نمونه‌های جامدشده خاک آلوده با سیمان و خاک رس اصلاح‌شده در زمان گیرایی ۲۸ روز با استفاده از آزمایش تعیین سمیت یا تی اس ال پی نشت کرده است به ترتیب ذکر شده در جدول ۶ است.

جدول ۶. غلظت نشت‌شده از نمونه‌های جامدشده خاک آلوده با سیمان و خاک رس اصلاح‌شده در زمان گیرایی ۲۸ روز

نام نمونه	درصد سیمان	درصد رس اصلاح‌شده	غلظت نشت‌شده (ppm)	راندمان حذف TPH نسبت به نمونه معرف (درصد)
TPH				
C20	۲۰	۰	۰/۸۱	۸۰/۷
C20M8	۲۰	۸	۰/۶۱۹	۸۵/۳
C20M15	۲۰	۱۵	۰/۲۷۷	۹۳/۴
C20M30	۲۰	۳۰	۰/۱۰۵	۹۷/۵
C30	۳۰	۰	۱/۴۹	۶۴/۵
C30M8	۳۰	۸	۰/۸۷	۷۹/۳
C30M15	۳۰	۱۵	۰/۶۷	۸۴
C30M30	۳۰	۳۰	۰/۴۱	۹۰/۲

جدول ۷. غلظت نشت‌شده از نمونه معرف بدون استفاده از مواد جامدکننده و افزودنی

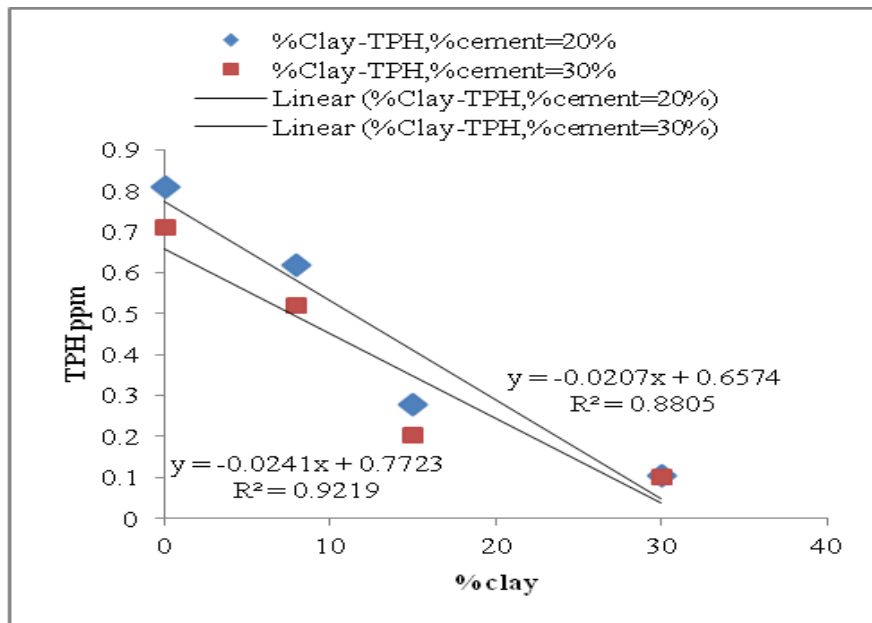
نام نمونه	غلظت متوسط نشت‌شده (ppm)
به لحاظ میزان کل هیدروکربن‌های نفتی	
TPH	
نمونه خاک آلوده معرف (نمونه مرکب)	۴/۲

است؛ به عبارت دیگر، اکثر قریب به اتفاق مواد آلی در ماتریس محبوس شده است و در آزمایش نشت و تعیین سمیت (آزمایش TCLP) اثری از آن‌ها مشاهده نمی‌شود. برای تعیین رابطه بین درصد رس اصلاح‌شده با غلظت هیدروکربن‌های نفتی نشت‌شده در درصد‌های سیمان ۲۰ و ۳۰ درصد، رگرسیون خطی انجام شد (شکل ۲).

بر این مبنا، غلظت مواد نشت‌کرده از ماتریس جامدشده نسبت به غلظت همان ماده (در زمان متناظر) در نمونه شاهد (نمونه خاک آلوده معرف) محاسبه و تجزیه و تحلیل شد. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقایسه نتایج مربوط به غلظت مواد نشت‌کرده از نمونه‌های جامدشده و تثبیت‌شده به نسبت نمونه خام نشان می‌دهد که در تمامی نمونه‌ها درصد بسیار قابل قبول حذف هیدروکربن‌های نفتی رخ داده

نتایج حاصل از غلظت آلاینده‌هایی که از نمونه‌های جامدشده خاک آلوده با آهک و خاک رس اصلاح شده در زمان گیرایی ۲۸ روز با استفاده از آزمایش TCLP نشت کرد به ترتیب ذکر شده در جدول ۸ است.

به طور مشخص، با افزایش درصد رس اصلاح شده از میزان نشت هیدروکربن‌های نفتی کاسته شده است. میزان ضریب R^2 برای نشت هیدروکربن‌های نفتی بین ۸۸ تا ۹۲ درصد است و روند خطی مناسبی طی شده است.



