

بررسی تاثیر فرآیند الکتروکینتیک همراه با شوینده بر روی ترکیبات هیدروکربن کلردار در خاک

مریم تقی‌زاده^۱، داریوش یوسفی کبریا^{۱*} و ولی تقی‌پور^۲

۱- دانشکده مهندسی عمران-محیط زیست، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، مازندران، ایران

۲- دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه مازندران، ایران

تاریخ دریافت: ۹۲/۱۰/۲۸ تاریخ پذیرش: ۹۳/۷/۱۳

چکیده

فناوری الکتروکینتیک یکی از روش‌های پیشرفته برای تجزیه و استخراج فلزات سنگین و آلاینده‌های آلی از خاک‌های اشباع، غیر اشباع و آب‌های زیرزمینی به شمار می‌آید. در این روش با اعمال میدان الکتریکی ضعیف، آلاینده‌ها با مکانیزم‌های مختلف الکترولیز، الکترواسمز، مهاجرت الکتریکی و الکتروفورز به حرکت در می‌آیند. در این تحقیق، روش الکتروکینتیک به کمک شوینده غیر یونی برای حذف پرکلرواتیلن از خاک‌های رسی در مقیاس آزمایشگاهی به مدت ۱۰ روز بررسی گردید. میزان تغییرات جریان الکتریکی، جریان الکترواسمز و همچنین pH در مخازن آند و کاتد به صورت روزانه و مقدار پرکلرواتیلن در انتهای دوره آزمایش مورد سنجش قرار گرفت. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد در فرآیند الکتروکینتیک، پرکلرواتیلن به دلیل حلالیت کم، غیر قطبی بودن و جذب بالا در خاک، تحت تاثیر جریان الکترواسمز و مهاجرت یونی قرار نمی‌گیرد. ولی با استفاده از شوینده غیر یونی، بازده حذف آلاینده به میزان قابل توجهی افزایش یافته و سبب حذف ۵۱٪ پرکلرواتیلن از خاک شده است.

کلمات کلیدی: میدان الکتریکی، شوینده غیر یونی، پرکلرواتیلن، خاک، الکترواسمز

مقدمه

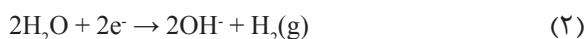
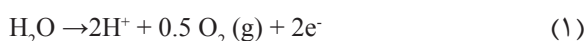
خاک از دو بخش زنده و مرده تشکیل شده است. بخش مرده خاک شامل سنگ‌های هوازده و مواد معدنی حاصل از پوسیدگی گیاهان و جانوران می‌باشد (مواد آلی یا هوموس) که هوا و آب نیز در این بخش قرار می‌گیرند. خاک زنده، خاکی است که در آن جانوران کوچک، حشرات، کرم‌ها، گیاهان، قارچ‌ها، باکتری‌ها و سایر میکروب‌ها قرار دارند. حدود ۵۰٪ فضای خاک را مواد معدنی و آلی و ۵۰٪ باقی‌مانده را هوا و آب تشکیل می‌دهد که فضاهای خالی خاک را پر می‌کند و ارگانسیم‌های زنده را در خاک نگه می‌دارد [۱].

خاک یکی از منابع مهم و ارزشمند طبیعت است که حدود ۹۵٪ غذای انسان از آن حاصل می‌شود. بنابراین، برنامه‌ریزی برای داشتن خاک سالم و تولیدکننده، لازمه بقای انسان است و بدون داشتن خاک سالم، حیات و زندگی روی زمین امکان پذیر نخواهد بود. ورود مواد، ارگانسیم‌های زیستی یا انرژی به درون خاک سبب تغییر کیفیت خاک می‌شود و همین مسأله باعث می‌گردد خاک از حالت طبیعی خود

و مقرون به صرفه در تصفیه آلاینده‌های آلی [۵-۸] و غیر آلی [۹-۱۱] از خاک‌های با نفوذپذیری کم شناخته می‌شود [۱۲].

هدف اصلی از پاک‌سازی در روش الکتروکینیتیک، توزیع آلاینده‌ها در خاک در اثر برقراری میدان الکتریکی ضعیف می‌باشد. سازوکارهای غالب حذف آلاینده در این فرآیند بر پایه مهاجرت آلاینده‌ها در میدان الکتریکی است که به وسیله فرآیند الکترواسمز یا حرکت رطوبت بین حفره‌های خاک یا آب‌های زیرزمینی از آند به سمت کاتد [۱۳ و ۱۴]، مهاجرت الکتریکی با انتقال یون‌ها و ترکیب یون‌ها به سمت الکتروود با بار مخالف [۱۵-۱۷] و همچنین فرآیند الکتروفورز یا انتقال ذرات باردار یا کلوییدها انجام می‌گیرد [۱۴ و ۱۸]. مهاجرت الکتریکی زمانی اتفاق می‌افتد که گونه‌های غیرآلی یونیزه شده شامل کاتیون‌های فلزی، کلریدها، نیترات‌ها و فسفات‌ها در خاک مرطوب موجود باشند [۱۶].

