Archive of SID

محیط‌شناسی، دورهٔ ۴۳، شمارهٔ ۲، تابستان ۱۳۹۶، صفحهٔ ۲۵۰-۲۳۳

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

سعید مردان[1]* سعید گیتی‌پور[2] و محمدعلی عبدلی[3]

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

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

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

تاریخ وصول مقاله: ۱۳۹۵/۱۰/۱٤ 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 زمان‌گیرایی ۲۸ روز بهترین کارایی را به‌لحاظ پارامترهای مختلف مؤثر بر کارایی روش جامدسازی و تثبیت در بین نمونه‌های مختلف داشته است. علاوه‌بر 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 بالارفتن 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 آلودهٔ نفتی، رس اصلاح‌شده، میزان کل هیدروکربن‌های نفتی، هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای.

۱. سرآغاز

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 (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 آلایندهٔ فلز سنگین، همچنین با تمهیداتی، هیدروکربن‌های نفتی را در مقیاس ماکروسکوپی و

* نویسنده مسئول: Email: smaardan@yahoo.com

www.SID.ir

Archive of SID

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 اصلاح‌شده (آلی دوست) به‌واسطهٔ سطح مخصوص و ظرفیت تبادل کاتیونی زیاد، امکان مناسبی برای تبادل کاتیونی ایجاد می‌کند و در این راستا در نگهداری آلایندهٔ 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 علاوه‌بر دلایل محیط‌زیستی، به‌دلیل در دسترس بودن مواد جامدکننده‌ای نظیر سیمان و مواد سیمانی (آهک، خاکستر بادی، سربارهٔ کوره و جزآن) و مؤثر بودن از نظر اقتصادی در دو دهه گذشته به‌طور فزاینده‌ای توجه شده است (Park, 1999; Chena et al., 2009). با وجود تحقیقات وسیعی که در زمینهٔ پایدارسازی نگهداری آلاینده‌ها به‌کمک موادی نظیر سیمان یا آهک صورت گرفته است (Conner, 1990; Desogus et al., 2013; Conner & Hoeffner, 1998)، به بررسی ریزساختاری نحوهٔ فرایند اندرکنش سیمان-آلاینده هیدروکربن نفتی یا فلز سنگین، همچنین حذف عوامل مخل فرایند هیدراسیون سیمان یا آهک با اجرای روش‌های تثبیت مواد آلایندهٔ خاص (نظیر تثبیت هیدروکربن‌های نفتی) قبل از جامدسازی مادهٔ آلاینده توجه محدودی شده است (Al-ansary & Al-Taba, 2007; Schifano et al., 2007). بر این اساس، هدف این پژوهش، بررسی نحوهٔ فرایند اندرکنش سیمان-آهک- خاک‌رس اصلاح‌شده و آلایندهٔ هیدروکربن نفتی و آلایندهٔ فلز سنگین از منظر ریزساختار، همچنین بررسی نشت آلاینده از ماتریس جامدشده و به‌دست‌آوردن درصد اختلاط بهینهٔ مواد تثبیت‌کننده و جامدکننده به‌لحاظ بهترین کارایی از جنبه‌های مختلف (مقاومت فشاری آزاد، ریزساختار، میزان نشت و جزآن) در روش جامدسازی و تثبیت است.

۲. مواد و روش‌ها

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

در مرحلهٔ نخست، خصوصیات پسماندهای صنایع تصفیهٔ دوم روغن مستقر در شهرک صنعتی سلفچگان و مواد مورد استفاده در فرایند تثبیت و جامدسازی (شامل سیمان و آهک زنده، خاک‌رس معمولی و خاک‌رس اصلاح‌شده) تعیین شده است. در این راستا، نمونه‌برداری از محل دفع پسماندهای شهرک صنعتی سلفچگان به‌روش پیشنهادی آژانس حفاظت محیط‌زیست آمریکا (U.S.EPA, 1994) صورت پذیرفت. پسماندهای این محل (با مساحت ۴ هکتار که فقط مربوط به دپو و دفع پسماندهای خاک رنگبر مستعمل واحدهای تصفیهٔ 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 آلودهٔ محل، آزمایش‌هایی نظیر دانسیته، رطوبت، توزیع اندازهٔ ذرات، حدود آتربرگ[1] (حد روانی و حد خمیری) و غلظت آلاینده‌های نفتی صورت گرفت.

مرحلهٔ دوم تحقیق حاضر دربرگیرندهٔ بررسی خصوصیات نشت نمونه‌های جامدشدهٔ پسماند صنایع تصفیهٔ دوم روغن با ترکیبات افزوده‌شده و در حالت‌ها و تحت شرایط مختلف است که با استفاده از آزمایش TCLP و مقاومت فشاری آزاد، همچنین بررسی ریزساختار نمونه‌های جامدشده به‌لحاظ ریخت‌شناسی با استفاده از اسکن میکروسکوپ الکترونی روی نمونه‌های جامدشده انجام شده است.

۳. مواد مصرفی، نمونه‌برداری و تهیهٔ نمونه‌ها

مواد مصرفی در این مطالعه عبارت است از سیمان پرتلند

www.SID.ir

Archive of SID

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

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

به‌منظور تعیین مقدار هیدروکربن‌ها در خاک آلودهٔ موجود در محل دپوی 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 به‌گونه‌ای است که نمایندهٔ کل خاک آلودهٔ موجود در محل باشد. علاوه‌بر این، پس از تعیین حداقل نمونه‌ها، از آن در تهیهٔ نمونه‌ای مخلوط استفاده می‌شود تا برای آنالیزهای دیگر (شامل هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه‌ای و فلزات سنگین) استفاده شود.

خلاصهٔ مراحل نمونه‌برداری مطابق با دستورالعمل مذکور به‌ترتیب زیر است. شایان ذکر است که روش نمونه‌برداری منتخب برای محل دفع و دپوی پسماندهای شهرک سلفچگان، روش نمونه‌برداری تصادفی ساده است.

