

بهینه‌سازی روش استفاده از EDTA در رفع آلودگی فلز سنگین سرب از بنتونیت

وحید رضا اوحیدی^۱، امیر هوشنگ امیدی^۲

۱- استاد دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

چکیده

فرایند پاکسازی خاک‌های آلوده به آلاینده‌های فلز سنگین، از چالش‌های متداول مراکز تحقیقاتی و اجرایی در بسیاری از کشورهای صنعتی است. یکی از روش‌های متداول رفع آلودگی از خاک‌ها، شستشوی خاک با استفاده از معرف‌های کیلیت‌کننده از جمله EDTA بوده است. علیرغم تحقیقات وسیعی که در خصوص فرایند اندرکنش EDTA و خاک‌های رسی آلوده انجام شده است، بهینه‌سازی فرایند رفع آلودگی از خاک‌های با سطح مخصوص زیاد، کمتر مورد توجه قرار گرفته است. هدف این تحقیق، مطالعه امکان بهینه‌سازی روش استفاده از EDTA در رفع آلودگی سرب از بنتونیت با تاکید بر متغیرهای تعداد دفعات شستشو با محلول کیلیت‌کننده، pH سیستم و میزان استخراج فلز سنگین سرب از بنتونیت بوده است. جهت دستیابی به هدف فوق، نموداری ^{EDTA}_{pb} بنتونیت به طور مصنوعی با محلول نیترات سرب در غلظت‌های مختلف آلوده شده و پس از خشک شدن در معرض غلظت‌های متفاوت EDTA قرار گرفته و میزان رفع آلودگی از بنتونیت اندازه‌گیری شد. نتایج نشان می‌دهد که میزان استخراج سرب توسط EDTA تقریباً در تمامی حالات، برابر با غلظت محلول کیلیت‌کننده می‌باشد. همچنین، بر اساس نتایج بدست آمده، میزان استخراج سرب توسط EDTA، تنها وابسته به نسبت بین غلظت‌های محلول شستشو و آلاینده موجود در خاک () بوده و به تغییرات pH سوسپانسیون، ناشی از تغییر غلظت آلاینده یا محلول EDTA، وابسته نمی‌باشد. این مسئله بیان می‌کند که بافرینگ قابل توجه بنتونیت در مقایسه با دیگر متغیرهای ذکر شده، تاثیر کمتری در فرایند اندرکنش EDTA و بنتونیت آلوده داشته است.

واژه‌های کلیدی: بنتونیت، EDTA، سرب، رفع آلودگی از خاک

مقدمه

رسداز (GCL) و لایه رسی محافظ در دفن زباله رادیواکتیو کاربرد فراوانی دارد [13]. با توجه به قلیایی بودن اکثر خاک‌های رسی و میزان حلالیت کم سرب در شرایط قلیایی، جهت شستشو خاک‌های آلوده با سرب از محلول‌های کیلیت‌کننده از جمله EDTA به جای آب خالص استفاده می‌شود [5]. در تحقیقات انجام شده توسط دیگر محققین، مطالعات زیادی در مورد رفع آلودگی فلزات سنگین با استفاده از EDTA انجام شده و تاثیر عوامل مختلفی از جمله غلظت EDTA، pH محلول و غلظت آلاینده، بر بازدهی رفع آلودگی مطالعه شده است [3-1-14]. معذالک در مطالعات گذشته، در مورد میزان وابستگی بازده رفع آلودگی به عوامل مختلف از جمله pH، اتفاق نظر و سازگاری مناسبی دیده نمی‌شود. در برخی موارد [10] بیان شده است که میزان رفع آلودگی فلز سنگین از خاک با استفاده از EDTA، به pH سیستم وابسته است. در حالی که نتایج برخی دیگر از تحقیقات نشان می‌دهد که خروج سرب از خاک با استفاده از EDTA، حساسیت کمی به تغییر pH دارد [9]. در نتایج دیگر تحقیقات انجام شده در مورد تاثیر نسبت غلظت EDTA به سرب، بر میزان بازده رفع آلاینده‌های فلزی نیز سازگاری مناسبی دیده نمی‌شود [5]. همچنین، با وجود تحقیقات وسیعی که در خصوص فرایند اندرکنش EDTA و خاک‌های رسی آلوده انجام شده است، بهینه سازی فرایند رفع آلودگی از خاک‌های با سطح