شکل ۲. نمودار رگرسیون خطی در تعیین رابطه درصد رس اصلاح شده با TPH نشت شده در درصد‌های متفاوت سیمان

جدول ۸. غلظت نشت شده از نمونه‌های جامدشده خاک آلوده با آهک و خاک رس اصلاح شده در زمان گیرایی ۲۸ روز

نام نمونه	درصد آهک زنده	درصد رس اصلاح شده	غلظت نشت شده (ppm) TPH	راندمان حذف TPH نسبت به نمونه معرف (درصد)
L20	۲۰	۰	۰/۴۱	۹۰/۲
L20M8	۲۰	۸	۰/۳۰۵	۹۲/۷
L20M15	۲۰	۱۵	۰/۲۲۸	۹۴/۶
L20M30	۲۰	۳۰	۰/۱۱	۹۷/۴
L30	۳۰	۰	۰/۳۹۱	۹۰/۷
L30M8	۳۰	۸	۰/۲۸۹	۹۳/۱
L30M15	۳۰	۱۵	۰/۲۱	۹۵
L30M30	۳۰	۳۰	۰/۰۹	۹۷/۸

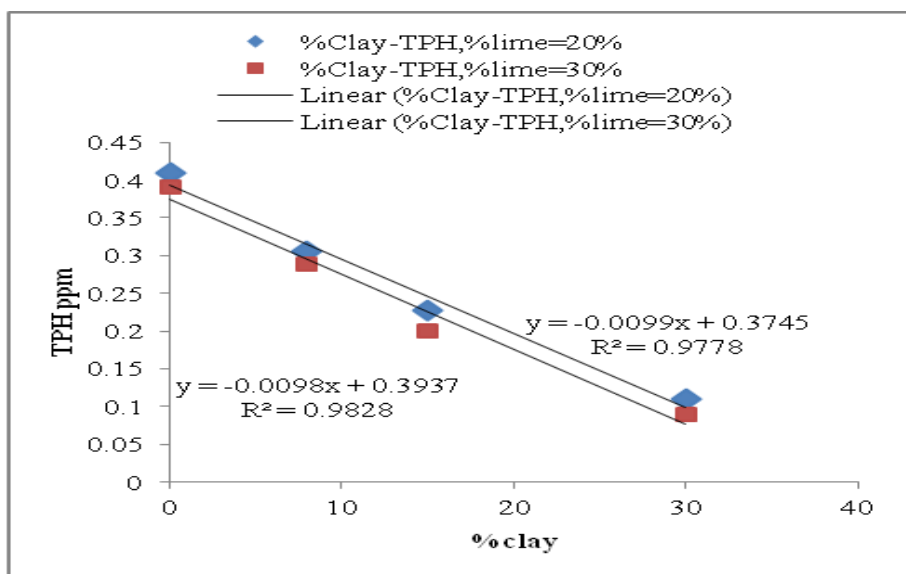
درصد آهک تأثیر مطلوبی بر نشت میزان کل هیدروکربن‌های نفتی داشته است. میزان ضریب R^2 در نشت هیدروکربن‌های نفتی بین ۹۷ تا ۹۸ درصد است و روند خطی مناسبی طی شده است.

با توجه به مطالب پیش گفته، چنین برمی آید که استفاده از خاک رس اصلاح شده برای تثبیت و جامدسازی خاک رنگ‌بر مستعمل دپوشده در محل دفع پسماندهای شهرک صنعتی سلفچگان کارایی خوبی دارد، به نحوی که با افزایش میزان آن به ماده جامدکننده، کارایی آن ماده در محبوس نمودن ماده آلی و فلز سنگین باریم در ماتریس مربوط افزایش و در آزمایش نشت، میزان نشت ماده آلی و فلز سنگین از آن کاهش می‌یابد. لذا، بر این اساس، همچنین بر اساس نتایج سایر فعالیت‌ها و بررسی‌های صورت گرفته می‌توان نسبت به ترکیب درصد بهینه مواد برای حذف آلودگی مواد آلی از خاک آلوده دپوشده در این محل اقدام کرد.

جدول ۹ و ۱۰، نتایج حاصل از آزمون مقاومت فشاری آزاد را بر نمونه‌های مختلف با زمان گیرایی ۲۸ روز نشان می‌دهد (لازم به ذکر است با توجه به سوابق کارهای مشابه، بهترین مقاومت فشاری آزاد در زمان ۲۸ روز به دست آمد. لذا، در این تحقیق نیز زمان گیرایی مدنظر در انجام آزمایش‌ها ۲۸ روز بوده است).

