

پالایش منابع خاکی آلوده به آرسنیک با روش شست‌وشوی خاک

سعید گیتی‌پور^۱، ادريس مددیان*^۲، سیاوش صدیقیان^۳، امیراسد کوشکی^۲

۱. دانشیار دانشکده محیط‌زیست، دانشگاه تهران

۲. کارشناس ارشد مهندسی محیط‌زیست دانشکده محیط‌زیست، دانشگاه تهران

۳. دانشجوی دکتری مهندسی محیط‌زیست، دانشکده محیط‌زیست، دانشگاه تهران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۹/۱۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۳/۱

چکیده

توسعه فعالیت‌های صنعتی در دنیا، به‌ویژه در چند دهه اخیر، به گسترش آلودگی‌های زیست‌محیطی منجر شده است. آلودگی خاک همواره یکی از خطرناک‌ترین تهدیدات زیست‌محیطی برای زندگی بشر، گونه‌های جانوری و گیاهی به‌شمار می‌رود. فلزات سنگین هم‌چون آرسنیک از جمله عناصر بالقوه خطرناک در ایجاد آلودگی خاک محسوب می‌شوند. این مواد به طرق گوناگون به بدن انسان وارد می‌شوند و تأثیرات شدیدی را ایجاد می‌کنند. در این تحقیق، به بررسی بازدهی روش خاک‌شویی در پاک‌سازی منابع خاکی آلوده به فلز آرسنیک پرداخته شده است. این مطالعه براساس نمونه‌برداری از نمونه‌های خاکی در یک نیروگاه برق در شهر تهران صورت گرفته است. آزمایش‌های مورد نظر در سه بازه زمانی ۲ ساعت، ۴ ساعت و ۶ ساعت و در سه محیط اسیدی (pH=۲/۳)، خنثی (pH=۶/۹) و بازی (pH=۱۲/۷) اجرا شدند. علاوه بر این از محلول متانول با غلظت ۸ درصد برای پاک‌سازی نمونه‌های آلوده استفاده شده است. نتایج این تحقیق نشان داد که در درجه حرارت ۲۵ درجه سانتی‌گراد، میانگین بازدهی حذف آرسنیک در محیط‌های بازی، خنثی و اسیدی به ترتیب برابر با ۷۳، ۶۳ و ۵۵ درصد است. در شرایط مشابه، این مقادیر در درجه حرارت ۵۰ درجه سانتی‌گراد برابر با ۷۸، ۷۲ و ۶۷ درصد است. همچنین آنالیز نمونه‌های خاکی نشان داد که مدت زمان بهینه، که در آن بیشترین میزان حذف رخ می‌دهد، ۴ ساعت پس از آغاز آزمایش‌هاست.

واژه‌های کلیدی: آرسنیک، خاک آلوده، خاک‌شویی، فلزات سنگین، متانول.

۱. مقدمه

محصولات شیمیایی به افزایش تدریجی آلودگی خاک ناشی از فلزات سنگین و متعاقباً آلودگی منابع آب آشامیدنی و زیرزمینی منجر می‌شود (Di Palma & Medici, 2002). سرنوشت و انتقال فلزات موضوع پیچیده‌ای است که به فرآیند انتقال فیزیکی و کانی‌شناسی خاک بستگی دارد (Martínez-Sánchez *et al.*, 2011). شکل ۱ بیانگر نشت آلودگی از یک مخزن ذخیره زیرزمینی است که در حکم منبعی برای آلودگی خاک مطرح است.

آلودگی خاک در مقام مشکلی فزاینده در سراسر دنیا در حال گسترش است. این معضل به‌خصوص در مواردی که مخلوطی از آلاینده‌های گوناگون در محیط ظهور پیدا می‌کنند پیچیده‌تر می‌شود، به‌گونه‌ای که می‌بایست عملیات پاک‌سازی پیشرفته‌تری به‌کارگرفته شود و البته این امر به افزایش هزینه‌های احیا و پاک‌سازی منجر می‌شود (Elgh-Dalgren *et al.*, 2009). رشد سریع پیشرفت‌های صنعتی و استفاده‌های عمده از



شکل ۱. شمایی از نشت آلاینده‌ها از مخازن ذخیره زیرزمینی

انسانی هم‌چون معدن‌کاری و عملیات ذوب‌کاری می‌توانند وارد محیط‌زیست شوند (Wang & Mulligan, 2009). از نظر احیا و پاک‌سازی، حذف هم‌زمان آلاینده‌های آلی ماندگار در محیط و فلزات سنگین، به‌علت تفاوت در ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن‌ها، عملی دشوار است (Rivero-Huguet & Marshall, 2011).