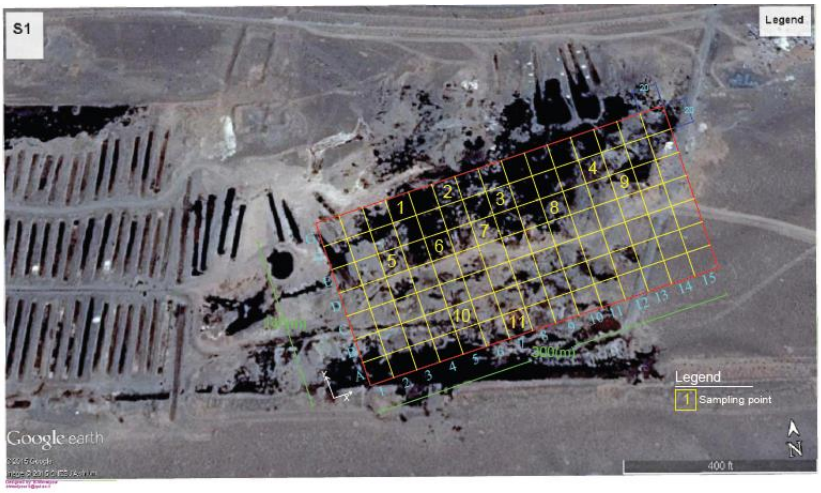
۱. شبکه‌بندی محدودهٔ مورد نیاز در تعیین غلظت آلایندهٔ هدف (شکل ۱)

۲. نمونه‌برداری از محوطه به تعداد لازم (در مورد تحقیق حاضر نمونه‌های برداشتی اولیه به نام نمونه‌های G4، G6، F8، F12، E3، E5، E7، E10، E13، A7 و B5 نام‌گذاری شد؛ شکل ۱)

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

۴. تهیهٔ نمونه مخلوط با مخلوط‌کردن 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 درجهٔ سانتی‌گراد نگهداری شد.



Sample	Latitude	Longitude	Sample	Latitude	Longitude
1	34°30'15.71"	50°26'19.03"	7	34°30'14.70"	50°26'21.07"
2	34°30'15.88"	50°26'20.24"	8	34°30'15.09"	50°26'23.27"
3	34°30'15.66"	50°26'21.46"	9	34°30'15.49"	50°26'25.36"
4	34°30'16.16"	50°26'24.82"	10	34°30'13.05"	50°26'20.30"
5	34°30'14.22"	50°26'18.40"	11	34°30'12.51"	50°26'21.62"
6	34°30'14.42"	50°26'19.86"	–	–	–

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

www.SID.ir

Archive of SID

برای تثبیت و جامدسازی خاک آلوده به هیدروکربن‌های نفتی، شانزده نمونه (از نمونهٔ مرکب تهیه‌شده) با ترکیب درصدهای مختلف سیمان، آهک زنده و خاک‌رس اصلاح‌شده ترکیب شد. جدول ۱ ترکیب درصد این مواد را در نمونه‌های مورد اشاره نشان می‌دهد. نحوهٔ ترکیب مواد مختلف نیز به این صورت بود که برای جذب مؤثر هیدروکربن‌های نفتی، نخست خاک‌رس اصلاح‌شده به‌مدت ۲۰ دقیقه با خاک آلودهٔ مورد تحقیق مخلوط و پس از آن سیمان پرتلند و آهک زنده به مخلوط خاک آلوده و خاک رس اصلاح‌شده اضافه شد. همچنین، به‌منظور تکمیل فرایند هیدراسیون سیمان، همچنین آهک، نمونه‌های تهیه‌شده به‌مدت 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 ادامهٔ متن ارائه شده است.

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

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

– علامت اختصاری C برای نمونه‌های جامدشده با سیمان و علامت اختصاری L برای نمونه‌های جامدشده با آهک به‌کار رفته است.

www.SID.ir

Archive of SID

۴. روش‌های آزمایشگاهی استفاده‌شده

آنالیز کل هیدروکربن‌های نفتی در این طرح با روشی مشابه روش 8015 C سازمان حفاظت محیط‌زیست آمریکا (U.S.EPA, 2007) انجام شد. همچنین، برای آنالیز فلزات سنگین موجود در نمونه مخلوط خاک آلودهٔ محل نیز از روش 3050 B سازمان حفاظت محیط‌زیست آمریکا (U.S.EPA, 1996) استفاده شد. لازم به ذکر است این آزمایش‌ها در آزمایشگاه آنالیز دستگاهی آزمایشگاه معتمد آرین 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 جامدشدهٔ 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 قابل‌تنظیم است. نمونه‌هایی که این آزمایش روی آن انجام گرفت، شامل نمونه‌های جامدشدهٔ خاک آلوده به هیدروکربن‌های نفتی با زمان گیرایی ۲۸ روز بوده است.

سایر آزمایش‌ها که دربرگیرندهٔ 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)
- دانستیهٔ ذرات خاک به روش ASTM D854 (a۲۰۱۰ و b۲۰۱۰)
- حدود آتربرگ خاک (حد مایع و حد پلاستیک) به روش ASTM D4318
- pH خاک به روش ASTM D4972 (۲۰۰۷)

همچنین، برای اطلاعات مربوط به خصوصیات شیمیایی رس اصلاح‌شده (نوعی مونتموریلونیت اصلاح‌شده) از رس اصلاح‌شده‌ای با عنوان تجاری Clayton R40 (که در آن نمک چهارگانه آمونیوم با نام دی‌متیل دی (هیدروژن) تالو[۴] به‌عنوان عامل اصلاح این رس بوده) از برگهٔ اطلاعات فنی استفاده شد که شرکت تولیدکنندهٔ آن (شرکت فرآورده‌های رسی جنوب) ارائه کرده است.