فلزات سنگین از جمله سرب که در گروه آلاینده‌های غیرآلی قرار می‌گیرند از متداول‌ترین مواد موجود در شیرابه زباله‌های صنعتی، شهری و معدنی هستند [15]. تاکنون روش‌های زیادی جهت رفع آلودگی از خاک‌ها و سایت‌های آلوده با فلزات سنگین ارائه شده است، که بخشی از این روش‌ها با هدف امکان‌پذیری مجدد از خاک ارائه شده است [11]. یکی از این روش‌ها، شستشوی خاک آلوده با معرف‌های کیلیت‌کننده مانند اتیلن‌دی‌آمین-تترااستیک‌اسید یا (EDTA) می‌باشد. EDTA از جمله مواد آلی است که می‌تواند از طریق تشکیل کمپلکس با یون‌های فلزی، آنها را از فاز جامد خاک به فاز مایع منتقل کند. این ماده از بهترین معرف‌های کیلیت‌کننده در رفع فلزات سنگین خصوصاً سرب می‌باشد و در اصلاح سایت‌های آلوده به سرب کاربرد بسیاری دارد [1]. کانی‌های رسی موجود در خاک‌ها به واسطه سطح ویژه و ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC)، قادرند در سطوح مختلف خود با آلاینده‌های فلز سنگین موجود در آب اندرکنش داشته و آنها را با مکانیزم‌های مختلف جذب کنند [8]. ظرفیت تبدیلی (CEC)، معیاری جهت تعیین توانایی خاک برای تبادل کاتیونی و نگهداری آب است. بنتونیت به علت دارا بودن مقدار زیادی کانی مونت-موریلونیت با CEC و بار منفی زیاد در پروژه‌های ژئوتکنیک-زیست محیطی، مانند لایه‌های محافظ (Soil barrier) در مراکز دفن زباله، سیستم‌های پوشاننده (Liner)، لایه‌های ژئوسینتتیک

مخصوص زیاد، کمتر مورد توجه قرار گرفته است. هدف این تحقیق، مطالعه امکان بهینه‌سازی روش استفاده از EDTA در رفع آلودگی سرب از بنتونیت با تاکید بر متغیرهای تعداد دفعات شستشو با محلول کیلیت-کننده، pH سیستم و میزان استخراج فلز سنگین سرب از بنتونیت بوده است. در این راستا در این تحقیق سعی شده تا اثر غلظت آلاینده سرب، غلظت محلول کیلیت کننده EDTA، pH سیستم و نسبت $\left(\frac{EDTA}{Pb}\right)$ بر بازده رفع فلز سنگین سرب از خاک بنتونیت مورد مطالعه و تجزیه و تحلیل آزمایشگاهی قرار گیرد.

سرب ($Pb(NO_3)_2$) در غلظت‌های ۰/۰۰۱، ۰/۰۰۵، ۰/۰۱، ۰/۰۵ و-
۰/۷ mol/l (۱، ۵، ۱۰، ۵۰ و-
cmol/kg-soil ۷۰) استفاده شد.
همچنین به منظور استخراج فلز
سرب از خاک آلوده، از معرف
کلیت‌کننده دی‌سدیم اتیلن‌دی‌آمین-
تترااستیک‌اسید ($Na_2EDTA.2H_2O$)
با غلظت‌های ۰/۰۰۱، ۰/۰۰۵،
۰/۰۱، ۰/۰۵ و ۰/۱ mol/l (۱، ۵،
۱۰، ۵۰ و cmol/kg-soil ۱۰۰) به
ازای هر غلظت از آلودگی و در
نسبت ۱:۱۰ (محلول EDTA : خاک
آلوده) استفاده شده است.

روش تحقیق خصوصیات فیزیکی و رفتاری نمونه بنتونیت

خاک مورد استفاده در این
تحقیق، بنتونیت تجاری با نام
"بنتونیت فلات ایران" می‌باشد
که از شرکت ایران باریت تهیه
شده است. این خاک به صورت
پودری سفید رنگ، مایل به شیری
است. مشخصات فیزیکی و
ژئوتکنیک زیست محیطی نمونه
بنتونیت مورد مطالعه در این
تحقیق در جدول‌های (۱) و (۲)
ارائه شده است. به منظور
آلوده کردن مصنوعی خاک توسط
فلز سنگین سرب، از محلول نیترات

جدول ۱- مشخصات فیزیکی بنتونیت [12]

<i>Physical properties of Bentonite</i>	<i>Quantity measured</i>
Clay %	76
Silt %	23
Sand %	1
Liquid limit %	314.5
Plastic limit %	31.2
Plasticity index %	283.3
Activity	3.73
Gs	2.79
Classification	CH
w% Air-dried	5.9
Oven-dried	7.1