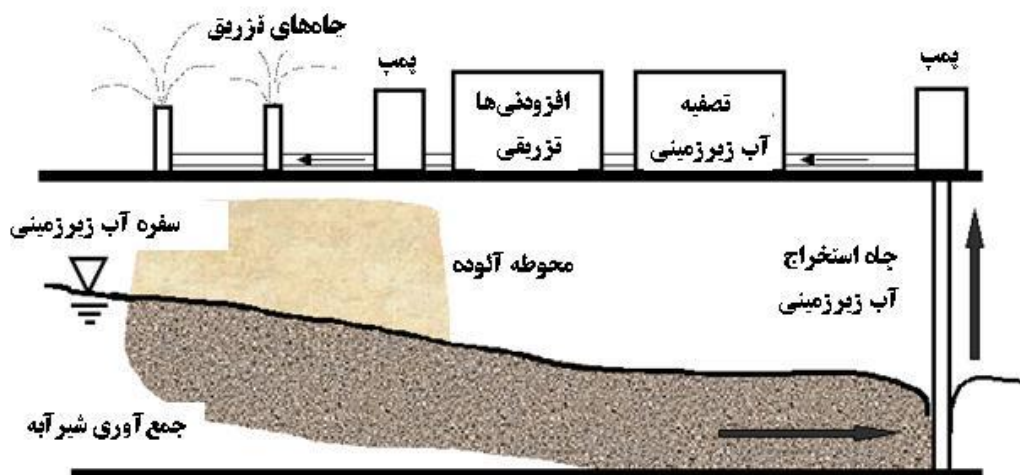
اولین گام در طراحی سیستم خاک‌شویی در

آرسنیک در محیط‌زیست به‌صورت طبیعی و در بیش از ۳۰۰ شکل معدنی ظهور پیدا می‌کند که اغلب به شکل آرسنوپیریت (FeAsS) یافت می‌شود (Meunier *et al.*, 2011). گزارش‌های فراوانی درباره آثار مخرب آرسنیک و دیگر فلزات سنگین در سراسر دنیا به چاپ رسیده است. این عناصر سمی به‌صورت طبیعی تشکیل می‌شوند و به هر دو طریق فرآیندهای طبیعی هم‌چون هوازدگی و فرسایش و فعالیت‌های

و دفن، جداسازی، محصورسازی، الکتروکینتیک، پالایش بیولوژیکی، خاک‌شویی در محل و خاک‌شویی خارج از محل اشاره کرد. در بین این روش‌ها، خاک‌شویی در محل در مقایسه با روش‌های حفاری و دفن متعارف دارای مزایای بسیاری است که شامل هزینه‌های نسبتاً پایین اجرا و نتایج مخرب زیست‌محیطی کمتر می‌شود (Lee et al., 2011). شکلی شماتیک از فرآیند خاک‌شویی در محل در شکل ۲ مشاهده می‌شود.

مقیاس صنعتی، تحلیل امکان‌پذیری آن است که شامل آنالیزهای تحلیلی و آزمایشگاهی جهت آزمایش کردن ویژگی‌های اصلی خاک است (Abumaizar & Smith, 1999; Sierra et al., 2008). در گام دوم، آزمایش‌ها در مقیاس نیمه‌صنعتی در شرایط و تجهیزات مشابه با مقیاس صنعتی اجرا می‌شود (Sierra et al., 2010).