انتقال مواد شیمیایی^۱ ناشی از جریان الکترواسمز در اثر انتشار آب میان حفره‌های به سمت کاتد اتفاق می‌افتد [۱۹ و ۲۰]. ابتدا آب بر اساس معادلات زیر در محل الکتروودها یونیزه شده و پدیده الکتروود روی می‌دهد:



در اثر الکترولیز آب، یون هیدرونیوم (H^+) تولیدی در آند و یون هیدروکسید (OH^-) در کاتد به ترتیب باعث کاهش و افزایش pH در مخازن آند و کاتد می‌شود، به طوری که pH در آند ممکن است به کمتر از ۲ و در کاتد به بیش از ۱۲ برسد. در اثر مهاجرت یون‌ها به سمت قطب‌های مخالف، جبهه اسیدی و بازی نیز در خاک به وجود می‌آید. جبهه اسیدی تولید شده در محل آند در زمان فرآیند به سمت قطب کاتد مهاجرت می‌کند. با توجه به اینکه سرعت حرکت یون هیدرونیوم تقریباً دو برابر یون هیدروکسید می‌باشد، چنانچه ظرفیت بافری خاک باعث تاخیر در جبهه اسیدی نشود، انتقال یون هیدروژن در طول نمونه، حالت اسیدی ایجاد می‌کند.

در حال حاضر مواد و سموم شیمیایی به عنوان یکی از مشکلات عمده زیست محیطی، آلودگی خاک‌ها، آب‌های جاری و زیرزمینی، گیاهان و محصولات کشاورزی به شمار می‌آید. استفاده بی‌رویه و بدون کنترل این مواد، باعث خسارت جبران ناپذیر و مسمومیت‌های حاد، کشنده یا مزمن خواهد شد [۲].

از دیدگاه جهانی پس از آب و هوا، خاک، سومین جزء عمده محیط زیست تلقی می‌شود. هرگونه تغییر در ویژگی‌های اجزای متشکله خاک به طوری که استفاده از آن ناممکن گردد، آلودگی خاک نامیده می‌شود. امروزه بشر با افراط در آنچه تمدن نامیده می‌شود، علاوه بر آب و هوا، موجب آلودگی خاک نیز شده است [۲].

تاکنون روش‌های مختلف فیزیکی، شیمیایی و زیستی مانند استخراج، پمپاژ و تصفیه، خاکشویی، پالایش زیستی و استفاده از دیواره واکنش‌زای نفوذپذیر در زمینه پاک‌سازی سموم کلردار از خاک مورد استفاده قرار گرفته است. کلیه این روش‌ها به دو صورت در محل^۱ و خارج از محل^۲ انجام می‌گیرد. در بین روش‌های متداول، روش پاک‌سازی حرارتی، فیزیکی و شیمیایی به دلیل خواصی مانند پایین بودن حلالیت، غیر قطبی بودن و آب‌گریز بودن آلاینده‌های کلردار همواره با مشکلاتی مواجه بوده است [۲ و ۳].

در روش زیستی، میکروارگانیسم‌های مختلفی مانند باسیلوس سرئوس و ... در محیط‌های آلوده به ترکیبات نفتی وجود دارند که به تنهایی قادر به تجزیه این گونه آلاینده‌ها هستند ولی به دلیل فراهم نبودن شرایط مناسب و محدودیت حرکت آن‌ها در داخل خاک، احیای خاک نیاز به زمان طولانی دارد [۴].

از روش‌های موثر فیزیکی و شیمیایی برای کاهش آلاینده نفتی پرکلرواتیلن از خاک، استفاده همزمان از روش الکتروکینیتیک با شوینده‌ها می‌باشد. فرآیند الکتروکینیتیک روش موثر در تصفیه خاک‌های آلوده با نفوذپذیری کم به شمار می‌آید. این فناوری بر پایه برقراری جریان الکتریکی مستقیم (DC) در دو طرف خاک اشباع و نیمه اشباع عمل می‌کند. بر اساس مطالعات انجام شده، روش الکتروکینیتیک به عنوان یکی از فناوری‌های موفق

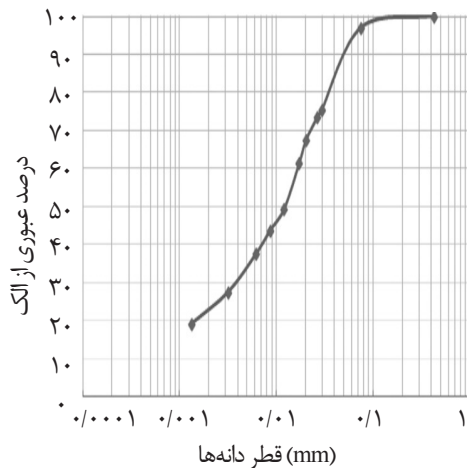
1. In situ

2. Ex situ

3. Direct Current

4. Advection

در شکل ۱ نتایج حاصل از توزیع و منحنی دانه بندی نشان می دهد که نوع خاک مصرفی بر اساس سیستم طبقه بندی متحد، CL (رس با خاصیت خمیری کم و دارای حد روانی پایین) می باشد.