۵. نتایج و یافته‌ها

نتایج آزمایش‌های صورت‌گرفته روی خاک آلودهٔ مورد نظر بیانگر آن بود که میزان رطوبت خاک ۱۲/۲۶ درصد و چگالی ویژهٔ خاک ۱/۲۲ است. همچنین، شاخص خمیری خاک ۵/۰۷ به‌دست آمد. با توجه به اعداد حد روانی و شاخص پلاستیسیتهٔ به‌دست‌آمده، مشخص شد که خاک آلودهٔ مورد نظر در این تحقیق از نظر دانه‌بندی در کلاس خاک چسبنده تا خاک آلی (خاک دارای مواد آلی با غلظت بالا) با نفوذپذیری پایین قراردارد. 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 نحوهٔ استفاده از آن و تصفیه و پاک‌سازی 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 نمونهٔ تصادفی نخست از یازده نمونهٔ برداشتی از محل، برای انجام تحلیل آماری و دستیابی به تعداد نمونه‌های لازم مطابق روش ذکرشده در بخش ۴ انجام گرفت (جدول ۲).

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۲. غلظت کل هیدروکربن‌های نفتی در نمونه‌های برداشتی

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

با توجه به نبود حد مجاز و استانداردی 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 میلی‌گرم بر کیلوگرم برای میزان کل هیدروکربن‌های نفتی و بر اساس سطوح مجاز پالایش سایر کشورها استفاده شد. با توجه به نتایج آنالیزهای ارائه‌شده در تمامی نمونه‌ها، مقادیر غلظت ترکیبات فوق در خاک آلوده به‌مراتب بیش از سطوح قابل‌قبول پالایشی است. از این‌رو، خاک رنگ‌بر مستعمل دپوشده در محل دفع پسماندهای شهرک صنعتی سلفچگان پتانسیل آلودگی زیادی از نظر میزان مواد نفتی دارد. به‌بیان دیگر، مقدار دامنهٔ دیزل تقریباً ۴۳۲ برابر حد مجاز و بیانگر این نکته است که پالایش و پاک‌سازی خاک آلودهٔ این سایت برای رسیدن به حد مجاز ضرورت دارد.

جدول ۳. سطح پاکسازی خاک برای کل میزان هیدروکربن های 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	NMED (2006)	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				
Unknown oil	۲۰۰		TPH-GRO	۵۱۰	LDEQ (2003)
Waste oil	۵۰۰		TPH-DRO	۵۱۰	
Gasoline	ناچیز		TPH-ORO	۲۵۰۰	
GRO > C6-C12	۵۰۰	Thompson (2007)	F1: C6-C10	۳۲۰	CCME (2008)
DRO >C12-C28	۲۵۰۰		F2: C10-C16	۲۶۰	
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

www.SID.ir

Archive of SID

برای آنالیز فلزات سنگین موجود در نمونهٔ معرف (مرکب مخلوط) خاک رنگ‌بر مستعمل محل دفع پسماندهای شهرک صنعتی سلفچگان، آنالیز فلزات سنگین نیز روی نمونهٔ معرف اندازه‌گیری شد (جدول ۴). همچنین، برای مقایسه با سطوح مجاز آلاینده‌ها در خاک آلوده در سایت مورد مطالعه، مقادیر حدود پاکسازی خاک سازمان حفاظت محیط‌زیست کشور برای مناطق تجاری با خاک دارای pH بیش از ۷ برای تمامی فلزات سنگین استفاده شد. با توجه به نتایج آنالیزهای ارائه‌شده مشخص شد مقادیر غلظت فلزات سنگین در خاک آلودهٔ این سایت کمتر از مقادیر حد مجاز پاکسازی خاک در مناطق تجاری است. از این‌رو، خاک رنگ‌بر مستعمل دپوشده در محل دفع پسماندهای شهرک صنعتی سلفچگان پتانسیل آلودگی از نظر فلزات سنگین ندارد

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

ردیف	عنوان آزمایش	واحد	نتیجه	مقادیر حدود پاکسازی خاک سازمان حفاظت محیط‌زیست 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

www.SID.ir

Archive of SID

علاوه‌بر این، بـرای آنـالیز هیـدروکربن‌هـای آروماـتیکی چندحلقه‌ای موجود در نمونهٔ معرف (مرکب مخلوط) خـاک رنگ‌بـر مسـتعمل محـل دفـع پسـماندهای شـهرک صـنعتی سلفچگان، آنالیز مربوطه نیز روی نمونهٔ معرف انـدازه‌گیـری شد (جدول ۵).

جدول ۵. نتایج آزمایش‌های آنالیز هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه‌ای روی نمونهٔ 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	PAHs	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

برای مقایسه با سطوح مجاز آلاینده‌ها در خاک آلـوده در سایت مورد مطالعـه، مقـادیر سـطوح مجـاز پالایشـی آب و خاک در کاربری‌های مختلف مندرج در جدول ۵ بر اسـاس استاندارد خـاک صـنعتی اسـتفاده شـد. بـا توجـه بـه نتـایج آنالیزهای در جدول ۵، در این نمونـه مقـادیر غلظـت انـواع هیدروکربن‌های آروماتیـک چنـد حلقـه‌ای کمتـر از مقـادیر استاندارد خاک اسـت. از ایـن‌رو، خـاک رنـگ‌بـر مسـتعمل دپوشده در محل دفع پسماندهای شهرک صنعتی سـلفچگان پتانسیل آلودگی از نظـر هیـدروکربن‌هـای آروماـتیکی چنـد حلقه‌ای ندارد.