در حال حاضر، تکنولوژی‌های گوناگونی جهت پالایش خاک در محوطه‌های خاکی آلوده به فلزات سنگین وجود دارد که از آن جمله می‌توان به حفاری



شکل ۲. نمایی شماتیک از فرآیند خاک‌شویی در محل

تحرک‌ساز مناسب، جهت متحرک ساختن آلاینده‌ها و شست‌وشو و جاری ساختن آن‌ها از ناحیه اشباع به سمت آب‌های زیرزمینی، انجام می‌شود؛ جایی که در نهایت توسط سیستم تصفیه به دام می‌افتند (Truex et al., 2010). در این روش، آلاینده‌هایی که جذب ذرات خاک می‌شوند، به وسیله یک محلول با پایه آبی از خاک جدا می‌شوند. آب شست‌وشو نیز با روش‌هایی هم‌چون اضافه کردن عامل شیمیایی، اسید، سورفکتانت، عامل کی‌لیت‌کننده و یا با تغییر در pH آن ممکن است موجب تقویت حذف آلاینده‌های آلی و

خاک‌شویی در محل تکنیکی خلاقانه جهت پاک‌سازی محوطه‌های خاکی آلوده است که در آن خاک‌های آلوده به وسیله محلولی شسته می‌شوند. خاک‌شویی موجب حرکت آلاینده‌ها به مکانی می‌شود که نهایتاً حذف می‌شوند. معنای لغت «درجا» در خاک‌شویی درجا، خاک‌شویی «در محل» است و منظور از آن پاک‌سازی خاک‌های آلوده به گونه‌ای است که هیچ‌گونه خاک‌برداری در آن صورت نمی‌گیرد (USEPA, 1996). عملیات خاک‌شویی در محل از طریق اضافه کردن آب و در صورت نیاز عامل

حذف شدند. در ادامه مقدار ۶ کیلوگرم از خاک همگن شده به داخل سه محفظه شیشه‌ای ۵ لیتری (شماره‌های ۱، ۲ و ۳) منتقل شد، به گونه‌ای که هر کدام از آن‌ها حاوی ۲ کیلوگرم خاک شدند. شایان ذکر است که نمونه‌های خاکی قبل از انجام آزمایش‌ها و آنالیزهای بعدی، در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند.

آلوده کردن نمونه‌ها با انتقال ۲۹۷ میلی‌لیتر آب در یک بشر ۵۰۰ میلی‌لیتری انجام شد. سپس ۳ میلی‌لیتر از آرسنیک با غلظت ۳ پی‌پی‌ام به داخل بشر اضافه شد و محتوی بشر به صورت همه‌جانبه و به مدت ۱۰ دقیقه کاملاً هم زده شد. در گام بعدی، ۱۰۰ میلی‌لیتر از محلول به داخل هر کدام از سه محفظه شیشه‌ای حاوی ۲ کیلوگرم خاک اضافه شد. محتوی خاک نیز به وسیله مخلوط‌کن Hubbard و به مدت ۱۰ دقیقه هم زده شد تا نهایتاً خاک یکنواختی حاصل شد. در مورد آلوده کردن خاک‌ها با آرسنیک، pH نمونه‌ها به مقادیر ۲/۳ و ۱۲/۶ رسانده شد. این امر به ترتیب با اضافه کردن مقادیر کافی اسید هیدروکلریک و هیدروکسید سدیم به داخل بشرهای ۲۰۰ میلی‌لیتری صورت گرفت که هر کدام حاوی ۱۰۰ میلی‌لیتر آب دی‌یونیزه شده بودند. در ادامه محتوی بشرها به خاک درون جارهای شیشه‌ای انتقال یافت. خاک درون جارها نیز با دستگاه لرزاننده، به مدت ۱۰ دقیقه تکان داده شد تا نهایتاً خاکی یکنواخت حاصل شد. شایان ذکر است که pH نمونه شماره ۳ دست‌نخورده و برابر با همان مقدار قبلی (pH برابر با ۶/۹) باقی ماند. در انتها نیز درب جارها به صورت کاملاً محکم گذاشته شد. جارها به منظور انجام آزمایش‌های شست‌وشو در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد نگه داشته شدند.

فلزات سنگین شود (Peters, 1999). کمک‌حلال‌های شست‌وشو، با بهره‌گیری از مواد شیمیایی‌ای هم‌چون اتانول و متانول، سرعت بالاتری را در حذف توده آلاینده‌های کلرینه‌شده از خود نشان می‌دهند. این امر با استفاده از انحلال و یا تحریک آلاینده‌ها از ناحیه آلوده صورت می‌گیرد (Chen & Clark, 2009).