جدول ۲- مشخصات ژئوتکنیک زیست محیطی بنتونیت [12]

<i>Chemical properties of Bentonite</i>	<i>Quantity measured</i>
<i>pH (1:10; soil:water)</i>	9.5
<i>EC (dS/m) (1:10; soil:water)</i>	0.64
<i>Carbonate content %</i>	8
<i>Organic content %</i>	1.4
<i>Surface area (m²/kg . 10⁻³)</i>	413.2
<i>CEC (cmol/kg soil)</i>	
<i>Na⁺</i>	48.5
<i>Ca²⁺</i>	14.2
<i>Mg²⁺</i>	3.4
<i>K⁺</i>	2.1
<i>Total:</i>	68.2
<i>Mineral composition</i>	<i>Montmorillonite, Calcite, Quartz</i>

آماده‌سازی نمونه‌های بنتونیت آلوده

به منظور بررسی اندرکنش سرب با بنتونیت و میزان جذب و نگهداری سرب توسط خاک مورد مطالعه و متعاقب آن با هدف تعیین قابلیت EDTA در رفع آلودگی سرب از بنتونیت در آزمایشگاه یک سری نمونه بنتونیت در غلظت‌های مختلف نیترات سرب به طور مصنوعی آلوده شدند [7]. به این منظور، محلول‌های نیترات سرب در غلظت‌های ۰/۰۰۱ تا ۰/۲۵ مولار (تا ۲۵۰ cmol/kg - soil) آماده شد. سپس ۲ گرم خاک خشک با دقت ۰/۰۰۰۱ گرم وزن شده و داخل تیوب‌های سانتریفیوژ ۵۰ میلی لیتری ریخته شد. جهت آلوده نمودن مصنوعی نمونه‌ها، ۲۰ میلی لیتر از محلول نیترات سرب در غلظت‌های ذکر شده به خاک اضافه شده است. سوسپانسیون حاصله مدت دو

ساعت توسط لرزاننده افقی کاملاً هم زده شد. با هدف حصول تعادل، نمونه‌های فوق به مدت ۹۶ ساعت نگهداری شده و در هر ۲۴ ساعت، به مدت ۲ ساعت توسط لرزاننده افقی هم زده شده تا نمونه به صورت همگن درآمده و تبادل کاتیونی به طور کامل انجام گیرد. در انتها، با استفاده از دستگاه سانتریفیوژ و با سرعت ۴۰۰۰ دور بر دقیقه (rpm)، فاز مایع از فاز جامد جدا شده و فاز مایع با استفاده از دستگاه جذب اتمی (AAS) مدل (GBC 932 AB) آنالیز شده است. مقادیر سرب موجود در فاز مایع و محلول اولیه، اندازه‌گیری شده و مقدار نگهداری شده فلز سنگین سرب در بنتونیت از تفاضل مقادیر موجود در محلول اصلی و فاز مایع استخراج شده، حاصل شده

مدت تیوب حاوی نمونه‌ها در هر ۲۴ ساعت نیز به مدت ۲ ساعت بر دستگاه لرزاننده قرار داده شده‌اند. همچنین در این مرحله، pH سوسپانسیون‌های همگن‌شده اندازه‌گیری شده است. در ادامه نمونه‌ها با دور ۴۰۰۰ دور بر دقیقه (rpm) سانتریفیوژ شده و فاز مایع از فاز جامد جدا شده است. برای جلوگیری از رسوب سرب در محلول جدا شده، از اسید نیتریک استفاده شده و pH محلول به کمتر از ۲ رسانده شده است. این کار مانع از رسوب سرب در محلول شده و باعث اندازه‌گیری میزان واقعی سرب خارج شده از خاک خواهد شد [4]. در ادامه محلول استخراج شده توسط دستگاه جذب اتمی به منظور تعیین میزان سرب خارج شده از خاک مورد آنالیز قرار گرفته است.