لازم به ذکر است برای تحلیل کارایی فرایند تثبیت و جامدسازی خاک رنگ‌بر مستعمل دپوشده در محل دفع پسماندهای شهرک سلفچگان، میزان نشت یک نمونه شاهد (نمونه معرف) بدون استفاده از مواد جامدکننده و افزودنی، یعنی آهک زنده و خاک رس اصلاح شده، در آزمایش تعیین سمیت مورد توجه قرار گرفت (جدول ۷). بر این مبنا، غلظت مواد نشت کرده از ماتریس جامدشده نسبت به غلظت همان ماده (در زمان متناظر) در نمونه شاهد (نمونه خاک آلوده معرف) محاسبه و تجزیه و تحلیل شد. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقایسه نتایج مربوط به غلظت مواد نشت کرده از نمونه‌های جامدشده و تثبیت شده به نسبت نمونه خام نشان می‌دهد که در تمامی نمونه‌ها درصد بسیار قابل قبول حذف هیدروکربن‌های نفتی رخ داده است. به عبارت دیگر، در اکثر قریب به اتفاق مواد آلی شناسایی شده در ماتریس محبوس شده و در آزمایش نشت (آزمایش تعیین سمیت) اثری از آن‌ها مشاهده نمی‌شود. برای تعیین رابطه بین درصد رس اصلاح شده و غلظت TPH نشت شده در درصد‌های آهک زنده ۲۰ و ۳۰ درصد، رگرسیون خطی انجام شد (شکل ۳).

به طور مشخص، با افزایش درصد رس اصلاح شده از میزان نشت هیدروکربن‌های نفتی کاسته شده است و افزایش



شکل ۳. رگرسیون خطی در تعیین رابطه درصد رس اصلاح شده با TPH نشت شده در درصد‌های متفاوت آهک زنده

جدول ۹. مقاومت فشاری آزاد نمونه‌های جامد شده سیمان و خاک رس اصلاح شده (۲۸ روز گیرایی)

مقاومت فشاری آزاد (برحسب کیلوپاسکال)	نام نمونه - نمونه‌های آهکی
۹۱	C20
۱۹۰	C20M8
۲۶۳	C20M15
۳۹۸	C20M30
۲۲۷	C30
۴۱۷	C30M8
۴۲۹	C30M15
۵۲۷	C30M30

جدول ۱۰. مقاومت فشاری آزاد نمونه‌های جامد شده آهک زنده و خاک رس اصلاح شده (۲۸ روز گیرایی)

مقاومت فشاری آزاد (برحسب کیلوپاسکال)	نام نمونه - نمونه‌های آهکی
۱۵۳	L20
۲۵۷	L20M8
۳۰۶	L20M15
۳۶۸	L20M30
۱۷۱	L30
۲۰۸	L30M8
۳۶۸	L30M15
۴۸۴	L30M30

فشاری آزاد ۳/۵ کیلوگرم بر سانتی متر مربع (به عبارت دیگر ۳۵۰ کیلوپاسکال) باشد، قابلیت مدفون شدن در محل‌های دفن پسماند را دارد. بر این اساس، فقط برخی نمونه‌های جامد شده در جدول‌های ذکر شده موفق به دستیابی به این مقاومت شده است که باید در تجزیه و تحلیل‌ها و معرفی درصد بهینه برای جامدسازی و تثبیت به آن توجه شود. اسکن میکروسکوپ الکترونی نمونه‌های جامد شده با زمان گیرایی ۲۸ روز نیز روی تمامی نمونه‌های جامد شده انجام شد. نتایج اسکن این نمونه‌ها در شکل ۴ تا ۷ ارائه شده

همان‌طور که از جدول ۹ و ۱۰ برمی‌آید، افزایش میزان رس اصلاح شده باعث افزایش مقدار مقاومت نمونه‌ها شده است. همچنین، فقط برخی نمونه‌ها شرایط حداقل تعریف شده در استانداردها برای دفن را برآورده ساخت. لازم به ذکر است استاندارد حداقل برای مقاومت فشاری آزاد متناسب با کاربری آبی و عملیات بعدی است که روی نمونه جامد شده صورت خواهد گرفت. اضافه می‌نماید طبق استانداردهای سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا، مواد تثبیت و جامد شده ۲۸ روزه‌ای که دارای حداقل مقاومت

هر یک به تنهایی دارای فازهای معدنی و ساختارهای خاص خود است و تمیز دادن آن‌ها در تصاویر امری بسیار مشکل است، زیرا تقدم برخی فازها در تصاویر سبب پوشیده شدن فازهای زیرین می‌شود و امکان دسترسی به تمام فازها را ناممکن می‌سازد. برای مثال، احتمالاً خاک آلوده و مورد استفاده حاوی رس‌های مختلفی است که به دلیل عدم امکان رؤیت آن‌ها در تصاویر، تشخیص دادن آن‌ها میسر نیست. آنچه مسلم است این است که تمام تصاویر از ساختار یکسانی پیروی کرده است و فاز معدنی یا آلی که مشخصاً در واکنش‌ها شرکت نکرده باشد، مشخص نیست. همچنین، تصاویر نشان می‌دهد که ترک‌های بزرگ (در حد چند میکرون) در هیچ نمونه‌ای وجود ندارد، یعنی مقدار رس‌ها در حدی نبوده که ترک‌های بزرگ و مهمی را در ماتریس جامد شده به وجود آورد.