آزمایش نشت در واقع مهم‌ترین آزمایشـی اسـت کـه در تعیین میزان کارایی فرایند تثبیت و جامدسازی مطرح اسـت.

www.SID.ir

Archive of SID

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

نتایج حاصل از غلظت آلاینده‌هایی که از نمونه‌های جامدشدهٔ خاک آلوده با سیمان و خاک رس اصلاح‌شده در زمان گیرایی ۲۸ روز با استفاده از آزمایش تعیین سمیت یا تی س ال پی نشت‌کرده است به‌ترتیب ذکرشده در جدول ۶ 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 سیمان و خاک رس اصلاح‌شده، در آزمایش TCLP مورد توجه قرارگرفت (جدول ۷).

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

نام نمونه	درصد سیمان	درصد رس اصلاح‌شده	غلظت نشت‌شده (ppm) TPH	راندمان حذف TPH نسبت به نمونهٔ معرف (درصد)
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 نمونهٔ معرف بدون استفاده از مواد جامدکننده و افزودنی

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

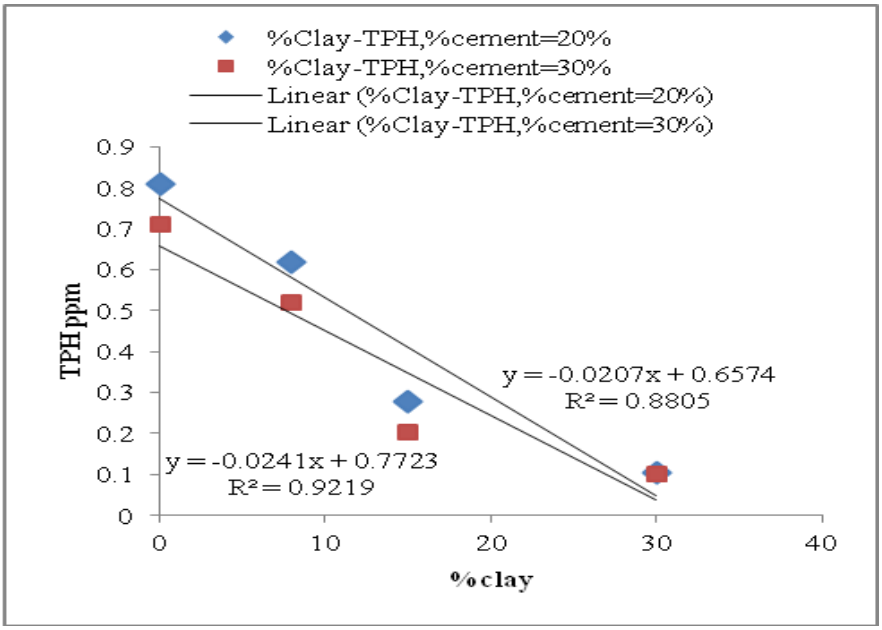
بر این مبنا، غلظت مواد نشت‌کرده از ماتریس جامدشده نسبت به غلظت همان ماده (در زمان متناظر) در نمونهٔ شاهد (نمونهٔ خاک آلودهٔ معرف) محاسبه و تجزیه‌وتحلیل شد. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقایسهٔ نتایج مربوط به غلظت مواد نشت‌کرده از نمونه‌های جامدشده و تثبیت‌شده به نسبت نمونهٔ خام نشان می‌دهد که در تمامی نمونه‌ها درصد بسیار قابل‌قبول حذف هیدروکربن‌های نفتی رخ داده است؛ به‌عبارت دیگر، اکثر قریب به اتفاق مواد آلی در ماتریس محبوس‌شده است و در آزمایش نشت و تعیین سمیت (آزمایش TCLP) اثری از آن‌ها مشاهده نمی‌شود. برای تعیین رابطهٔ بین درصد رس اصلاح‌شده با غلظت هیدروکربن‌های نفتی نشت‌شده در درصدهای سیمان ۲۰ و ۳۰ درصد، رگرسیون خطی انجام شد (شکل ۲).

www.SID.ir

Archive of SID

به‌طور مشخص، با افزایش درصد رس اصلاح‌شده 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.

نتایج حاصل از غلظت آلاینده‌هایی که از نمونه‌های جامدشدهٔ خاک آلوده با آهک و خاک‌رس اصلاح‌شده در زمان گیرایی ۲۸ روز با استفاده از آزمایش TCLP نشت کرد به‌ترتیب ذکرشده در جدول ۸ است.



شکل ۲. نمودار رگرسیون خطی در تعیین رابطهٔ درصد رس اصلاح‌شده با TPH نشت‌شده در درصدهای متفاوت سیمان

جدول ۸. غلظت نشت‌شده از نمونه‌های جامدشدهٔ خاک آلوده با آهک زنده و خاک رس اصلاح‌شده در زمان گیرایی ۲۸ روز

نام نمونه	درصد آهک زنده	درصد رس اصلاح‌شده	غلظت نشت‌شده (ppm) TPH	راندمان حذف TPH نسبت به نمونهٔ 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