فرآیند شستشوی چند مرحله‌ای با غلظت‌های کمتر EDTA

$$\left(\frac{EDTA}{Pb} < 1\right)$$

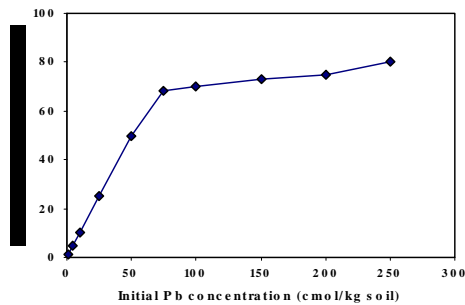
یکی از روش‌های بهینه‌سازی استفاده از EDTA در رفع آلودگی از خاک، استفاده از غلظت‌های کمتر EDTA در شستشوی چند مرحله‌ای به جای شستشوی یک مرحله‌ای با غلظت زیاد است. به منظور بررسی اثر تکرار فرآیند شستشو، دو نمونه از خاک‌های آلوده شده با غلظت‌های زیاد سرب (۰/۰۳ و ۰/۰۵ مولار یا ۳۰ و ۵۰ $cmol/kg - soil$) انتخاب شده و توسط محلول EDTA با غلظت ۰/۰۱ مولار ($10\text{ }cmol/kg - soil$) در نسبت ۱:۱۰ (محلول EDTA: خاک آلوده)، در سه مرحله شسته شده‌اند. هر بار پس از شستشو، فاز مایع از

است. همچنین، مقادیر pH سوسپانسیون‌های محلول سرب- خاک در نسبت ۱:۱۰ و به ازای غلظت‌های مختلف سرب اندازه‌گیری و گزارش شده است.

رفع آلاینده سرب از بنتونیت با استفاده از EDTA

پس از ساخت نمونه‌های بنتونیت آلوده شده با سرب، نمونه‌های آلوده با غلظت‌های مورد نظر (۰/۰۱ تا ۰/۰۷ مولار) انتخاب شده و به منظور رفع آلودگی در معرض غلظت‌های مختلف EDTA قرار گرفتند. به این ترتیب که پس از سانتریفیوژ نمودن نمونه‌های آلوده و جدا کردن فاز مایع، خاک آلوده ته‌نشین شده در تیوب، در دمای ۳۵ درجه سانتیگراد در آون خشک شده و سپس در غلظت و نسبت مشخص در معرض EDTA قرار گرفت. به این منظور برای رفع آلاینده سرب از بنتونیت آلوده دارای غلظت‌های مختلف سرب، از محلول EDTA با غلظت‌های ۰/۰۰۱ تا ۰/۱ مولار (۱، ۵، ۱۰، ۵۰، ۷۰، $100\text{ }cmol/kg - soil$) با نسبت ۱:۱۰ (محلول EDTA: خاک آلوده خشک) استفاده شده است. این آزمایشات بر اساس روش سوسپانسیون تعادل یافته آب- خاک-آلودگی (EPA, 1987) انجام شده است. به منظور آماده سازی نمونه‌ها، ۲۰ میلی لیتر آب مقطر یا محلول EDTA با غلظت مورد نظر، به ۲ گرم بنتونیت آلوده خشک شده اضافه شده است. نمونه‌ها به مدت ۲ ساعت توسط لرزاننده افقی کاملاً هم زده شده و سپس جهت اطمینان از حصول شرایط تعادل، به مدت ۹۶ ساعت نگهداری شده‌اند. در این

ارائه شده است. بر اساس نتایج فوق با افزایش غلظت سرب تا میزان $0/07$ مولار ($70 \text{ cmol/kg} - \text{soil}$)، مقدار pH محیط کاهش چشمگیری داشته و از آن به بعد با افزایش غلظت سرب، مقدار pH تقریباً ثابت مانده است. با توجه به ثابت ماندن مقدار pH سوسپانسیون در این غلظت، و همچنین ثابت ماندن میزان جذب سرب در خاک در غلظت‌های بیشتر از $0/07$ مولار ($70 \text{ cmol/kg} - \text{soil}$)، محدوده غلظت-های $0/001$ تا $0/07$ مولار (۱ تا $70 \text{ cmol/kg} - \text{soil}$) سرب جهت آلوده کردن نمونه بنتونیت، جهت انجام آزمایش‌های رفع آلودگی مجدد با EDTA استفاده شده است.



شکل ۱- نمودار جذب فلز سنگین سرب توسط بنتونیت در غلظت‌های مختلف

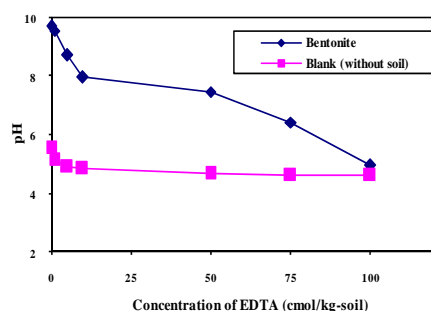
علت انتخاب این محدوده تغییرات آلودگی به واسطه آن بوده است که با اضافه شدن مقدار آلاینده بیش از مقدار فوق، در پارامترهای مورد نظر در این تحقیق یعنی میزان pH سیستم و میزان آلاینده جذب شده توسط خاک، تغییرات قابل توجهی مشاهده نشده است.