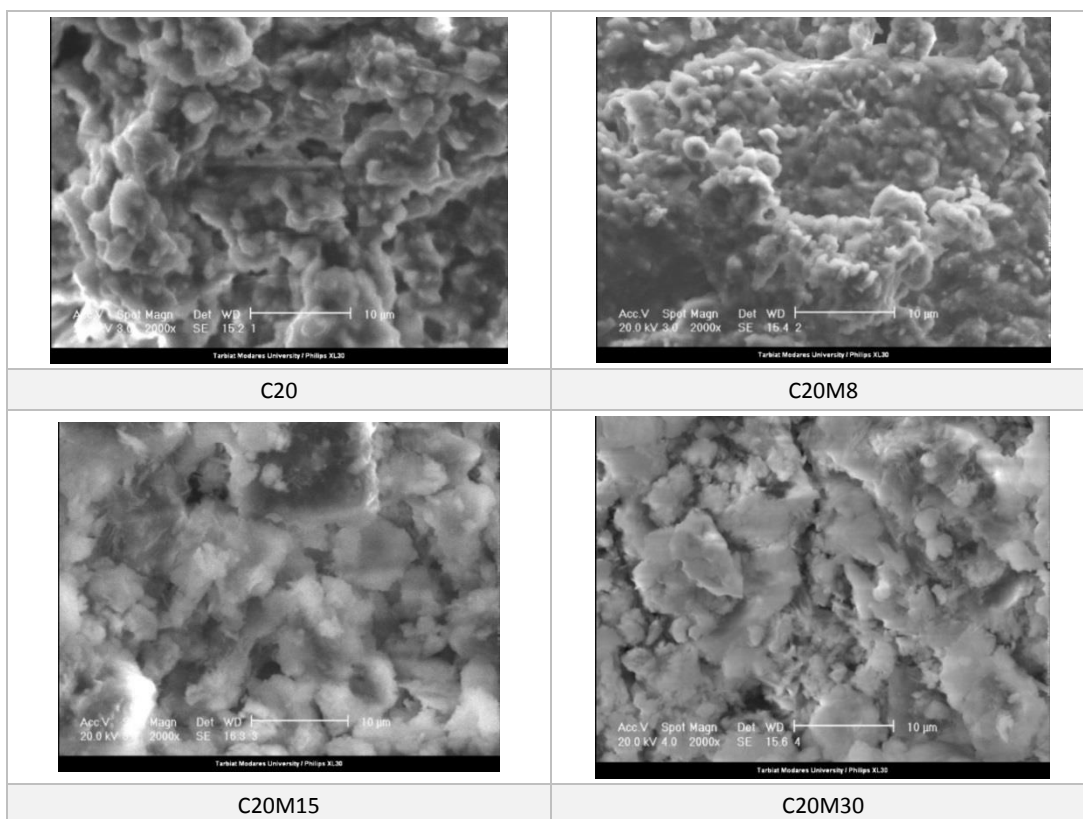
همچنین، بررسی‌های انجام شده بیانگر این است که تمامی نمونه‌ها ساختار و مورفولوژی تقریباً مشابهی دارد، ولی محصولات اصلی هیدراسیون سیمان و آهک فقط در برخی نمونه‌ها قابل مشاهده بود. در مجموع، آنچه مشخص است این است که در تمامی نمونه‌ها محصولات فرایند هیدراسیون به صورت قابل توجهی رشد پیدا کرده است و رس اصلاح شده یا آلاینده مانع از انجام این واکنش نیست. از طرف دیگر، وجود محصولات هیدراسیون (اشکال سوزنی شکل) در برخی نمونه‌ها (مانند نمونه‌های C20M30، C20M15 و C30M30) مؤید این نکته است که هیدراسیون در این نمونه‌ها به شکل تقریباً کامل صورت گرفته و مقدار آب مصرفی برای تهیه نمونه‌ها مناسب بوده است.

یکی از مهم‌ترین تفاوت‌های موجود بین تصاویر نمونه‌ها وجود منافذ میکروسکوپی در ماتریس آن‌هاست. این موضوع بیانگر قابلیت نشست و جریان یافتن مایعات استخراجی در فضای خالی ماتریس جامد شده و توانایی تماس آن با آلاینده‌های مورد بررسی است که باید در بررسی عکس‌های میکروسکوپی به آن توجه داشت. لازم به ذکر است این موضوع در تصمیم‌گیری‌های بعدی بسیار مهم و تأثیرگذار خواهد بود.

