نشریه علمی پژوهشی امیرکبیر - مهندسی عمران و محیط زیست
AmirKabir Jounrnal of Science & Research
Civil and Enviromental Engineering
(ASJR-CEE)

دانشگاه صنعتی امیرکبیر
(پلی تکنیک تهران)

دوره ۴۷، شماره ۳، زمستان ۱۳۹۴، صفحه ۳۱ تا ۳۶
Vol. 47, No. 3, Winter 2015, pp. 31-36

بازدهی محلول‌های شوینده برای خاکشویی آلاینده آرسنیک تحت تأثیر دما

سعید گیتی پور[۱]، سعید فیروزبخت*[۲]، احسان میرزایی[۲]، ایمان خلیلی[۲]

۱- دانشیار، دانشکده عمران و محیط‌زیست، دانشگاه تهران
۲- کارشناس ارشد مهندسی محیط‌زیست، دانشگاه تهران

(دریافت: ۱۳۹۲/۲/۵ پذیرش: ۱۳۹۳/۹/۱۰)

چکیده

بیشترین آلودگی خاک ناشی از فلزات سنگین مانند آرسنیک، سرب، جیوه، کروم، کادمیوم است. در این میان آرسنیک با توجه به خصوصیات سرطان‌زایی و فراوانی آن در خاک که ناشی از فعالیت‌های کشاورزی، صنعت نفت، پسماند و فاضلاب شهری و صنعتی می‌باشد از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این تحقیق، میزان بازدهی روش خاک‌شویی برای حذف آرسنیک از نمونه‌های خاک توسط آب و شوینده‌های شیمیایی SDS، EDTA و شوینده ترکیبی (شامل EDTA و SDS) موردبررسی قرار گرفت. نتایج آزمایش‌های خاک‌شویی نشان داد محلول‌های شستشوی آب، SDS، EDTA و شوینده ترکیبی در دمای ۲۰C° به ترتیب دارای کارایی حذف ٪۸۲/۲۰، ٪۲۱/۴۵، ٪۹۳/۳۷ و ٪۱۸/۷۴ هستند. همچنین کارایی حذف برای شوینده‌های فوق در دمای ۵۰C° به ترتیب برابر با ٪۷۵/۲۴، ٪۳۴/۵۲، ٪۸۳/۴۰ و ٪۴۸/۷۹ به دست آمد. نتایج فوق نشان از کارایی شستشوی خاک به‌صورت "شوینده ترکیبی> SDS > EDTA > آب" در دو دمای ۲۰°C و ۵۰°C است. همچنین نتایج به‌دست‌آمده افزایش میزان کارایی خاک‌شویی در حذف آرسنیک با افزایش دما را در هر حالت نشان داد.

کلمات‌کلیدی:

آرسنیک، روش خاک‌شویی، شوینده‌های شیمیایی، دما

* نویسنده مسئول و عهده دار مکاتبات: Email: saeidf86@yahoo.com

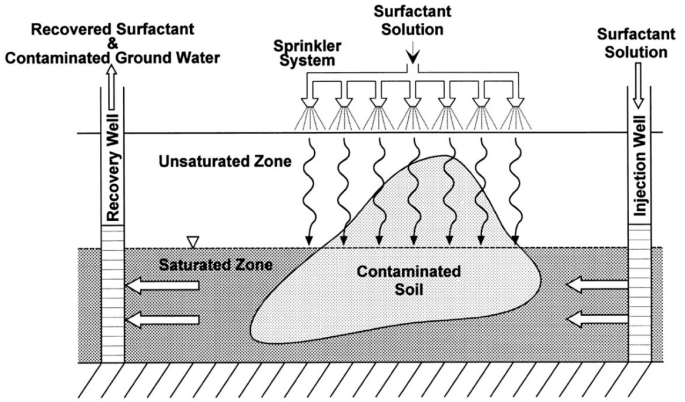
۱- مقدمه

طبق تخمین آژانس حفاظت محیط‌زیست، بالغبر ۲۰,۰۰۰,۰۰۰ یارد مکعب از خاک‌های آلوده ثبت‌شده، آلوده به فلزات سنگین است [۱]. در سال ۲۰۰۷ میلادی آلاینده‌های خطرناک موردتوجه آژانس حفاظت محیط‌زیست ایالات‌متحده آمریکا[1] بر اساس لایحه سِرکلا[2] فهرست گردیدند که در آن آرسنیک در ردیف اول این فهرست قرار گرفت [۲].