فاز جامد جدا شده و فاز جامد مجدداً در دمای 35 درجه سانتیگراد خشک شده است. سپس محلول EDTA در نسبت $1:10$ مجدداً به خاک خشک اضافه شده و پس از تعادل، فاز مایع از فاز جامد جدا شده است. به همین ترتیب، تا آخرین مرحله این روند تکرار شده است. مقدار سرب موجود در فاز مایع با استفاده از دستگاه جذب اتمی در نمونه‌های استخراج شده در هر مرحله شستشو، اندازه‌گیری شده است. همچنین pH سوسپانسیون محلول EDTA-خاک آلوده نیز در هر مرحله اندازه‌گیری و گزارش شده است.

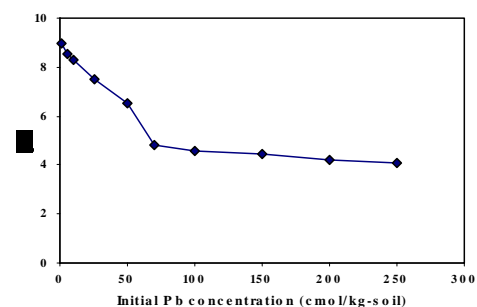
بحث و بررسی

در شکل (۱)، تغییرات مقدار کاتیون‌های سرب نگهداری شده توسط خاک در مقابل افزایش غلظت آلاینده سرب، نشان داده شده است. نتایج ارائه شده در این شکل نشان می‌دهد که تا غلظت $0/07$ مولار ($70 \text{ cmol/kg} - \text{soil}$) یعنی غلظتی معادل میزان CEC خاک، تقریباً تمام یون فلز سنگین موجود در الکترولیت، توسط خاک نگهداری شده است. به طوری که تا این غلظت، نمودار حالت خطی با شیب حدود 45 درجه داشته و بیانگر تساوی میزان سرب موجود در محلول اولیه و سرب جذب شده در خاک می‌باشد. با افزایش غلظت آلودگی به مقادیری بیشتر از ظرفیت تبادل خاک (CEC)، نمونه بنتونیت قادر به نگهداری همه یون فلز سنگین نبوده و روند جذب (شیب نمودار) نیز کاهش چشمگیری داشته است.

تغییرات pH سوسپانسیون الکترولیت-خاک، با افزایش غلظت فلز سنگین سرب در شکل (۲)

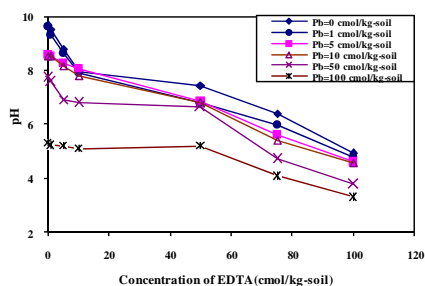


شکل ۳- مقایسه pH سوسپانسیون بنتونیت- محلول EDTA با محلول EDTA با افزایش غلظت EDTA



شکل ۲- مقادیر pH سوسپانسیون خاک- آلاینده سرب با افزایش غلظت فلز سنگین سرب

در شکل (۴) تغییرات سوسپانسیون محلول EDTA و خاک آلوده با غلظت‌های مختلف سرب، در اثر افزایش غلظت EDTA نشان داده شده است. شکل (۴) نشان می‌دهد که تقریباً در تمامی غلظت‌های آلاینده، با افزایش غلظت EDTA، میزان pH سیستم کاهش قابل ملاحظه‌ای می‌یابد. چنین به نظر می‌رسد که علاوه بر اقتصادی نبودن و کاهش نفوذپذیری در بکارگیری غلظت‌های زیاد EDTA، کاهش pH سیستم که موجب انحلال کربنات و کاهش ظرفیت نگهداری خاک می‌شود نیز دلیل دیگری بر نامناسب بودن کاربرد غلظت‌های زیاد EDTA می‌باشد.