www.SID.ir

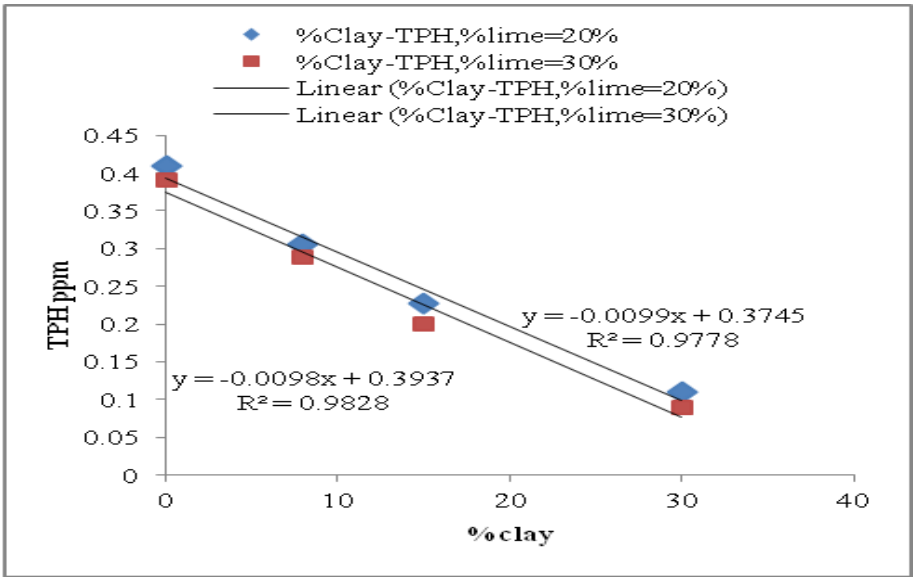
Archive of SID

لازم به ذکر است برای تحلیل کارایی فرایند تثبیت و جامدسازی خاک رنگ‌بر مستعمل دپو شده 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 قرارگرفت (جدول ۷). بر این مبنا، غلظت مواد نشت‌کرده از ماتریس جامدشده نسبت به غلظت همان ماده (در زمان متناظر) در نمونهٔ شاهد (نمونهٔ خاک آلودهٔ معرف) محاسبه و تجزیه‌وتحلیل شد. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقایسهٔ نتایج مربوط به غلظت مواد نشت‌کرده از نمونه‌های جامدشده و تثبیت‌شده به نسبت نمونهٔ خام نشان می‌دهد که در تمامی نمونه‌ها درصد بسیار قابل‌قبول حذف هیدروکربن‌های نفتی رخ داده است. به‌عبارت دیگر، در اکثر قریب به اتفاق مواد آلی شناسایی‌شده در ماتریس محبوس‌شده و در آزمایش نشت (آزمایش تعیین سمیت) اثری از آن‌ها مشاهده نمی‌شود. برای تعیین رابطهٔ بین درصد رس اصلاح‌شده و غلظت TPH نشت‌شده در درصدهای آهک زندهٔ ۲۰ و ۳۰ درصد، رگرسیون خطی انجام شد (شکل ۳).

به‌طور مشخص، با افزایش درصد رس اصلاح‌شده از میزان نشت هیدروکربن‌های نفتی کاسته شده است و افزایش 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 پیش‌گفته، چنین برمی‌آید که استفاده از خاک رس اصلاح‌شده برای تثبیت و جامدسازی خاک رنگ‌بر مستعمل دپوشده در محل دفع پسماندهای شهرک صنعتی سلفچگان کارایی خوبی دارد، به‌نحوی که با افزایش میزان آن به مادهٔ جامدکننده، کارایی آن ماده در محبوس نمودن مادهٔ آلی و فلز سنگین باریم در ماتریس مربوط افزایش و در آزمایش نشت، میزان نشت مادهٔ آلی و فلز سنگین از آن کاهش می‌یابد. لذا، بر این اساس، همچنین بر اساس نتایج سایر فعالیت‌ها و بررسی‌های صورت‌گرفته می‌توان نسبت به ترکیب درصد بهینهٔ مواد برای حذف آلودگی مواد آلی از خاک آلودهٔ 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 به‌دست آمد. لذا، در این تحقیق نیز زمان گیرایی مدنظر در انجام آزمایش‌ها ۲۸ روز بوده است).



شکل ۳. رگرسیون خطی در تعیین رابطهٔ درصد رس اصلاح‌شده با TPH نشت‌شده در درصدهای متفاوت آهک زنده

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۹. مقاومت فشاری آزاد نمونه‌های جامدشدهٔ سیمان و خاک رس اصلاح‌شده (۲۸ روز گیرایی)

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

جدول ۱۰. مقاومت فشاری آزاد نمونه‌های جامدشدهٔ آهک زنده و خاک رس اصلاح‌شده (۲۸ روز گیرایی)

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

همان‌طور که از جدول ۹ و ۱۰ برمی‌آید، افزایش میزان رس اصلاح‌شده باعث افزایش مقدار مقاومت نمونه‌ها شده است. همچنین، فقط برخی نمونه‌ها شرایط حداقل تعریف‌شده در استانداردها برای دفن را برآورده ساخت. لازم به ذکر است استاندارد حداقل برای مقاومت فشاری آزاد متناسب با کاربری آتی و عملیات بعدی است که روی نمونهٔ جامدشده صورت خواهد گرفت. اضافه می‌نماید طبق استانداردهای سازمان حفاظت محیط‌زیست آمریکا، مواد تثبیت و جامدشدهٔ ۲۸ روزه‌ای که دارای حداقل مقاومت فشاری آزاد ۳/۵ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع (به‌عبارت دیگر ۳۵۰ کیلوپاسکال) باشد، قابلیت مدفون‌شدن در محل‌های دفن پسماند را دارد. بر این اساس، فقط برخی نمونه‌های جامدشده در جدول‌های ذکرشده موفق به دستیابی به این مقاومت شده است که باید در تجزیه‌وتحلیل‌ها و معرفی درصد بهینه برای جامدسازی و تثبیت به‌آن توجه شود. اسکن میکروسکوپ الکترونی نمونه‌های جامدشده با زمان گیرایی ۲۸ روز نیز روی تمامی نمونه‌های جامدشده انجام شد. نتایج اسکن این نمونه‌ها در شکل ۴ تا ۷ ارائه شده