آرسنیک ماده‌ای سمی و سرطان‌زاست و بر روی پوست و جگر و شش‌ها (در صورت تنفس) اثرات مخربی برجا می‌گذارد. آرسنیک با اختلال وسیع در سیستم گوارشی و ایجاد شوک، منجر به مرگ می‌گردد. کراتوسیز، سرطان پوست، سرطان بیضه و مثانه، سرطان ریه، قانقاریا، فشارخون و بیماری‌های قلبی برخی از بیماری‌های ناشی از قرارگیری در معرض آرسنیک هستند. قرار گرفتن به مدت کم (بین ۲-۲۴ ساعت) در مکانی که آلودگی آن در حد ppm ۳ باشد، باعث ایجاد مسمومیت با علائم سردرد، سرگیجه، دل‌درد، تهوع، بی‌اشتهایی، یرقان و کم‌خونی می‌گردد. آرسنیک در طبیعت از بین نمی‌رود بلکه از شکلی به شکل دیگر تغییر می‌کند. آرسنیک موجود در هوا روی زمین می‌نشیند و توسط باران شسته و وارد محیط خاک و آب‌های زیرزمینی میشود. زهاب معادن فلزی متروک، زهاب‌های حاصل از فعالیت‌های معدنکاری و فرآوری سنگ‌ها، سوزاندن زغال‌های غنی از آرسنیک ازجمله منابع ایجاد آلودگی توسط آرسنیک هستند [۳].

خاک‌شویی روشی بسیار ساده و مشخص است که با استفاده از روش‌های فیزیکی / شیمیایی آلاینده‌ها از خاک خارج می‌گردند [۱]. در جداسازی فیزیکی[3] فلزات بر اساس خواص فلزی آن‌ها (اندازه، چگالی، خاصیت مغناطیسی و آب‌دوستی سطح آن و غیره) جدا می‌گردند و در روش استخراج شیمیایی[4] تلاش برای حل کردن فلز در حلال‌های مربوطه و جداسازی فلز از محیط خاک است [۴]. خاک‌شویی به دو شکل کلی: در محل (درجا)[5] و خارج از محل[6] قابل‌اجرا است [۵]. در خاک‌شویی درجا پاک‌سازی خاک با استفاده از تزریق یک شوینده آبی به درون خاک توسط گمانه‌های عمودی صورت می‌گیرد. این محلول شوینده می‌تواند به درون محدوده خاک غیراشباع (بالای سطح ایستابی) و یا محدوده خاک اشباع تزریق گردد. محلول شوینده با عبور از محدوده آلوده به همراه آلودگی جداشده از خاک وارد جریان آب زیرزمینی می‌گردد. جریان خروجی در پائین‌دست محل آلوده دوباره استخراج گشته و برای دفع یا تزریق مجدد تصفیه می‌گردد [۶]. محلول تزریقی می‌تواند شامل سورفکتانت‌ها، کمک حلال‌ها و یا آب زیرزمینی تصفیه‌شده باشد [۷]. این فرایند در شکل ۱ قابل‌مشاهده است.

[1] USEPA
[2] CERCLA
[3] Physical Separation
[4] Chemical extraction
[5] Soil Flushing
[6] Soil Washing



شکل ۱: خاک‌شویی در محل [۸]

در خاک‌شویی خارج از محل پس از غربال نمودن ابتدایی خاک و جداسازی دانه‌های بزرگ‌تر و نخاله‌ها، باقیمانده خاک وارد یک درام شوینده می‌شود. درام محتوی آب و مواد شوینده با ایجاد حرکات چرخشی، امکان تماس آب و شوینده‌ها را با خاک فراهم می‌کند. پس از شسته شدن خاک، با ایجاد یک حوضچه ته‌نشینی ساده، محلول شوینده از خاک پاک جداشده و برای استفاده مجدد یا به واحد تصفیه پساب هدایت می‌گردد و خاک پالایش‌شده نیز به محل برگردانده می‌شود [۱]. این فرایند در شکل ۲ قابل‌مشاهده است.