در این مطالعه، جهت تسریع در نرخ حذف آرسنیک و افزایش بازدهی، از متانول که یکی از مشتقات الکلی است، با غلظت ۸ درصد در آب استفاده شد. بنابراین، هدف از انجام دادن این تحقیق بررسی تأثیر متانول در مقام عامل شست‌وشو در پاک‌سازی خاک‌های آلوده به فلز آرسنیک است. در این راستا، جهت ارزیابی بازدهی تکنیک خاک‌شویی در پاک‌سازی نمونه‌های خاکی آلوده به آرسنیک، تأثیر پارامترهای هم‌چون مدت زمان شست‌وشو، pH و درجه حرارت نیز بررسی شد.

۲. مواد و روش‌ها

این تحقیق با جمع‌آوری ۸ نمونه خاکی از محل‌های گوناگون از یک نیروگاه برق در شهر تهران صورت گرفت. روش نمونه‌برداری با استفاده از آنچه در فصل چهارم روش‌های آزمایش مواد زائد جامد، در آژانس حفاظت محیط‌زیست کشور آمریکا، به‌مثابه روش‌های فیزیکی و شیمیایی آمده، اجرا شده است (USEPA, 2007). نمونه‌ها براساس استاندارد ASTM D422-63 همگن شدند. مشخصات اولیه نمونه‌های خاکی بیانگر آن بود که اسیدیتته خاک برابر با ۹/۶ (ASTM, 2007) و درصد رطوبت برابر با ۱۶/۷ درصد (ASTM, 1998) است. علاوه بر آن، آزمایش‌های حدود آتربرگ نشان داد که نوع خاک مورد استفاده ماسه سیلتی است. ابتدا خاک مورد نظر با استفاده از الک شماره ۱۸ غربال شد و ذرات بزرگ‌تر از ۱ سانتی‌متر از خاک

۱.۲. آماده‌سازی شوینده

همان‌گونه که ذکر شد، در این تحقیق از متانول به‌مثابه شوینده و در غلظت ۸ درصد جهت شست‌وشوی نمونه‌های خاکی آلوده استفاده شد. برای دستیابی به این غلظت، یک محفظه فلزی ۵ لیتری آماده شد و ۴۶۰۰ میلی‌لیتر آب درون آن ریخته شد. در ادامه ۴۰۰ میلی‌لیتر از متانول به داخل محفظه اضافه شد. سپس درپوش محفظه‌های مورد نظر گذاشته شد و محفظه‌ها به مدت ۱۰ دقیقه جهت یکنواخت ساختن عامل شست‌وشو هم زده شدند.

۲.۲. شست‌وشوی نمونه‌های خاکی

مقدار خاک مورد استفاده برای هر آزمایش ۴۰۰ گرم است. در ادامه جهت شست‌وشوی نمونه‌ها، میزان خاک مورد نظر به درون دستگاه شست‌وشو انتقال داده شد (شکل ۳) و جهت دستیابی به وزن مخصوص خشک بهینه ۱/۶۵ گرم بر سانتی‌مترمکعب، بخوبی متراکم شد. سپس محلول متانول ۸ درصد از طریق خاک درون سیلندر (به ارتفاع و قطر ۱۲ سانتی‌متر) تراوش کرد و مایع حاصل از شست‌وشو در بازه‌های زمانی ویژه جمع‌آوری شد.



شکل ۳. دستگاه شست‌وشوی خاک



باید توجه شود که بازه‌های زمانی شست‌وشوی نمونه‌ها با فرض عبور یک‌بارۀ محلول شست‌وشو از حجم منافذ نمونه‌های خاکی تعیین شد. آزمایش‌های مورد نظر در دو درجه‌حرارت ۲۵ و ۵۰ درجه سانتی‌گراد و هرکدام در سه محیط اسیدی (pH برابر ۲/۳)، خنثی (pH برابر ۶/۹) و بازی (pH برابر ۱۲/۷) انجام شدند. برای حرارت دادن نفوذکننده‌های شست‌وشو از یک حمام آب استفاده شد. جهت تصفیه نمونه‌های مورد نظر، سه بازۀ زمانی شست‌وشوی ۲ ساعت، ۴ ساعت و ۶ ساعت انتخاب شد. جهت متراکم کردن خاک از یک سیلندر فلزی مجهز به یک دریچه بر روی درپوش آن