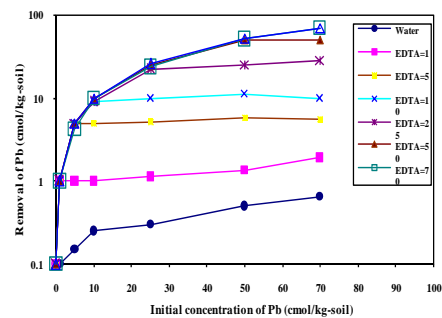
شکل ۴- مقادیر pH سوسپانسیون‌های بنتونیت آلوده- محلول EDTA در غلظت‌های مختلف

در شکل (۳) میزان تغییرات pH در محلول خالص EDTA و همچنین سوسپانسیون بنتونیت- EDTA بدون حضور آلاینده سرب در مقابل افزایش غلظت EDTA نشان داده شده است. از این شکل چنین دریافت می‌شود که محلول EDTA خاصیت اسیدی داشته ($pH \approx 5$) و با افزایش غلظت EDTA تغییر چندانی در pH محلول دیده نمی‌شود. اما همانطور که ملاحظه می‌شود در مورد سیستم آب-خاک، افزایش غلظت EDTA، موجب افت چشمگیر در pH سیستم و اسیدی شدن تدریجی آن می‌شود. به طوری که افزایش غلظت EDTA از ۰/۰۰۱ تا ۰/۱ مولار (از ۱ تا 100 cmol/kg-soil) موجب کاهش pH سیستم آب- خاک از مقدار ۹/۶ به ۵/۱ شده است (اسیدی شدن محیط).

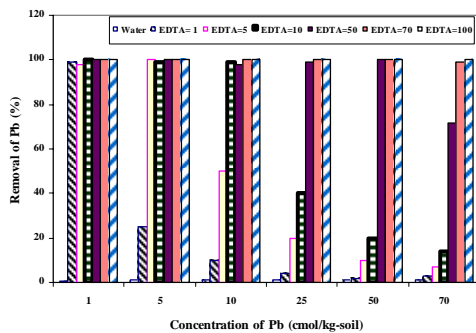
بهینه‌سازی روش استفاده از EDTA در رفع آلودگی فلز سنگین سرب از بنتونیت

تمام سرب موجود در خاک کمپلکس تشکیل داده و آن را از فاز جامد به فاز مایع منتقل کند. در این شرایط مقداری از EDTA نیز به صورت اضافی در فاز مایع باقی خواهد ماند. حالت $\frac{EDTA}{Pb} = 1$ (غلظت برابر EDTA و Pb)

مرز مشترک میان دو حالت فوق است یعنی ضمن آنکه تمام سرب از خاک خارج می‌شود، EDTA نیز قادر است به اندازه غلظت خود سرب از خاک خارج نماید.



شکل ۵- میزان سرب استخراج شده از بنتونیت آلوده، توسط آب مقطر و محلول‌های EDTA در غلظت‌های مختلف



شکل ۶ - بازده استخراج سرب از بنتونیت آلوده با غلظت‌های مختلف آلاینده سرب و غلظت‌های مختلف EDTA

در شکل (۶) میزان بازده استخراج فلز سنگین سرب از خاک آلوده دارای غلظت‌های مختلف آلاینده با افزایش میزان غلظت محلول EDTA ترسیم شده است. بر اساس نتایج این شکل ملاحظه می‌شود که در هیچ غلظتی از آلاینده سرب آب مقطر قادر به استخراج فلز سرب از خاک نبوده است. ضمن آنکه در حالتی که رابطه

$$\frac{EDTA}{Pb} \geq 1$$

EDTA برقرار باشد، تمامی سرب از خاک خارج شده و بازده تقریباً ۱۰۰ درصد حاصل می‌شود.

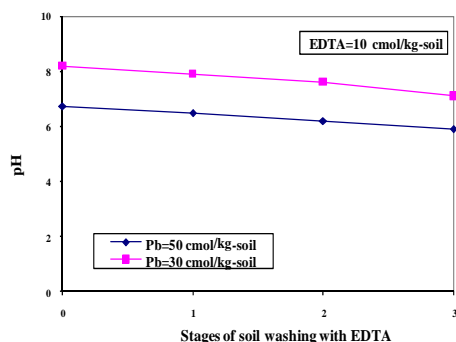
در صورتی که $\frac{EDTA}{Pb} \leq 1$ باشد،