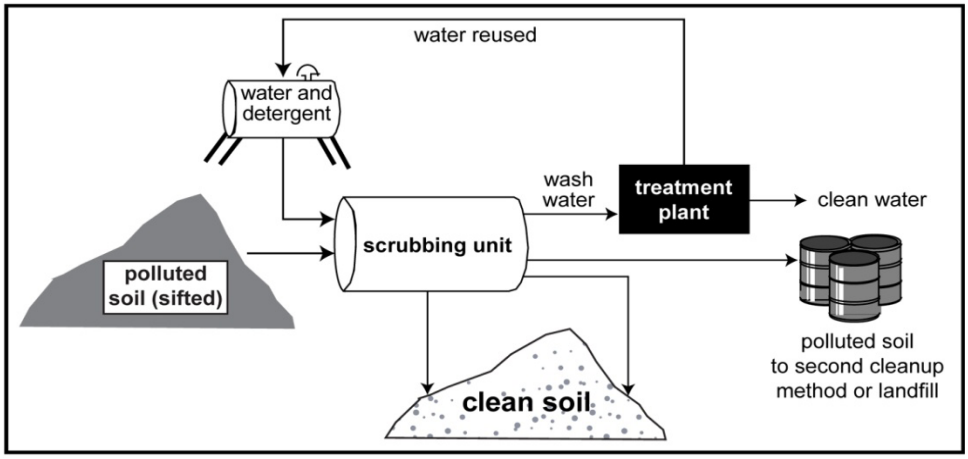
درگذشته خاک‌شویی با استفاده از آب و بدون افزودنی‌های شیمیایی صورت می‌گرفت. امروزه از افزودنی‌های مختلفی مانند سورفکتانت‌ها وکلنت‌ها برای افزایش کارایی شستشوی آلاینده‌ها، کاستن از دفعات شستشو و کاهش زمان موردنیاز برای پالایش خاک استفاده می‌گردد. اهداف این تحقیق حذف آرسنیک موجود در خاک توسط روش خاک‌شویی به روش جداسازی شیمیایی و با استفاده از شوینده‌های آب، EDTA[7]، SDS[8] و شوینده ترکیبی (EDTA+SDS) در غلظت‌های متفاوت است. همچنین با در نظر گرفتن اثر دما در کارایی شستشوی خاک، این پارامتر به‌عنوان یکی از عوامل مؤثر در روش فوق برای بررسی بهبود کیفی پالایش نمونه‌های خاک مطالعه گردید.

۲- مواد و روش‌ها

۲- ۱- خصوصیات نمونه و آماده‌سازی

در این مطالعه نمونه برداری از خاک غیر آلوده در منطقه‌ای از جنوب غربی تهران و در عمق‌های ۳۰ cm تا ۴۵ cm صورت گرفت. همچنین به‌منظور تعیین خصوصیات فیزیکی- شیمیایی خاک، آزمایش‌های دانه‌بندی، حد خمیری، درصد رطوبت و pH بر روی نمونه‌ها انجام شد تا از کارایی خاک‌شویی بر روی نمونه‌ها اطمینان حاصل گردد.

[7] Ethylenediaminetetraacetic Acid
[8] Sodium Dodecyl Sulphate

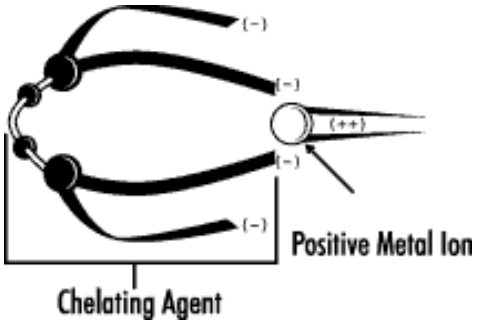


شکل ۲: خاک‌شویی خارج از محل [۹]

برای تهیه خاک‌آلوده به آرسنیک با غلظت ppm ۱۰۰ (۱۰۰ mg آرسنیک در ۱ kg خاک)، نمونه‌ای از خاک غیر آلوده به وزن ۱ Kg با یکی از ترکیبات آرسنیک به نام آرسنات سدیم (NaAsO2) با جرم مولکولی ۱۲۹/۹۱ g/mol و غلظت ppm ۱۷۳/۴ آغشته گردید. همچنین برای سهولت عمل اختلاط آلاینده و خاک به این مخلوط ml ۱۰۰ آب اضافه گردید. سپس مخلوط به مدت ۳۰ دقیقه توسط میله شیشه‌ای هم زده شد تا آلاینده به‌صورت همگن و یکنواخت در تمام قسمت‌های خاک پخش شود. پس از یکنواخت شدن خاک‌آلوده، مخلوط به درون یک ظرف شیشه‌ای درب دار منتقل گردید و داخل یخچال با دمای ۴ °C برای انجام آزمایش‌های موردنظر قرار گرفت.