استفاده شد. جهت آنالیز نمونه‌ها میزان مایع حاصل از شست‌وشو در بازه‌های زمانی ۲ ساعت، ۴ ساعت و ۶ ساعت جمع‌آوری شد و براساس روش SW846 آژانس حفاظت محیط‌زیست کشور آمریکا مورد بررسی قرار گرفت. شایان ذکر است که در ابتدا هیچ‌گونه مقادیر آرسنیک در نمونه‌های خام اولیه یافت نشد. باتوجه به پارامترهای مورد بررسی، در مجموع ۳۶ نمونه مایع برای آنالیز در دستگاه جذب اتمی تولید هیدرید جمع‌آوری شد. تصویری از دستگاه جذب اتمی تولید هیدرید در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴. دستگاه جذب اتمی تولید هیدرید جهت آنالیز نمونه‌ها

براساس نتایج حاصل از آزمایش نفوذپذیری، مدت زمان ۲ ساعت لازم است تا خاک اجازه تراوش یک‌بارۀ محلول شست‌وشو را در سراسر نمونه را صادر کند.

درجه حرارت

همان‌گونه که ذکر شد، این آزمایش‌ها در درجه حرارت ۲۵ و ۵۰ درجه سانتی‌گراد و همچنین محیط‌های گوناگون انجام شدند. میانگین غلظت تجمعی آرسنیک در دو درجه حرارت مذکور در شکل ۵ به تصویر کشیده شده است. گفتنی است که با افزایش درجه حرارت محلول شست‌وشو از ۲۵ درجه سانتی‌گراد به ۵۰ درجه سانتی‌گراد، میانگین بازدهی حذف آرسنیک از ۶۳ درصد به ۷۲ درصد افزایش یافت.

شکل ۶ نشان‌دهنده تأثیر شرایط گوناگون آزمایشگاهی در حذف آرسنیک از خاک‌های آلوده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، بالاترین میانگین حذف این آلاینده از نمونه‌ها در مدت زمان ۴ ساعت از شروع آزمایش به دست آمده است.

۴. بحث و نتیجه‌گیری

خاک‌شویی در محل روشی برای پاک‌سازی خاک‌های آلوده در محل است، بدون اینکه به هیچ‌گونه