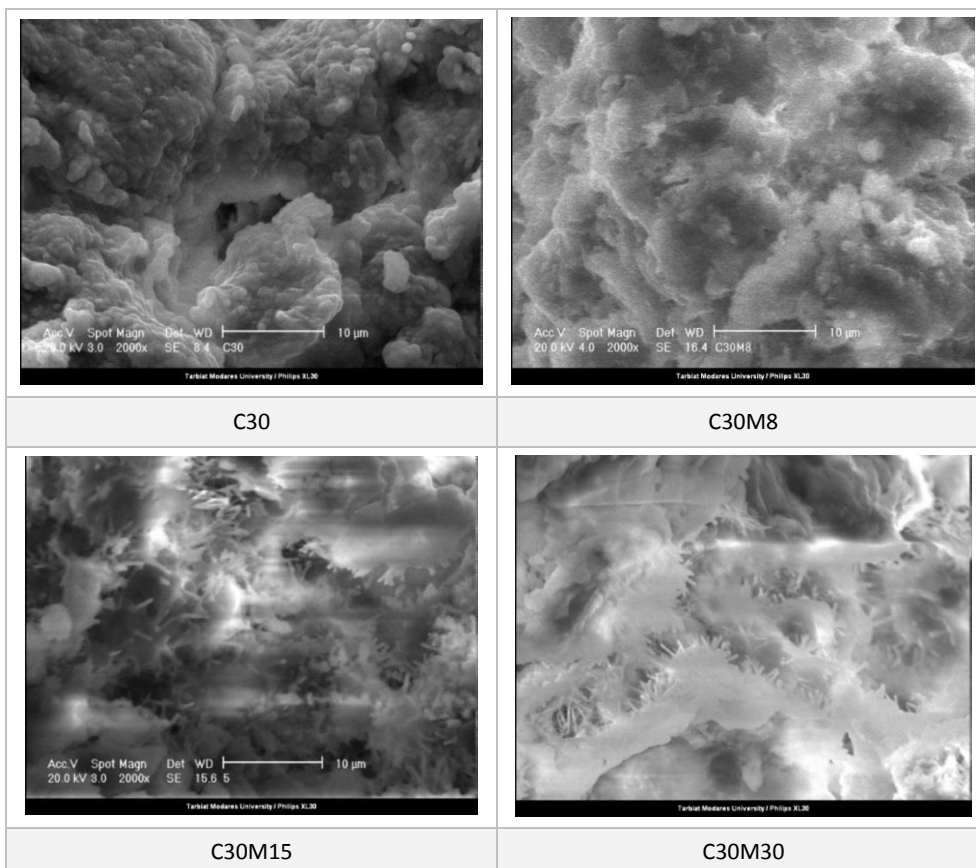
است. لازم به ذکر است در این شکل‌ها، عکس‌ها با درجه تفکیک ۲۰۰۰ برابر آمده است. همان‌گونه که در نگاه کلی به تمامی تصاویر مشخص است، ساختار میکروسکوپی نمونه‌های مختلف، تفاوت قابل‌ذکری ندارد. در واقع، مجموعه‌ای از کریستال‌ها را می‌توان یافت که در تصاویر مختلف تکرار شده است.

همان‌طور که در شکل ۶ نیز مشخص است، اندازه ذرات در تصویر متعلق به نمونه C20 در مقایسه با نمونه بزرگ‌تر و بر همین مبنا حفرات آن نیز بزرگ‌تر است. همچنین، در تصویر متعلق به نمونه C20M8 توزیع ذرات یکنواخت‌تر و به همان نسبت اندازه ذرات نیز کوچک‌تر است. در همین تصویر، مشابه این وضعیت برای تصاویر متعلق به نمونه C20M30 نسبت به نمونه C20M15 نیز وجود دارد. در نمونه C20M30 اندازه ذرات از نمونه C20M15 بزرگ‌تر است، ولی ذرات این نمونه نسبت به نمونه C20M15 یکنواختی بیشتری دارد. همچنین، در نمونه C20M30 گستره پخش ذرات زیادتر است، به گونه‌ای که در مقایسه با نمونه C20M15 هم ذرات بزرگ‌تر و هم ذرات کوچک‌تر موجود است. مشابه این وضعیت در شکل ۷ برای تصاویر متعلق به نمونه‌های C30، C30M8، C30M15 و C30M30 نیز وجود دارد. همچنین، طبق مشاهدات انجام شده در شکل ۸، نمونه L20 نسبت به نمونه L20M8 ذرات و حفرات بزرگ‌تری دارد، به گونه‌ای که محدوده اندازه ذرات در نمونه L20 دارای ذراتی در محدوده ۲ تا ۱۰ میکرومتر است، در حالی که اندازه ذرات در نمونه L20M8 در محدوده ۲ تا ۸ میکرومتر است. همچنین، در این شکل نمونه L20M15 نسبت به نمونه L20M30 حفره‌دارتر و به صورت کلوخه‌ای است. همچنین، ساختار تمامی تصاویر ارائه شده در شکل ۹ تخلخل زیادی نیز دارد.