۲- ۲- انتخاب مواد شوینده و آماده‌سازی محلول

همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، برای شستشوی خاک در محل و یا خارج از محل، می‌توان از مواد گوناگونی مانند اسیدها، کلنت‌ها، سورفکتانت‌های آنیونی، غیر یونی و کاتیونی استفاده نمود. در این مطالعه، از آب به‌عنوان یک ماده خنثی، یک کِلنت[9] به نام EDTA با جرم مولکولی ۳۷۲/۲۴ g/mol و غلظت ۰/۱ mol/lit، یک سورفکتانت[10] به نام SDS با غلظت ۰/۱ Wt % و شوینده ترکیبی حاوی EDTA و SDS با غلظت‌های فوق استفاده گردید.



شکل ۳: نحوه عملکرد عامل کلنت برای حذف فلزات در محلول آبی و محیط خاک

عامل کلنت ازنظر ظاهر شبیه به پنجه یا چنگال است. این عامل در محیط آب با یون‌های مخرب فلزات ترکیب می‌گردد و بار الکترونیکی یون‌های فلزی را از منفی به مثبت تغییر می‌دهد و سبب حذف فلزات محیط خاک می‌گردد (شکل ۳) [۱۰]. یکی از مهم‌ترین کلنت ها، شوینده EDTA است. این شوینده به‌عنوان یکی از مؤثرترین عوامل انتقال و حذف فلزات سنگین شناخته‌شده است. اصلی‌ترین امتیاز استفاده از حلال‌های کلنت (مانند EDTA) در مقایسه با اسیدهای قوی، ایجاد تحریک کمتر در ساختار خاک است. این شوینده دارای خاصیت قوی در تبادل و شستشوی فلزات کاتیونی است. همچنین قابلیت پالایش محدوده وسیعی از انواع خاک را دارد. ترکیبات کلنت قابلیت ایجاد ترکیبات پایدار با فلزات رادارند و استفاده از آن‌ها اجازه استخراج فلزات از خاک‌آلوده را میسر می‌نماید. [۱۱].

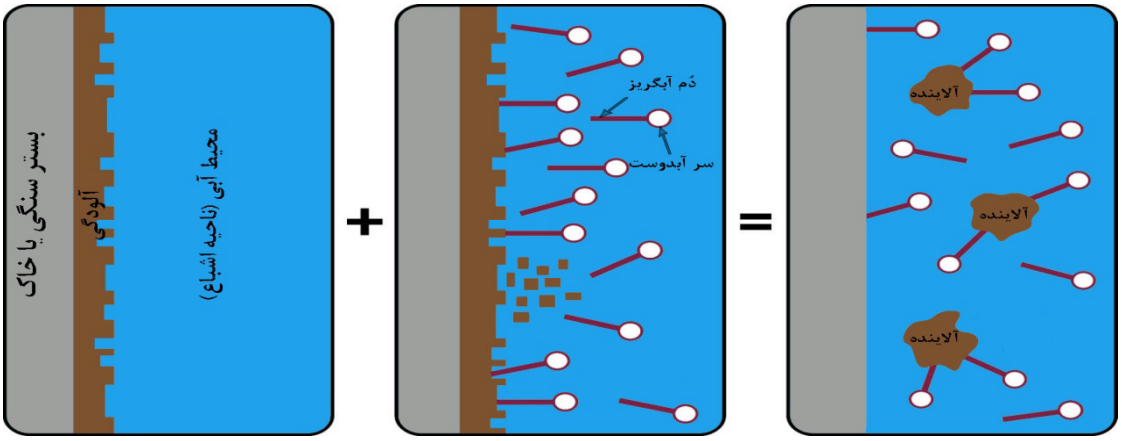
سورفکتانت‌ها نیز، با کاستن از کشش سطحی بین آلاینده و دانه‌های میزبان، آن‌ها را از هم جدا می‌نمایند. این مولکول‌ها به علت خاصیت دوقطبی خود، با جانشین نمودن مولکول‌های بزرگ‌تر و باانرژی بیشتر در فصل مشترک‌ها، انرژی آزاد سیستم را کاهش می‌دهند. با افزودن سورفکتانت به مخلوط خاک-آب، مانند شکل ۴، دم‌های آب‌گریز مولکول‌های سورفکتانت که به‌صورت زنجیره طولانی است، به درون آلاینده نفوذ کرده و سرهای آب‌دوست آن‌ها، با کشیدن آلاینده به سمت آب، سبب جدا شدن آن از دانه‌های خاک می‌گردد [۱۲].