۳. نتایج

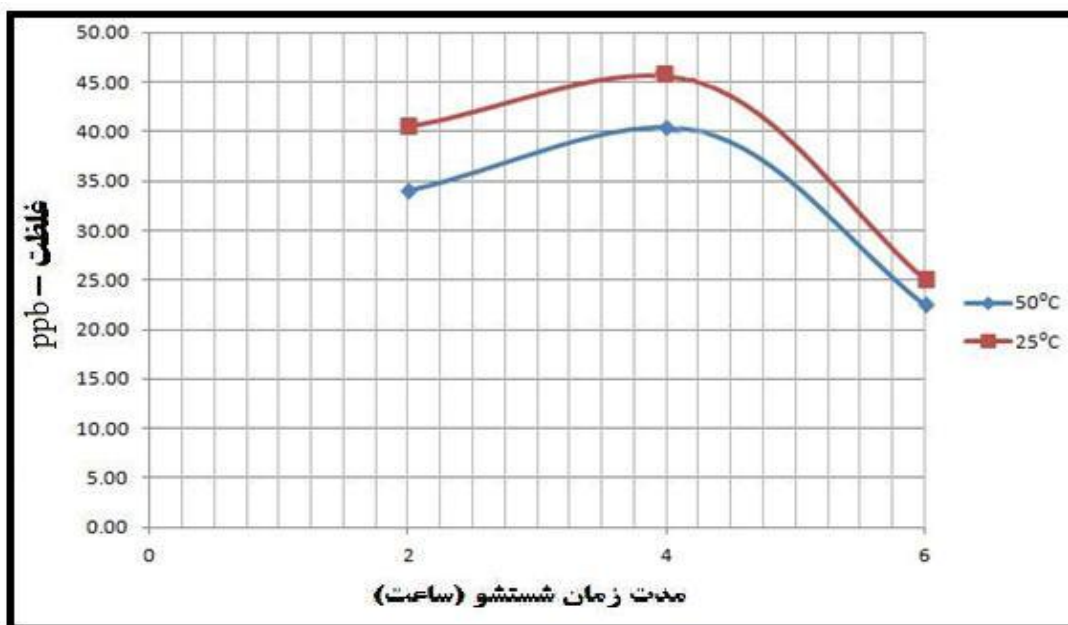
۳.۱. اثر پارامترهای محیطی بر حذف آرسنیک

pH

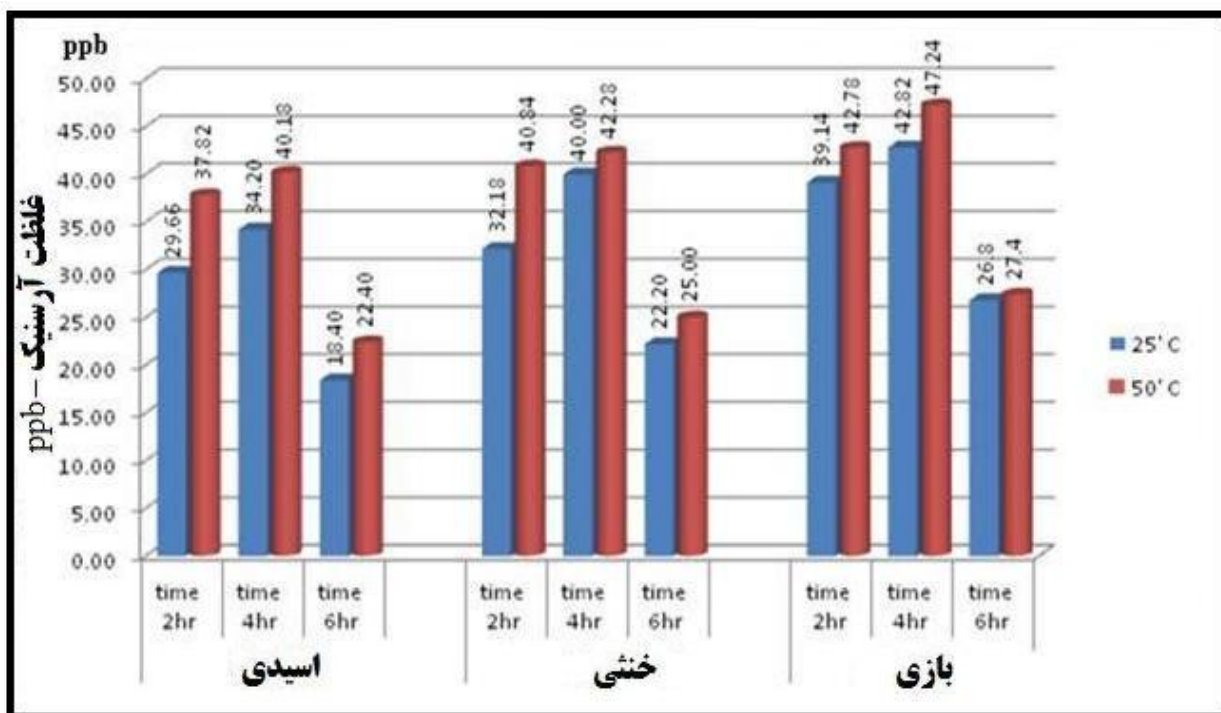
نتایج این تحقیق نشان داد که بیشترین بازدهی‌های حذف ۷۵، ۶۳ و ۵۰ درصد به ترتیب در مقادیر pH ۱۲/۷، ۶/۹ و ۲/۳ حاصل شد. شایان ذکر است که در هر سه محیط اسیدی، خنثی و بازی مقادیر بهینه حذف آرسنیک در مدت زمان ۴ ساعت از شروع آزمایش حاصل شد. با وجود این، بیشترین و کمترین مقادیر حذف آرسنیک به ترتیب در محیط‌های بازی و اسیدی به وقوع پیوست. شایان ذکر است که افزایش pH محلول شست‌وشو ممکن است به تورم و یا انبساط ساختار آلی خاک و تبدیل آن از یک پیکربندی محکم و چگالیده به حالتی بی‌شکل و شل منجر شود (Schwarzenbach et al., 1993).

مدت زمان شست‌وشو

به منظور ارزیابی تأثیر بازه‌های زمانی شست‌وشو در پاک‌سازی نمونه‌های خاکی آلوده، سه بازه ۲ ساعت، ۴ ساعت و ۶ ساعت بررسی شدند. انتخاب این زمان‌ها براساس زمان مورد نظر برای یک‌بار عبور محلول شست‌وشو از حجم منافذ نمونه‌های خاکی است.