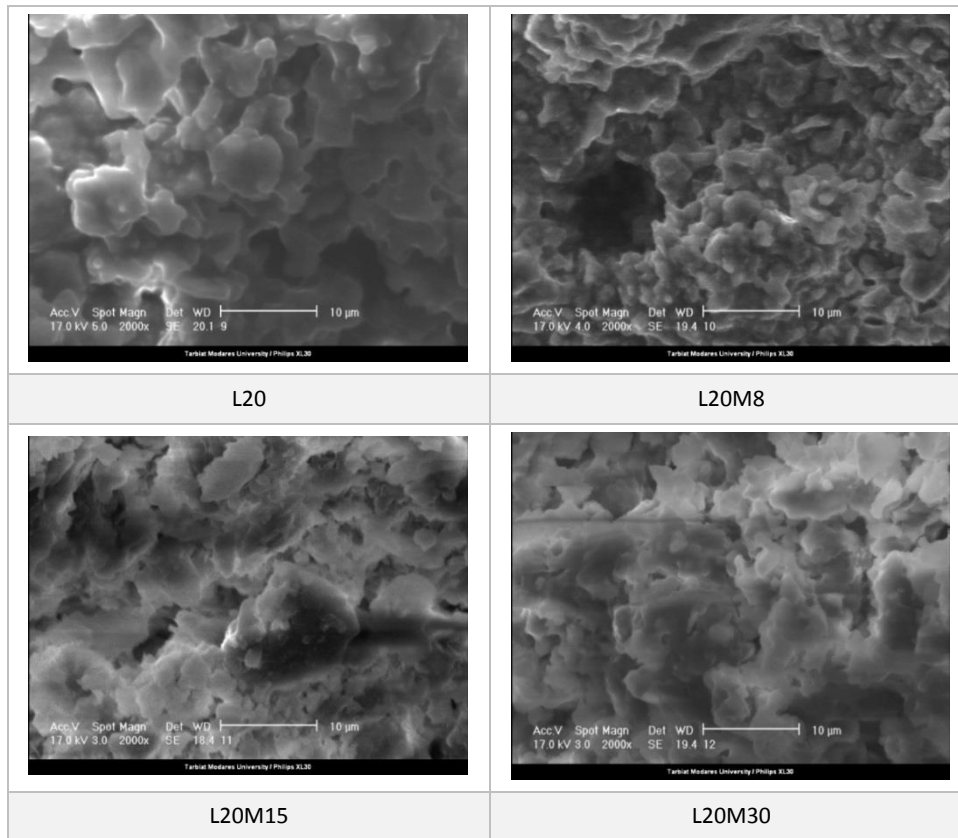
در مجموع، طبق بررسی‌های انجام شده در مورد شکل ۶ تا ۹، مشخص می‌شود که در تمامی نمونه‌ها سه ماده مختلف (شامل خاک آلوده، سیمان و خاک رس اصلاح شده یا خاک آلوده، آهک زنده و خاک رس اصلاح شده) حضور دارد که



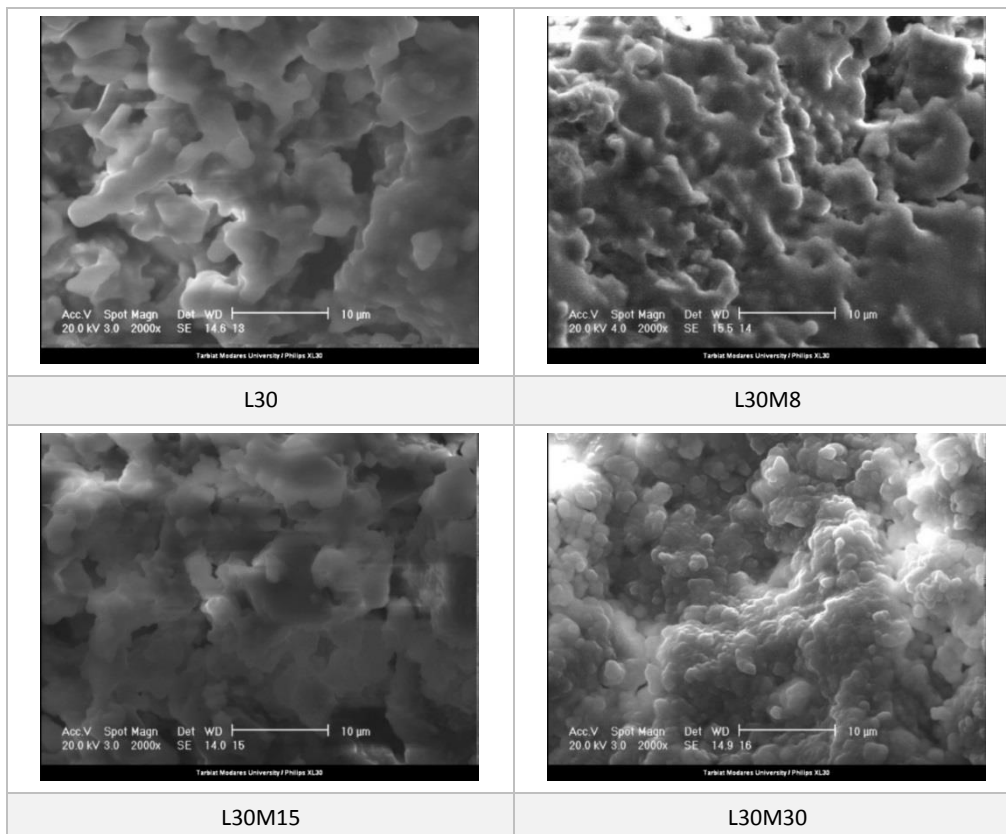
شکل ۴. تصاویر اسکن میکروسکوپی نمونه‌های جامدشده با زمان گیرایی ۲۸ روز (بزرگ‌نمایی ۲۰۰۰x)



شکل ۵. تصاویر اسکن میکروسکوپی نمونه‌های جامدشده با زمان گیرایی ۲۸ روز (بزرگ‌نمایی ۲۰۰۰x)



شکل ۶. تصاویر اسکن میکروسکوپی نمونه‌های جامدشده با زمان گیرایی ۲۸ روز (بزرگ‌نمایی ۲۰۰۰x)