با توجه به جرم مولکولی شوینده EDTA، در این تحقیق برای تهیه این محلول با غلظت ۰/۱ mol.g/lit، مقدار ۳۷/۲۲۴ g پودر EDTA در یک لیتر آب حل شد. همچنین برای تهیه محلول SDS با غلظت ۰/۱ %Wt، مقدار یک گرم از آن در یک لیتر آب حل شد. شوینده ترکیبی نیز از مخلوط دو محلول EDTA و SDS با غلظت‌های ذکرشده در بالا و به نسبت مساوی تهیه شد.

۲- ۳- آزمایش شستشوی خاک

برای بررسی کارایی حذف آرسنیک از محیط خاک توسط چهار شوینده مذکور در ابتدا پنج نمونه ۱۵ g از نمونه خاک‌آلوده شده به

[9] Chelating Agent
[10] Surfactant



شکل ۴: خاک‌شویی خارج از محل [۹]

آرسنیک برداشته شده و بدون آنکه عمل خاک‌شویی بر روی آن‌ها صورت گیرد نمونه‌ها برای تعیین غلظت آرسنیک توسط دستگاه جذب اتمی مورد تحلیل قرار گرفتند. میانگین نتایج حاصل به‌عنوان غلظت متوسط (غلظت اولیه) آرسنیک خاک منظور گردید.

در ادامه برای هر شوینده مورداستفاده در این تحقیق دو نمونه به وزن g ۲۰ تهیه گردید که یکی از آن‌ها تحت دمای °C ۲۰ (دمای طبیعی آزمایشگاه) و دیگری °C ۵۰ قرار گرفتند. هر یک از این نمونه‌ها درون ظرف‌های تمیز درب دار ml ۲۵۰ ریخته شدند و ml ۲۰۰ از محلول شوینده موردنظر با غلظت معین، به این ظرف‌ها اضافه گردید. ظرف‌ها برای اختلاط نمونه و محلول شوینده بر روی لرزاننده قرار گرفتند و عمل شستشو به مدت چهارساعت بر روی آن‌ها انجام گرفت. پس از گذشت این مدت و به اتمام رسیدن فرایند شستشوی خاک، غلظت آلاینده آرسنیک موجود در نمونه‌ها توسط دستگاه جذب اتمی تعیین گردید. برای تحلیل نمونه‌ها توسط دستگاه جذب اتمی، از نمونه مایع استفاده می‌گردد. بنابراین نمونه پس از شستشو از الک شماره ۲۰۰ و کاغذ صافی عبور داده شد و مایع خروجی برای تحلیل به دستگاه سپرده شد. با توجه به زمان‌بر بودن عبور مواد از کاغذ صافی، از پمپ خلأ و ارلن تخلیه برای تسریع در روند جداسازی، استفاده گردید.

۳- نتایج و بحث

۳- ۱- خصوصیات فیزیکی- شیمیایی خاک

خصوصیات فیزیکی- شیمیایی خاک شامل دانه‌بندی خاک، حد خمیری، درصد رطوبت و pH طبق استاندارد ASTM، به ترتیب با روش‌های D422-63، D423-66، D2216–92 و D4972 تعیین گردید [۱۳، ۱۴، ۱۵ و ۱۶]. جدول (۱) مقادیر به‌دست‌آمده برای این خصوصیات را نشان می‌دهد.