در شکل (۵) میزان سرب استخراج شده حاصل از شستشوی خاک آلوده با آب مقطر و غلظت‌های مختلف معرف کیت‌کننده EDTA ارائه شده است. در کلیه این آزمایش‌ها از نسبت ۱:۱۰ (محلول:خاک) استفاده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود میزان استخراج سرب توسط آب مقطر بسیار ناچیز بوده، که در واقع بیان کننده میزان بسیار کم حلالیت سرب در شرایط طبیعی و پیوند قوی سرب با ذرات خاک می‌باشد [2]. همچنین بر اساس نتایج ارائه شده در شکل (۵)، با افزایش غلظت محلول EDTA، میزان سرب استخراج شده نیز افزایش می‌یابد. ضمن آنکه میزان سرب استخراج یافته از خاک، به غلظت اولیه آلودگی خاک وابسته نمی‌باشد. به عبارت دیگر در صورتی که بین غلظت

$$EDTA \leq \frac{EDTA}{Pb}$$

و سرب رابطه $\frac{EDTA}{Pb} \leq 1$ برقرار باشد، EDTA در هر غلظت قادر است درست به همان میزان، سرب از خاک آلوده خارج کند و این مقدار بستگی به میزان آلودگی خاک نخواهد داشت. در صورتی که رابطه $\frac{EDTA}{Pb} \geq 1$ برقرار باشد، EDTA قادر است که با

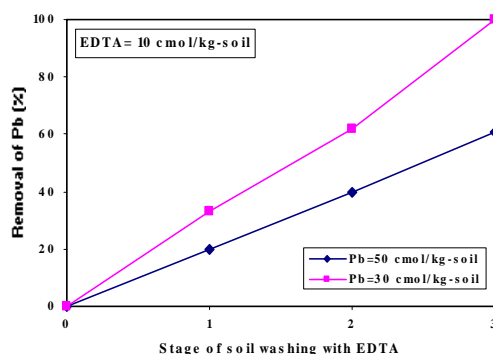
برابر با $\frac{10}{50}$ یا ۲۰ درصد بوده است که در پایان مرحله سوم به صورت جمعی به حدود ۶۰ درصد رسیده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که با دو مرحله شستشوی دیگر (در مجموع ۵ مرحله شستشو) می‌توان کل سرب را از خاک خارج نمود. در مورد خاک آلوده با غلظت 30 cmol/kg-soil میزان بازده در هر مرحله حدود ۳۳ درصد بوده که در پایان مرحله سوم به صورت جمعی تقریباً ۱۰۰ درصد شده است. یعنی در انتهای مرحله سوم کل سرب از خاک خارج شده است.



شکل ۸- تغییرات pH سیستم محلول خاک آلوده در طی سه مرحله شستشو با غلظت ۰/۰۱ مولار (10 cmol/kg-soil EDTA)

نمودار شکل (۸) نشان می‌دهد که در طی مراحل شستشو، pH سیستم تغییر چندانی نکرده و تقریباً در همان حدود pH اولیه سیستم باقی می‌ماند. این در حالی است که شستشوی خاک در یک مرحله و با غلظتی برابر با غلظت آلاینده (یا بیشتر از آن)، باعث کاهش قابل توجه pH سیستم، اسیدی‌تر شدن محیط و در نتیجه انحلال فاز کربنات خاک می‌شود. به بیان دیگر با شستشوی مرحله‌ای نه

EDTA قادر است فقط به اندازه غلظت خود، سرب را از فاز جامد خارج کند و میزان بازده در این حالت نسبت مستقیم با مقدار $\frac{EDTA}{Pb}$ خواهد داشت. در واقع در حضور EDTA، میزان سرب خارج شده از خاک تنها وابسته به نسبت $\frac{EDTA}{Pb}$ می‌باشد و به غلظت آلاینده موجود در خاک و pH سیستم بستگی بسیار کمی دارد.



شکل ۷- بازده جمعی استخراج سرب از بنتونیت در سه مرحله با غلظت ۰/۰۱ مولار (10 cmol/kg-soil EDTA)

در شکل (۷) میزان بازده جمعی استخراج سرب از دو نمونه خاک آلوده با غلظت‌های 50 cmol/kg-soil و 30 cmol/kg-soil در طی سه مرحله شستشو با محلول کی‌لیت-کننده با غلظت ثابت 10 cmol/kg-soil نشان داده شده است. با توجه به نتایج ارائه شده در شکل (۵) ملاحظه می‌شود که در هر مرحله، EDTA توانسته است تقریباً به اندازه غلظت خود (10 cmol/kg-soil) سرب را از خاک خارج کند. در واقع در مورد خاک آلوده با غلظت 50 cmol/kg-soil سرب، میزان بازده در هر مرحله تقریباً

بهینه‌سازی روش استفاده از EDTA در رفع آلودگی فلز سنگین سرب از بنتونیت

تنها راندمان رفع آلودگی از خاک افزایش می‌یابد بلکه در خصوصیات بافرینگ خاک نیز حداقل تغییرات صورت خواهد گرفت.