شکل ۵. غلظت تجمعی آرسنیک پس از عملیات خاک‌شویی در درجه‌های ۲۵ و ۵۰ درجه سانتی‌گراد



شکل ۶. مقادیر حذف آرسنیک از نمونه‌های خاکی آلوده در شرایط گوناگون اسیدیته، درجه حرارت و زمان‌های شست‌وشو

در مدت زمان ۴ ساعت از شروع آزمایش حاصل شد. تجزیه و تحلیل نمونه‌ها بیانگر آن است که میزان بهینه حذف آرسنیک در شرایط بازی در مدت زمان ۴ ساعت از آغاز آزمایش و درجه حرارت ۵۰ درجه سانتی‌گراد به وقوع پیوست که بیانگر بازدهی تکنیک خاک‌شویی در محل جهت پاک‌سازی خاک‌های آلوده به آرسنیک است. همچنین، نتایج به‌دست‌آمده در این تحقیق، در مقایسه با مطالعاتی که پیش از پاک‌سازی خاک‌های آلوده به فلزات خصوصاً فلزات سنگین صورت گرفته است و با توجه به نوع و هزینه شوینده مورد استفاده در این تحقیق، نتایجی قابل قبول است. برای مثال، گیتی‌پور و همکاران در مطالعه‌ای که جهت پالایش خاک‌های آلوده به کروم و کادمیوم انجام داده‌اند، با استفاده از اسید هیدروکلریک به بالاترین درصد‌های حذف ۸۲/۶۹ درصد و ۷۴/۴۷ درصد به ترتیب برای کروم و کادمیوم دست یافتند (Gitipour et al., 2011).

در انتها شایان ذکر است که در روش خاک‌شویی، آلاینده‌هایی که در ذرات خاک جذب شده‌اند، در یک محیط آبی از خاک جدا می‌شوند. آب با فشار می‌تواند برای کمک به انتقال آلاینده‌ها از سطح ذرات خاک مورد استفاده قرار گیرد. در نهایت، از آنجا که این روش در مقیاس‌های کوچک دارای بازدهی بالایی بوده است، قابلیت کاربرد در مقیاس‌های بزرگ‌تر را نیز دارد.

خاکبرداری نیاز باشد (USEPA, 2002). در این تحقیق، استخراج آرسنیک از خاک‌های آلوده به این آلاینده با استفاده از تکنیک خاک‌شویی در محل بررسی شد. در این راستا مقادیر گوناگون درجه حرارت، pH و زمان‌های شست‌وشو در طول آزمایش‌های مورد نظر بررسی شد. نتایج نشان داد که میانگین بازدهی‌های حذف در محیط‌های بازی، خنثی و اسیدی و در درجه حرارت ۲۵ درجه سانتی‌گراد به ترتیب برابر با ۷۳، ۶۳ و ۵۵ درصد است. این مقادیر در درجه حرارت ۵۰ درجه سانتی‌گراد و شرایط محیطی مشابه مذکور به ترتیب برابر با ۷۸، ۷۲ و ۶۷ درصد است که نشان می‌دهد هرچه درجه حرارت بیشتر باشد، بازدهی حذف آرسنیک نیز بیشتر خواهد بود.

همچنین نتایج این آزمایش حاکی از آن است که روش خاک‌شویی در محل، برای خاک‌های درشت‌دانه‌تر روش مناسبی است. شایان ذکر است که خاک مورد استفاده در این آزمایش ماسه سیلتی بود که برای استفاده در خاک‌شویی درجا مناسب است. افزایش درجه حرارت از ۲۵ به ۵۰ درجه سانتی‌گراد موجب تسریع در حرکت مولکول‌های حلال و در نتیجه موجب افزایش احتمالی برخورد بین محلول شست‌وشو و آلاینده آرسنیک شد که نهایتاً به افزایش ۱۹ درصدی در بازدهی حذف آلاینده‌ها انجامید. علاوه‌براین، برای سه بازه زمانی شست‌وشوی ۲ ساعت، ۴ ساعت و ۶ ساعت، بالاترین بازدهی حذف