درصد ذرات ریز خاک (سیلت و رس کمتر از ۶۳-۷۴ میکرون) بر روی فرایند شستشوی خاک تأثیرگذار هستند. در خاک‌هایی با رطوبت پایین وجود ذرات ریزدانه خاک به مقدار زیاد مانع از پراکندگی و توزیع کامل شوینده در محدوده آلودگی می‌گردد و سبب افزایش میزان مصرف شوینده‌ها در این فرایند می‌گردد. در محیط خاک تجمع آلاینده‌ها بیشتر در قسمت ذرات ریزدانه است. طی فرایند شستشوی خاک ذرات ریزدانه به همراه آلاینده موجود در آن‌ها از ذرات درشت‌دانه خاک جدا می‌گردند و با توجه به خصوصیات این فرایند و اهداف پروژه، ذرات ریزدانه خاک‌آلوده دفع و یا آلودگی از این ذرات با انجام فرایند تصفیه حذف می‌گردد. بنابراین فرایند خاک‌شویی برای خاک‌های حاوی ریزدانه بیش از ۳۰% تا ۵۰% مقرون‌به‌صرفه نیست. این فرایند در خاک‌های ماسه‌ای با حداقل ماسه ۵۰% تا ۷۰% مناسب است [۱۷].

در این مطالعه میزان شن و ماسه موجود در خاک موردبررسی به ترتیب ۳۱/۵۳% و ۵۳/۰۵% و ریزدانه (لای و رس) آن ۱۵/۴۳% تعیین گردید که نشان‌دهنده مقرون‌به‌صرفه بودن فرایند خاک‌شویی برای خاک موردبررسی است. با توجه به مقادیر ۲۱/۱% حد خمیری و ۱۰/۴% میزان رطوبت، این خاک پتانسیل تورم پایینی دارد و برای انجام فرایند خاک‌شویی بر روی نمونه خاک موردمطالعه روش مناسبی برای پالایش خاک است. همچنین نمونه خاک تهیه‌شده pH نزدیک به خنثی (۶/۸) داشت که نشان از عدم وجود اختلال ناشی از محیط اسیدی یا قلیایی در فرایند خاک‌شویی و مناسب بودن خاک موردمطالعه در این تحقیق است.

جدول ۱: خصوصیات فیزیکی- شیمیایی خاک

مشخصه	توضیحات		
طبقه‌بندی خاک	شن: %۳۱/۵۳	ماسه: %۵۳/۰۵	لای و رس: %۱۵/۴۳
	SC		
حد خمیری	%۲۱/۱		
درصد رطوبت	%۱۰/۴		
pH	۶/۸		

۳- ۲- غلظت اولیه آرسنیک موجود در خاک (غلظت مبنا)

در این تحقیق برای بررسی کارایی حذف توسط شوینده‌ها و تحت تأثیر دما، پنج نمونه g ۱۵ به‌صورت تصادفی از خاک‌آلوده جدا و بدون آنکه تحت خاک‌شویی قرار گیرند تحلیل توسط دستگاه جذب اتمی بر روی آن‌ها صورت پذیرفت. با توجه به غلظت‌های تعیین‌شده برای پنج نمونه که در جدول ۲ نشان داده‌شده، در کل مراحل تحقیق میانگین غلظت اولیه آرسنیک در خاک ppm ۹۸/۲ منظور گردید.

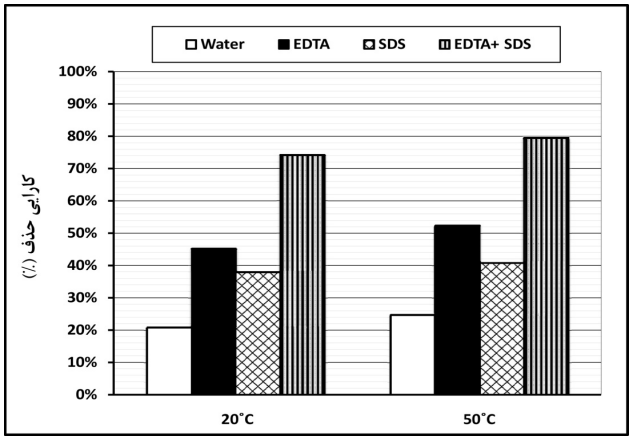
جدول ۲: غلظت آرسنیک اولیه نمونه‌ها و میانگین آن‌ها

نمونه	۱	۲	۳	۴	۵
غلظت آرسنیک اولیه (PPM)	۹۶	۱۱۲	۸۹	۱۰۲	۹۲
میانگین غلظت اولیه آرسنیک (PPM)			۹۸/۲		

۳- ۳- کارایی حذف آرسنیک توسط شوینده‌ها و بررسی عامل دما

برای انجام فرایند خاک‌شویی، محلول‌های شوینده به حجم ml ۲۰۰، به همراه نمونه خاک‌های آلوده به آرسنیک به مدت چهارساعت مورد شستشو قرار گرفتند. اثر دما نیز در این فرایند بررسی گردید و کارایی روش خاک‌شویی توسط هر یک از محلول‌های شوینده در کنار دمای محیط آزمایش ˚C ۲۰ (دمای طبیعی آزمایشگاه) و دمای ˚C ۵۰ موردمطالعه قرار گرفت. نتایج حاصل از این بررسی در جدول ۳ ارائه‌شده است.