شکل ۷. تصاویر اسکن میکروسکوپی نمونه‌های جامدشده با زمان گیرایی ۲۸ روز (بزرگ‌نمایی ۲۰۰۰x)

۶. نتیجه گیری

در مجموع، با توجه به بررسی‌های آزمایشگاهی و مطالعات صورت گرفته، آزمایش نشت تعیین سمیت نشان داد که در تمامی نمونه‌ها افزودن خاک رس اصلاح شده سبب کاهش میزان نشت شده است. در حذف میزان کل هیدروکربن‌های نفتی، طبق مطالب ارائه شده در جدول ۶ و ۸، نمونه‌های حاوی ۲۰ درصد سیمان یا آهک و ۳۰ درصد رس اصلاح شده (در زمان گیرایی ۲۸ روز) با راندمان حذف ۹۷ درصد در حذف TPH، همچنین حصول مقاومت فشاری حداقل مورد نیاز برای دفن پسماند (بین ۳۶۸ تا ۳۹۸ کیلو پاسکال) بهترین کارایی را در بین نمونه‌های مختلف داشت. طبق بررسی‌های انجام شده، در این نمونه‌ها کارایی نمونه با رس اصلاح شده بیشتر بهتر بوده است، به طوری که نمونه دارای ۳۰ درصد رس اصلاح شده (با ۲۰ درصد سیمان یا آهک زنده) بهترین کارایی را داشت. نتایج حاصل از آزمون مقاومت فشاری آزاد نشان داد که افزایش مقدار رس اصلاح شده (تا ۳۰ درصد) سبب کاهش مقاومت فشاری آزاد به حد غیرقابل قبول نخواهد شد. نتایج آزمایش اسکن میکروسکوپ الکترونی و آزمایش نشت (آزمایش TCLP) بر این نکته دلالت دارد که دو دلیل در افزایش کارایی نمونه‌های جامد شده مؤثر بوده است؛ یکی بالارفتن میزان رس اصلاح شده که سبب افزایش قدرت جذب هیدروکربن‌های نفتی در تثبیت و جامدسازی خاک آلوده محل شد، و دیگری کاهش حجم منافذ در ماتریس که سبب کاهش میزان نشت (حجم ماده نشت شده) شده است. نمونه‌های دارای رس اصلاح شده با سیمان ۲۰ درصد در مجموع دارای منافذ خالی کمتری نسبت به نمونه‌های دارای رس اصلاح شده با سیمان ۳۰ درصد بود و در نتیجه کارایی بهتری داشت، ضمن آنکه وجود محصولات هیدراسیون در اسکن میکروسکوپ برخی نمونه‌ها (مانند نمونه C20M30)

در شکل ۴ مؤید این نکته است که هیدراسیون سیمان به شکل تقریباً کامل صورت گرفته و مقدار آب مصرفی برای تهیه نمونه‌ها مناسب بوده است. همچنین، نتایج بررسی‌های انجام شده بیانگر آن است که اگر فقط سازوکار جامد شدن در کاهش نشت آلاینده‌ها مؤثر باشد، انتظار می‌رود که نشت از نمونه‌های دارای ۳۰ درصد سیمان یا آهک و ۳۰ درصد رس اصلاح شده کمتر از سایر ترکیبات رخ دهد، اما از آنجا که علاوه بر جامد شدن، سازوکار تثبیت آلاینده‌ها با رس اصلاح شده در ماتریس نیز بر کاهش نشت آن‌ها مؤثر بوده است، تقابلی بین دو سازوکار مذکور اتفاق می‌افتد و این تقابل تا نقطه‌ای پیش می‌رود که اثر یک سازوکار بر دیگری قدرت بیشتری پیدا کند.

از مجموع موارد فوق چنین برمی‌آید که استفاده از رس اصلاح شده در بهبود کارایی فرایند تثبیت و جامدسازی در تثبیت هیدروکربن‌های نفتی و فلزات سنگین موجود در خاک آلوده محل اثر مثبتی داشته است و استفاده از آن با درصد بهینه به دست آمده شامل به کارگیری ۲۰ درصد سیمان و ۳۰ درصد رس اصلاح شده (آلی دوست) برای تثبیت و جامدسازی خاک آلوده محل دفع پسماندهای شهرک صنعتی سلفچگان توصیه می‌شود. لازم به ذکر است که در این درصد (درصد بهینه)، در نمونه‌های آزمایش شده خصوصیات مقاومتی ماتریس جامد شده و نتایج اسکن میکروسکوپی نیز مناسب ارزیابی شده است و در مجموع شرایط اجرایی قابل قبولی را برای اجرای کار فراهم می‌کند.