۳- میزان سرب خارج شده از خاک آلوده (بازده رفع آلودگی)

تنها وابسته به نسبت $\frac{EDTA}{Pb}$

بوده و به غلظت آلاینده موجود در خاک و pH سیستم بستگی ندارد.

۴- علاوه بر اقتصادی نبودن بکارگیری غلظت‌های زیاد EDTA، کاهش pH سیستم که موجب انحلال کربنات و کاهش ظرفیت نگهداری خاک می‌شود نیز دلیل دیگری بر نامناسب بودن بکارگیری EDTA در غلظت‌های زیاد است.

نتیجه‌گیری

نتایج زیر از تحقیق حاضر قابل حصول است:

۱- افزایش غلظت محلول EDTA باعث افزایش میزان سرب خارج شده از خاک و کاهش pH سیستم می‌گردد.

۲- میزان سرب خارج شده از خاک آلوده در حالتی که بین غلظت‌های

EDTA و سرب رابطه $\frac{EDTA}{Pb} \leq 1$

برقرار باشد، تقریباً برابر با میزان غلظت EDTA می‌باشد و این مقدار به غلظت سرب موجود در خاک آلوده و همچنین تعداد مراحل شستشو، وابسته نیست.

Reference

- 1- Allen, H.E., Chen, P., (1993); Remediation of metal contaminated soil by EDTA. Environ. Prog. 12, 4, 284-293.
- 2- Abumaizar, R.J., Smith, E.H., (1999); Heavy metal contaminants removal by soil washing. J. Hazardous Materials, 71-86.
- 3- Amrate, S., Akretche, D.E., Innocent, C., Seta, P., (2005); Removal of Pb from a calcareous soil during EDTA-enhanced electrokinetic extraction. Science of the Total Environment, 349, 56-66.
- 4- Darban, A.K., Foriero, A., Yong, R.N., (2000); Concentration effects of EDTA and Chloride on the retention of trace metals in clays. J. Engng. Geology, 57, 81-94.
- 5- Elliott, H.A., Brown, G.A., (1989); Comparative evaluation of NTA and EDTA for extractive decontamination of Pb-polluted soils. Pennsylvania: Water, Air and Soil Pollution, Agricultural Engineering Department, 361-364.
- 6- Elliott, H.A., Peters, R.W., (1990); Decontamination of metal-polluted soils using chelating agents. In Removal of Heavy Metals from Groundwaters; CRC PRESS, Inc., Boca Raton, FL.
- 7- EPS, Environmental Protection Service, (1979); "Laboratory Manual", Government of Canada, Dep. of Environment.

8- Harter, R.D., (1983); Effect of soil pH on adsorption of lead, copper, zinc and nickel. J. Soil Science Society of American, 47, 47-51.

9- Heil, D.M., Samani, A., Hanson, T., Rudd, B., (1998); Remediation of lead contaminated soil by EDTA. I. Batch and column studies. Water Air Soil Pollut, 113, 77-95.

10- Mohamed, A.M.O., Trasente. D., (1996); Evaluation of EDTA use for metal removal from naturally contaminated geomaterial. 49th Canadian Geotechnical Conference, Frontier in Geotechninology. St. John's Newfoundland. September, 23-25.

11- Majone, M., Papini, M.P., Rolle, E., (1998); Influence of metal speciation in landfill leachates on bentonite sorption. Wat. Res, 32, 882-890.

12- Ouhadi, V.R., Yong, R. N., and Sedighi, M., (2006). Influence of Heavy Metal Contaminants at Variable pH Regimes on Rheological Behaviour of Bentonite, Applied Clay Science Journal, 32, 217-231.

- 13- Pusch, R., (1995); Waste disposal in rock. Div. In Geotechnical Engineering, 76, Elsevier.
- 14- Wong, J.S., Hicks, R.E., Probst, R.E., (1997): EDTA-enhanced electromediation of metal contaminated soils. J. Hazard Mater, 55, 61-80.
- 15- Yong, R.N., Mohamed, A.M.O., Warkentin, B.P., (1992); Principles of contaminant transport in soils. Elsevier, Holland.