نتایج به‌دست‌آمده از فرایند خاک‌شویی نشان داد در دمای طبیعی آزمایشگاه شوینده آب به‌عنوان ساده‌ترین شوینده با ۲۰/۸۲% کمترین و شوینده ترکیبی شامل سورفکتانت و کلنت با ۷۴/۱۸% بیشترین کارایی حذف را در بین چهار شوینده دارا می‌باشند. کارایی حذف توسط این شوینده‌ها به ترتیب "شوینده ترکیبی > EDTA > SDS > آب" به دست آمد (شکل ۵).



شکل ۵: کارایی حذف آرسنیک در نمونه‌ها توسط چهار شوینده و تحت تأثیر دما

همچنین با افزایش دمای محیط آزمایش به ˚C ۵۰ کارایی حذف شوینده‌های آب، SDS، EDTA و شوینده ترکیبی به ترتیب ۲۴/۷۵%، ۵۲/۳۴%، ۴۰/۸۳% و ۷۹/۴۸% به دست آمد. این نتایج افزایش میزان کارایی حذف آرسنیک در خاک‌شویی با افزایش دما را نشان داد (شکل ۵)

٤- نتیجه‌گیری

طبق مطالب گفته‌شده در قسمت نتایج و بحث، برای فرایند خاک‌شویی، خاک‌های ماسه‌ای با حداقل ماسه ۵۰ تا ۷۰% مناسب و مقرون‌به‌صرفه می‌باشند. با توجه به مقادیر دانه‌بندی خاک موردمطالعه (جدول ۱) مشخص گردید خاک حاوی ۵۳% ذرات ماسه و نوع آن ماسه‌ای (SC) است. بنابراین خاک برای انجام فرایند خاک‌شویی مقرون‌به‌صرفه است.

با توجه به مقادیر حد خمیری، میزان رطوبت و خنثی بودن pH خاک نیز (جدول ۱)، این خاک پتانسیل تورم پایینی داشته و شرایط اسیدی و قلیایی برای ایجاد اختلال در فرایند خاک‌شویی حاکم نیست و خاک موردمطالعه برای انجام فرایند مذکور مناسب است.

جدول ۳: نتایج حاصل از حذف آرسنیک در نمونه‌ها توسط شوینده‌ها و عامل دما

شوینده	نمونه	دما (˚C)	مقدار آرسنیک باقیمانده در خاک (ppm)	مقدار آرسنیک حذف‌شده از خاک (ppm)	درصد حذف (%)
آب	۱	۲۰	۷۷/۷۵	۲۰/۴۵	۲۰/۸۲
	۲	۵۰	۷۳/۹	۲۴/۳	۲۴/۷۵
EDTA	۳	۲۰	۵۳/۸	۴۴/۴	۴۵/۲۱
	۴	۵۰	۴۶/۸	۵۱/۴	۵۲/۳۴
SDS	۵	۲۰	۶۰/۹۵	۳۷/۲۵	۳۷/۹۳
	۶	۵۰	۵۸/۱	۴۰/۱	۴۰/۸۳
شوینده ترکیبی (EDTA + SDS)	۷	۲۰	۲۵/۳۵	۷۲/۸۵	۷۴/۱۸
	۸	۵۰	۲۰/۱۵	۷۸/۰۵	۷۹/۴۸

در این تحقیق از شوینده آب به‌عنوان ساده‌ترین شوینده، EDTA با غلظت ۰/۱ mol/lit، SDS با غلظت ۰/۱ %Wt و شوینده ترکیبی (مخلوطی از EDTA و SDS با غلظت مشابه در حالت مجزا) استفاده شد. خاک‌شویی توسط شوینده‌های فوق بر روی نمونه خاک‌آلوده شده به آرسنیک (میانگین غلظت آلاینده ۹۸/۲ ppm) به مدت چهارساعت در دمای طبیعی آزمایشگاه (۲۰°C) صورت پذیرفت. همچنین برای بررسی اثر عامل دما بر کارایی شوینده‌ها در فرایند خاک‌شویی، آزمایش توسط شوینده‌های مذکور در دمای ۵۰ °C نیز موردبررسی قرار گرفت.