منابع

- Abumaizar, J., Smith H (1999) "Heavy metal contaminants removal by soil washing," *Journal of Hazardous Materials* 70: 71-86.
- ASTM (American Society for Testing and Materials) (2007) Standard Test Method for pH of Soils, Designation No. D4972, West Conshohocken, PA, ASTM.
- ASTM (American Society for Testing and Materials) (1998) D2216 Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass, Designation No. D2216, West

- Conshohocken, PA.
- Chen, X., Clark, C. J (2009) "Modeling the effects of methanol on iron dechlorination of a complex chlorinated NAPL," *Journal of Hazardous Materials*, 164: 565-570.
- Di Palma, L., Medici, F (2002) "Recovery of copper from contaminated soil by flushing," *Waste Management* 22: 883-886.
- Elgh-Dalgren, K., Arwidsson, Z., Camdzija, A., Sjberg, R., Ribé, V., Waara, S., Allard, B., Kronhelm, T., Van Hees, P. A.W (2009) "Laboratory and pilot scale soil washing of PAH and arsenic from a wood preservation site: Changes in concentration and toxicity," *Journal of Hazardous Materials* 172: 1033-1040.
- Gitipour, S., Ahmadi, S., Madadian, E., Ardestani, M (2011) "Soil washing of chromium- and cadmium contaminated sludge using acids and ethylenediaminetetra acetic acid chelating agent," *Environmental Technology*, DOI:10.1080/09593330.2011.597784.
- Lee, Y. C., Kim, E. J., Ah Ko, D., Yang, J. W (2011) "Water-soluble organo-building blocks of aminoclay as a soil-flushing agent for heavy metal contaminated soil," *Journal of Hazardous Materials* 196: 101- 108.
- Martínez-Sánchez, M.J., Martínez-López, S., García-Lorenzo, M.L., Martínez-Martínez, L.B., Pérez-Sirvent, C., (2011) "Evaluation of arsenic in soils and plant uptake using various chemical extraction methods in soils affected by old mining activities," *Geoderma* 160: 535-541.
- Meunier, L., Koch, I., Reimer, K. J (2011) "Effects of dissolution kinetics on bioaccessible arsenic from tailings and soils," *Chemosphere* 84: 1378-1385.
- Peters, R.W (1999) "Chelant extraction of heavy metals from contaminated soils," *Journal of Hazardous Materials* 66, 151-210.
- Rivero-Huguet, M., Marshall, W.D (2011) "Scaling up a treatment to simultaneously remove persistent organic pollutants and heavy metals from contaminated soils," *Chemosphere* 83: 668-673.
- Schwarzenbach, R.P., Gschwend, P.M., Imboden, D.M (1993) *Environmental Organic Chemistry*, John Wiley & Sons, Inc. New York, 681.
- Sierra, C., Gonzalez-Coto F., Villa R., Menéndez-Aguado J.M., Gallego J.R (2008) *Innovative approaches for the remediation of arsenic and mercury pollution via soil washing*. Proceedings of the 3rd International Meeting in Environmental Biotechnology and Engineering, Palma de Mallorca, Spain, 261-267.
- Sierra, C., Gallego, J.R., Afif, E., Menéndez-Aguado, J.M., Gonzalez-Coto, F (2010) "Analysis of soil washing effectiveness to remediate a brownfield polluted with pyrite ashes," *Journal of Hazardous Materials* 180: 602-608.
- Truex, M.J., Oostrom, M., Zhang, Z.F., Carroll, K.C., Schramke, J.A., Wietsma, T.W., Tartakovsky, G.D., Gordon, K.A., Last, G.V (2010) *Evaluation of Soil Flushing for Application to the Deep Vadose Zone in the Hanford Central Plateau*, U.S. Department of Energy, PNNL-19938.
- USEPA (2007) Chapter 4: Organic Analytes, Sampling Considerations, Test Methods SW-846, Washington DC.
- USEPA (2002) Arsenic Treatment Technologies for Soil, Waste, and Water, Solid Waste and Emergency Response (5102G), EPA-542-R-02-004.
- USEPA (1996) A Citizen's Guide to In Situ Soil Flushing, Solid Waste and Emergency Response (5102G), EPA 542-F-96-006, April 1996
- Wang, S Mulligan, C. N (2009) "Rhamnolipid biosurfactant-enhanced soil flushing for the removal of arsenic and heavy metals from mine tailings," *Process Biochemistry* 44: 296-301.