www.SID.ir

Archive of SID

است. لازم به ذکر است در این شکل‌ها، عکس‌ها با درجهٔ تفکیک ۲۰۰۰ برابر آمده است. همان‌گونه که در نگاه کلی به تمامی تصاویر مشخص است، ساختار میکروسکپی 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، اندازهٔ ذرات در تصویر متعلق به نمونهٔ C20 در مقایسه با نمونه بزرگ‌تر و بر همین مبنا حفرات آن نیز بزرگ‌تر است. همچنین، در تصویر متعلق به نمونهٔ C20M8 توزیع ذرات یکنواخت‌تر و به همان نسبت اندازهٔ ذرات نیز کوچک‌تر است. در همین تصویر، مشابه این وضعیت برای تصاویر متعلق به نمونهٔ C20M30 نسبت به نمونهٔ C20M15 نیز وجود دارد. در نمونهٔ C20M30 اندازهٔ ذرات از نمونهٔ C20M15 بزرگ‌تر است، ولی ذرات این نمونه نسبت به نمونهٔ C20M15 یکنواختی بیشتری دارد. همچنین، در نمونهٔ C20M30 گسترهٔ پخش ذرات زیادتر است، به‌گونه‌ای که در مقایسه با نمونهٔ 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 انجام‌شده در شکل ۸، نمونهٔ L20 نسبت به نمونهٔ L20M8 ذرات و حفرات بزرگ‌تری دارد، به‌گونه‌ای که محدودهٔ اندازهٔ ذرات در نمونهٔ L20 دارای ذراتی در محدودهٔ ۲ تا ۱۰ میکرومتر است، در حالی که اندازهٔ ذرات در نمونهٔ L20M8 در محدودهٔ ۲ تا ۸ میکرومتر است. همچنین، در این شکل نمونهٔ L20M15 نسبت به نمونهٔ L20M30 حفره‌دارتر و به‌صورت کلوخه‌ای است. همچنین، ساختار تمامی تصاویر ارائه‌شده در شکل ۹ تخلخل زیادی نیز دارد.

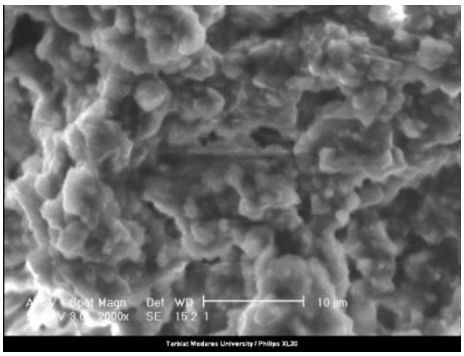
در مجموع، طبق بررسی‌های انجام‌شده در مورد شکل ۶ تا ۹، مشخص می‌شود که در تمامی نمونه‌ها سه مادهٔ مختلف (شامل خاک آلوده، سیمان و خاک رس اصلاح‌شده یا خاک آلوده، آهک زنده و خاک رس اصلاح‌شده) حضور دارد که هر یک به‌تنهایی دارای فازهای معدنی و ساختارهای خاص خود است و تمیز دادن آن‌ها در تصاویر امری بسیار مشکل است، زیرا تقدم برخی فازها در تصاویر سبب پوشیده‌شدن 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 به‌دلیل 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 جامدشده به‌وجود آورد.

همچنین، بررسی‌های انجام‌شده بیانگر این است که تمامی نمونه‌ها ساختار و مورفولوژی تقریباً مشابهی دارد، ولی محصولات اصلی هیدراسیون سیمان و آهک فقط در برخی نمونه‌ها قابل‌مشاهده بود. در مجموع، آنچه مشخص است این است که در تمامی نمونه‌ها محصولات فرایند هیدراسیون به‌صورت قابل‌توجهی رشد پیدا کرده است و رس اصلاح‌شده یا آلاینده مانع از انجام این واکنش نیست. از طرف دیگر، وجود محصولات هیدراسیون (اشکال سوزنی‌شکل) 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 تهیهٔ نمونه‌ها مناسب بوده است.

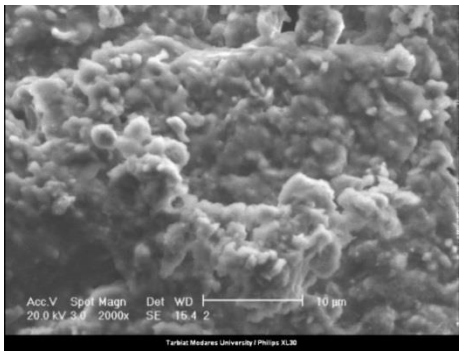
یکی از مهم‌ترین تفاوت‌های موجود بین تصاویر نمونه‌ها وجود منافذ میکروسکوپی در ماتریس آن‌هاست. این موضوع بیانگر قابلیت نشت و جریان یافتن مایعات استخراجی در فضای خالی ماتریس جامدشده و توانایی تماس آن با آلاینده‌های مورد بررسی است که باید در بررسی عکس‌های میکروسکوپی به آن توجه داشت. لازم به ذکر است این موضوع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