یادداشت‌ها

1. Atterberg Limits
2. Total Petroleum Hydrocarbon
3. Toxicity Characteristics Leaching Procedure
4. Dimethyl di (hydrogenated) tallow

منابع

- Ahmadi, S., Gitipour S. and Mehrdadi, N. 2016. Compressive strength development of solidified PAHs contaminated soil using cement and micro silica. *Journal of Nature Environment and Pollution Technology*, 15: 103-106.
- Al-ansary, M.S. and Al-Taba, A. 2007. Stabilization/ solidification of synthetic petroleum drill cutting. *Journal of Hazardous Materials*, 141(2): 410-421.
- ASTM D2216. 1998. Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass, ASTM, West Conshohocken, PA.
- ASTM D854. 2010a. Standard Test Methods for Specific Gravity of Soils by Water Pycnometer, ASTM, West Conshohocken, PA.
- ASTM D4318. 2010b. Standard Test Methods for Liquid Limit, Plasticity Index of Soils, ASTM, West Conshohocken, PA.
- ASTM D4972. 2007 a. Standard test methods for pH of soils. ASTM, West Conshohocken, PA.
- Conner, J.R. and Hoeffner, S.L. 1998. The history of stabilization/solidification technology. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 28: 325-396.
- Chena, Q.Y., Tyrer, B., Hills, C.D., Yang, X.M. and Carey, P. 2009. Immobilization of heavy metal in cement-based solidification/stabilization: A review. *Waste Management*, 30: 429-403.
- Conner J.R. 1990. Chemical fixation and solidification of hazardous waste. Van No strand Reinhold, New York.
- Council of Ministers of the Environment (CCME). 2006. Canada-wide standards for petroleum hydrocarbons (PHC) in soil, Table 1.
- Desogus, P., Manca, P.P., orru, G. and Zucca, A. 2013. Solidification/stabilization of landfill leachate concentrates using different aggregate materials. *Minerals Engineering*, 45: 47-54.
- Division of Waste Management (DWM), Program rules. 2005. Groundwater and surface water cleanup target levels, Table 1. Florida.
- Kogbara, RB., Ayotamuno, JM., Onuomah, I., Ehio V. and Damka, TD. 2016. Stabilization/solidification and bioaugmentation treatment of petroleum drill cutting. *Journal of Applied Geochemistry*, 71: 1-8.
- Krishna, B.G. and Gupta, S.S. 2008. Adsorption of a few metals on natural and modified Kaolinite and montmorillonite: A review. *Advances in Colloid and Interface Science*, 140: 114-131.
- Louisiana Department of Environmental Quality (LDEQ), 2003. Screening option & screening standards for soil and groundwater RECAP table 1.
- Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke ordening en milieubeheer. 2000. Circular on target values and intervention values for soil remediation, The Netherlands.
- National Technical Information Service U.S. Department of Commerce Springfield, VA 22161. 1993. Solidification/Stabilization and its application waste materials.
- New Mexico Environmental Department (NMED), 2006. TPH Screening guidelines, Values for Direct Exposure to soil.
- Ouhadi, V.R., Amiri, M. and Goodarzi, A.R. 2012. The special potential of nano-clays for heavy metal contaminant retention in geo_environmental projects. *Journal of Civil and Surveying Engineering*, 45: 631-642.
- Ouhadi, V. R. and Amiri M. 2012. Capability of nano clays for environmental contaminant adsorption with specific attention to the heavy metals retention, 9th International Congress on Civil Engineering, May 8-10(2012), Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.
- Ouhadi, V.R. and Amiri, M. 2011. Geo-environmental behaviour of nanoclays in interaction with heavy metals contaminant. *Amirkabir J, Civil*, 42: 29-36.
- Park, C. 1999. Hydration and solidification of hazardous wastes containing heavy metals using modified cementations materials. *Cement and Concrete Research*. 30: 429-435.
- Pique, T.M. and Vazquez, A. 2013. Control of hydration rate of polymer modified cements by the addition of organically modified montmorillonites. *Journal of Cement and Concrete Composites*, 37: 54-60.
- Schifano, V., MacLeod, C., Hadlow, N. and Dunery, R. 2007. Evaluation of quicklime mixing for the remediation of petroleum contaminated soils. *Journal of Hazardous Materials*, 141: 395-409.
- Schlichting, S., Wu, T., Englund, B., Garrouette, M., Whitsel, J., Halverson, J., Gleason, E. and Todd Blessing. 2017. Clean up levels Guidance for methods two and three, Alaska Department of Environmental conservation.

- Sevim, I.F. and Guner G. 2005. Investigation of rheological and colloidal properties of bentonitic clay dispersion in the presence of a cationic surfactant. *Progress in Organic Coating*, 54: 28-33.
- Thompson, S.A. 2007. Risk-based Cleanup levels for total petroleum hydrocarbons (TPH). Oklahoma Department of Environmental Quality.
- US EPA. 2007. Method 8015C. Naphthalenated organics by gas chromatography, revision 3. Cincinnati, OH: United States Environmental Protection Agency.
- US EPA. 1996. Method 3050B. Acid digestion of sediments, sludges and soils, revision 2. Cincinnati, OH: United States Environmental Protection Agency.
- US. EPA. 1994. Test methods for evaluated solid waste, Physical/chemical methods (SW-846), Revision 2, Chapter 9, Sampling Plan, Cincinnati, OH: United States Environmental Protection Agency.
- US EPA. 1992. Method 1311. Toxicity Characteristics Leaching Procedure, revision 0. United States Environmental Protection Agency, Washington, DC.
- Yarlagadda, P.S., Mastumoto, M.R., Benschoten, J.E. and Kathuria A. 1995. Characteristics heavy metals in contaminated soils. *Journal of Environmental Engineering, ASCE*, 121(4): 276-286.