نتایج نشان داد شوینده‌های آب، SDS، EDTA و شوینده ترکیبی (EDTA + SDS) در دمای طبیعی آزمایشگاه (۲۰°C) نسبت به غلظت مبنا (۹۸/۲ ppm) به ترتیب داری بازدهی حذف آرسنیک ۲۰/۸۲%، ۴۵/۲۱%، ۳۷/۹۳% و ۷۴/۱۸% می‌باشند. بنابراین در دمای طبیعی آزمایشگاه کارایی حذف توسط این شوینده‌ها به ترتیب " شوینده ترکیبی > EDTA > SDS > آب" است. با توجه به مطالب فوق شوینده ترکیبی شامل سورفکتانت و عامل کلنت به نسبت مساوی، بیشترین کارایی حذف را نسبت به سه شوینده دیگر دارد و می‌تواند بهترین گزینه انتخابی در روش خاک‌شویی برای حذف آرسنیک تلقی گردد.

با افزایش دمای محیط آزمایش به ۵۰ °C کارایی حذف شوینده‌های آب، SDS، EDTA و شوینده ترکیبی به ترتیب ۲۴/۷۵%، ۵۲/۳۴%، ۴۰/۸۳% و ۷۹/۴۸% به دست آمد. نتایج فوق حاکی از افزایش کارایی روش خاک‌شویی با افزایش دما است.

۵- مراجع

[1] Griffiths, R.A., "Soil-washing technology and practice", J. Hazard. Mater, vol. 40, pp 175–189, 1995.

[2] Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ASTDR), "Detailed Data Table for the 2011 Priority List of Hazardous Substances", 2011.

[3] National Geosciences Database of Iran (NGDIR), "Arsenic", Available at: http://www.ngdir.ir/minemineral/PMineMineralChapterDetail.asp?PID=7532

[4] Dermont, G. Bergeron, M. Mercier, G. Richer-Lafl`eche, M., "Soil washing for metal removal: A review of physical/chemical technologies and field applications", Journal of Hazardous Materials, vol. 152, pp 1–31, 2008.

[5] United States Environmental Protection Agency (USEPA), "Treatment Technologies for Site Cleanup: Annual Status Report", 12th edn, US Government Printing Office, Washington DC, 2007.

[6] Strbak. L, July., "In-Situ flushing with surfactants and cosolvents", US EPA, office of soild waste and emergency response, 2000.

[7] United States Environmental Protection Agency (USEPA), "In situ remediation technology status report: Surfactant enhancements", 1995.

[8] Allred, B. J., & Brown, G. O., "Anionic Surfactant Mobility in Unsaturated Soil: The Impact of Molecular Structure", Environmental Geosciences, vol. 8, no. 2, pp. 95 -109, 2001.

[9] United States Environmental Protection Agency (USEPA), "A Citizen's Guide to Soil Washing", US Environmental Protection Agency, Washington, DC, 2001.

[10] Essential Industries, Inc., "The Chemistry of Cleaning, Soil Removal, General Cleaners". Available at: http://www.essind.com/cleaners/gc-chemistry.htm#

[11] Lim, T.T. Tay, J.H. Wang, J.Y., "Chelating-agent-enhanced heavy metal extraction from a contaminated acidic soil", J. Environ. Eng., vol. 130, pp 59 –66, 2004.

[12] Mulligan, C.N. & Yong, R.N. & Gibbs, B.F., "Surfactant-enhanced remediation of contaminated soil: a review", Engineering geology, vol. 60, pp 371 -380, 2001.

[13] ASTM, Method D422, "Standard test method for particle-size analysis of soils", D422 -63 (emproved 1990), Philadelphia, Pa, 1963.

[14] ASTM D, "Standard test method for Liquid Limit of Soils", D423 -66, Philadelphia, 1982.

[15] ASTM, "Standard test method for laboratory determination of water (moisture) content of soil and rock", D2216 – 92, Philadelphia, 1992.

[16] ASTM, "Standard Test Method for pH of Soils", Designation No. D4972, West Conshohocken, PA, ASTM, 2007.

[17] Interstate Technology Regulatory Council (ITRC), "Metals in Soils Team, Technical and Regulatory Guidelines for Soil Washing", 1997.