www.SID.ir

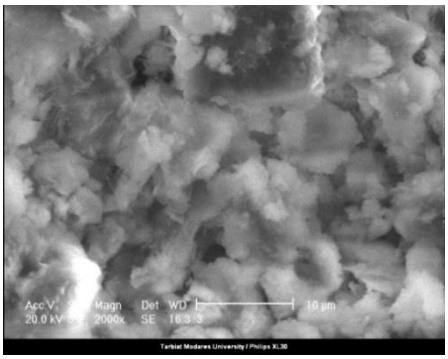
Archive of SID



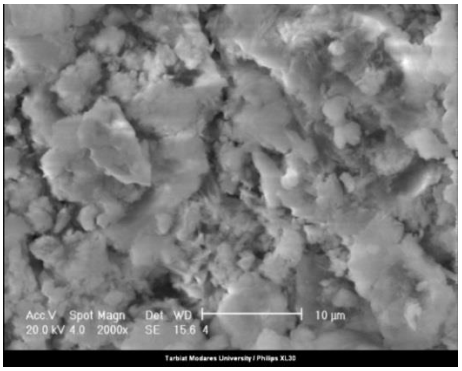
C20



C20M8

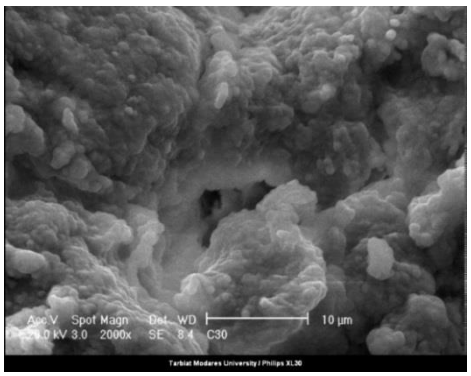


C20M15

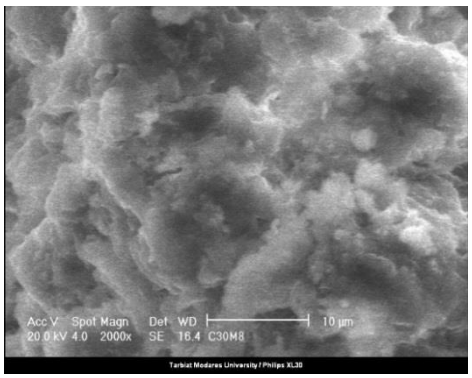


C20M30

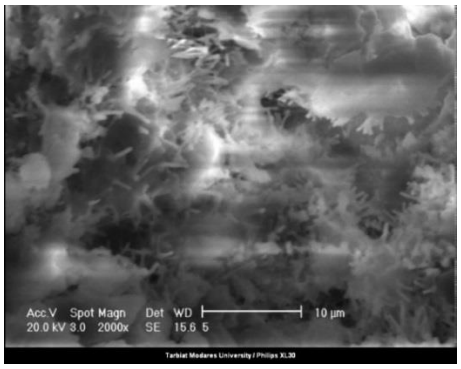
شکل ۴. تصاویر اسکن میکروسکوپی نمونه‌های جامدشده با زمان گیرایی ۲۸ روز (بزرگ‌نمایی ۲۰۰۰x)



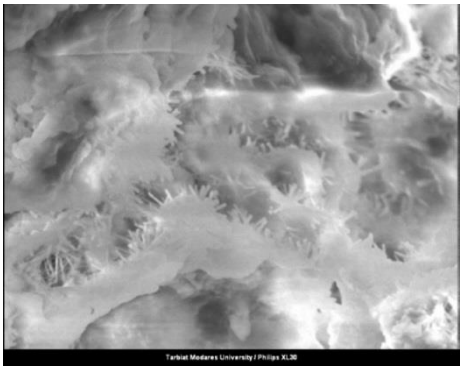
C30



C30M8



C30M15

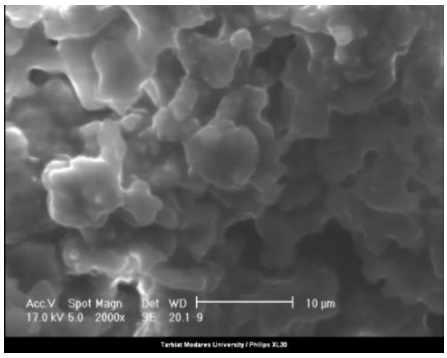


C30M30

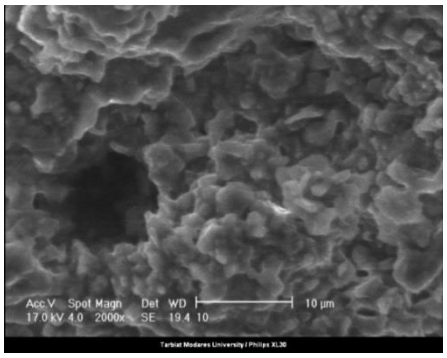
شکل ۵. تصاویر اسکن میکروسکوپی نمونه‌های جامدشده با زمان گیرایی ۲۸ روز (بزرگ‌نمایی ۲۰۰۰x)

www.SID.ir

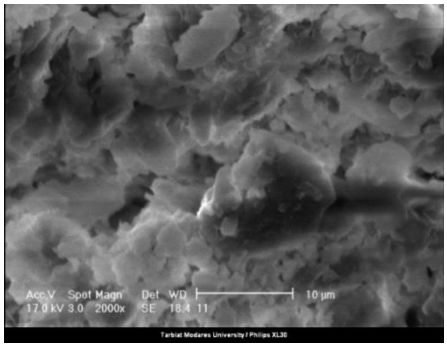
Archive of SID



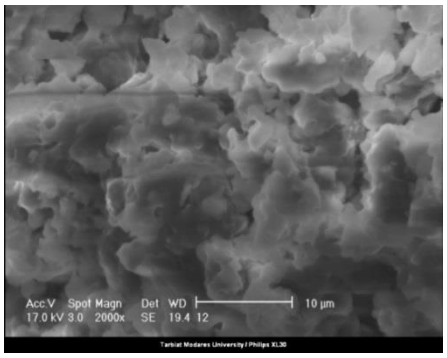
L20



L20M8

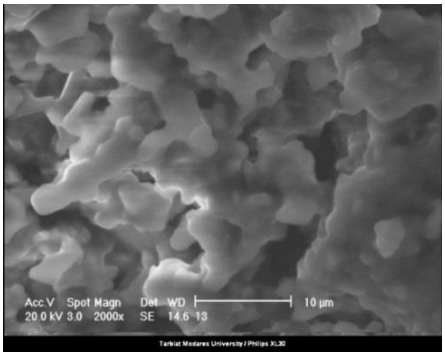


L20M15

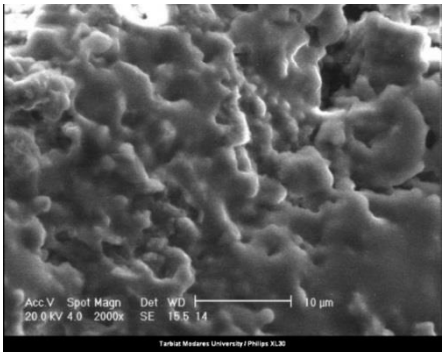


L20M30

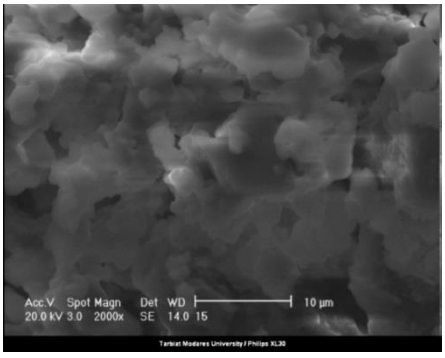
شکل ۶. تصاویر اسکن میکروسکوپی نمونه‌های جامدشده با زمان گیرایی ۲۸ روز (بزرگ‌نمایی ۲۰۰۰x)



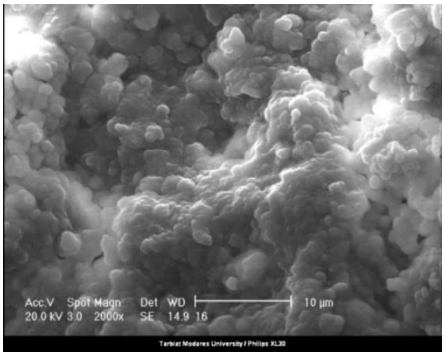
L30



L30M8



L30M15



L30M30

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

www.SID.ir

Archive of SID

۶. نتیجه‌گیری

در مجموع، با توجه به بررسی‌های آزمایشگاهی و مطالعات صورت‌گرفته، آزمایش نشت تعیین سمیت نشان داد که در تمامی نمونه‌ها افزودن خاک رس اصلاح‌شده سبب کاهش میزان نشت شده است. در حذف میزان کل هیدروکربن‌های نفتی، طبق مطالب ارائه‌شده در جدول ۶ و ۸، نمونه‌های حاوی ۲۰ درصد سیمان یا آهک و ۳۰ درصد رس اصلاح‌شده (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 انجام‌شده، در این نمونه‌ها کارایی نمونه با رس اصلاح‌شدهٔ بیشتر بهتر بوده است، به‌طوری که نمونه دارای ۳۰ درصد رس اصلاح‌شده (با ۲۰ درصد سیمان یا آهک زنده) بهترین کارایی را داشت. نتایج حاصل از آزمون مقاومت فشاری آزاد نشان داد که افزایش مقدار رس اصلاح‌شده (تا ۳۰ درصد) سبب کاهش مقاومت فشاری آزاد به حد غیرقابل‌قبول نخواهد شد. نتایج آزمایش اسکن میکروسکوپ الکترونی و آزمایش نشت (آزمایش TCLP) بر این نکته دلالت دارد که دو دلیل در افزایش کارایی نمونه‌های جامدشده مؤثر بوده است؛ یکی بالارفتن میزان رس اصلاح‌شده که سبب افزایش قدرت جذب هیدروکربن‌های نفتی در تثبیت و جامدسازی خاک آلودهٔ محل شد، و دیگری کاهش حجم منافذ در ماتریس که سبب کاهش میزان نشت (حجم مادهٔ نشت‌شده) شده است. نمونه‌های دارای رس اصلاح‌شده با سیمان ۲۰ درصد در مجموع دارای منافذ خالی کمتری نسبت به نمونه‌های دارای رس اصلاح‌شده با سیمان ۳۰ درصد بود و در نتیجه کارایی بهتری داشت، ضمن آنکه وجود محصولات هیدراسیون در اسکن میکروسکوپی برخی نمونه‌ها (مانند نمونه C20M30) در شکل ۴ مؤید این نکته است که هیدراسیون سیمان به‌شکل تقریباً کامل صورت‌گرفته و مقدار آب مصرفی برای تهیهٔ نمونه‌ها مناسب بوده است. همچنین، نتایج بررسی‌های انجام‌شده بیانگر آن است که اگر فقط سازوکار جامدشدن در کاهش نشت آلاینده‌ها مؤثر باشد، انتظار می‌رود که نشت از نمونه‌های دارای ۳۰ درصد سیمان یا آهک و ۳۰ درصد رس اصلاح‌شده کمتر از سایر ترکیبات رخ دهد، اما از آنجا که علاوه‌بر جامدشدن، سازوکار تثبیت آلاینده‌ها با رس اصلاح‌شده 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 اصلاح‌شده در بهبود کارایی فرایند تثبیت و جامدسازی در تثبیت هیدروکربن‌های نفتی و فلزات سنگین موجود در خاک آلودهٔ محل اثر مثبتی داشته است و استفاده از آن با درصد بهینهٔ به‌دست‌آمده شامل به‌کارگیری ۲۰ درصد سیمان و ۳۰ درصد رس اصلاح‌شده (آلی دوست) برای تثبیت و جامدسازی خاک آلودهٔ محل دفع پسماندهای شهرک صنعتی سلفچگان توصیه می‌شود. لازم به ذکر است که در این درصد (درصد بهینه)، در نمونه‌های آزمایش‌شده خصوصیات مقاومتی ماتریس جامدشده و نتایج اسکن میکروسکوپی نیز مناسب ارزیابی شده است و در مجموع شرایط اجرایی قابل‌قبولی را برای اجرای کار فراهم می‌کند.

یادداشت‌ها

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

www.SID.ir

Archive of SID

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 usind 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 Apllied 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 ordering 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. Evaloution of quicklime mixing for the remediation of petroleum contaminated soils. Journal of Hazardous Materials, 141: 395-409.

Schlichting, S., Wu, T., Englund, B., Garroutte, 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.

www.SID.ir

Archive of SID

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. Nanhalognated organics by gas chromatoghraphy, 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.

www.SID.ir