شکل ۱- منحنی دانه بندی خاک مورد استفاده

ویژگی های مختلف فیزیکی خاک شامل، رطوبت، تخلخل، وزن مخصوص و ... برای اهداف خاص اندازه گیری شد [۲۴] که مقادیر آن در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- مشخصات فیزیکی خاک مصرفی

مقدار	واحد	مشخصات خاک
۳۸	%	حد روانی
۲۳	%	حد خمیری
۷/۷	%	مواد آلی
۷/۶	-	pH
۱/۵۷۶	(gr/cm ³)	حداکثر چگالی خشک
۲/۷۱	-	چگالی نسبی دانه ها
۲۵	%	رطوبت بهینه
۴۰/۳	%	تخلخل نمونه
۴/۴	میلی ژیمنس بر سانتی متر	هدایت الکتریکی
۶×۱۰ ^{-۳}	cm/S	ضریب نفوذپذیری (تراوایی)

معمولاً به دلیل بالا بودن سطح ویژه خاک های رسی، آلاینده های نفتی با برقراری پیوند با ذرات ریز خاک، جذب آنها می شوند و به راحتی قابلیت وا جذبی ندارند. همچنین

به منظور انحلال هیدروکسیل فلزات، کربنات ها و گونه های مختلف جذب شده بر روی ذرات خاک، لازم است اسید خاک افزایش یابد. هرچند افزایش اسید معایبی دارد و بر کارایی فرایند تصفیه تاثیر می گذارد [۱۹].

استفاده از شوینده های مصنوعی نیز یکی از روش های افزایش راندمان حذف آلاینده های کلردار می باشد. شوینده ها می توانند حلالیت پذیری ترکیبات آلی آب گریز (HOCs) را با جداسازی آنها در هسته های آب گریز میسل ها، در غلظت های بالاتر از غلظت بحرانی میسل افزایش دهند. در نتیجه انتقال جرم ترکیبات HOC از فاز جامد به داخل فاز مایع تقویت شده و وا جذبی HOCs از خاک های آلوده افزایش می یابد [۱]. همچنین شوینده ها می توانند با تقویت دسترسی زیستی آلاینده ها، گیاه پالایی و پاک سازی میکروبی را بهبود بخشند [۲۱]. تعدادی از محققان، مطالعات فراوانی بر روی شوینده های غیر یونی و توزیع آلاینده های آلی در سیستم های آب-خاک انجام داده اند و یافته ها نشان می دهد که شوینده های غیر یونی توانایی ویژه ای در حذف آلاینده های آلی از خاک دارند [۲۲ و ۲۳].

در این تحقیق تاثیر میدان الکتریکی ضعیف بر روی حرکت آلاینده کلردار در خاک های رسی و همچنین نقش شوینده های مصنوعی در بالابردن بازدهی رفع این گونه آلودگی ها در مقیاس آزمایشگاهی مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت.

مواد و روش ها

مواد مصرفی

در این پژوهش، خاک مورد نظر از نقاط مختلف زمین های کشاورزی اطراف شهرستان بابل جمع آوری و به آزمایشگاه منتقل گردید. کلیه اندازه گیری ها بر اساس روش استاندارد انجام شد. دانه بندی خاک به دو روش هیدرومتری برای خاک های ریزدانه رد شده از الک ۲۰۰ و روش توزیع بر حسب الک های مختلف برای خاک های درشت دانه انجام گرفت [۲۴]. میزان مواد آلی خاک نیز بر اساس درصد کاهش وزن نمونه پس از سوزاندن در کوره در دمای ۵۵۰ °C اندازه گیری شد.

آلمان) به عنوان شوینده غیر یونی استفاده شد. این شوینده غیر یونی یک زنجیره اکسید پلی اتیلن آب دوست و یک گروه هیدروکربن آب گریز دارد. نام شیمیایی Octyphenol Ethoxylate، Triton X-100 است که در دمای اتاق ویسکوز و دارای چگالی 1.07 mg/lit می باشد. از مزایای این شوینده قابلیت تجزیه پذیری زیستی در دامنه وسیعی از دما می باشد [۲۸].

آماده سازی نمونه های خاک

برای آلوده سازی نمونه ها ابتدا خاک سالم و فاقد آلودگی به مدت یک تا دو روز در جریان ملایم هوا خشک و از الک شماره ۲۰ عبور داده شد. سپس 600 mg پرکلرواتیلن در 100 ml استون حل شد و با 1 kg خاک در بشر شیشه ای مخلوط گردید تا غلظت پرکلرواتیلن در خاک برابر 600 mg به ازای هر کیلوگرم خاک خشک به دست آید. سپس خاک آلوده به مدت سه روز در هوای آزاد قرار داده شد تا استون موجود در نمونه خاک خارج شود. خاک آلوده قبل از شروع آزمایش به مدت یک ماه در ظروف در بسته و در جای تاریک قرار داده شد تا تاثیر سن آلودگی نیز در فرآیند لحاظ گردد.

راکتورهای مورد استفاده

به منظور بررسی رفتار خاک در حالت اشباع کامل همراه با حرکت آب میان حفره ای و الکترولیت در سر تا سر خاک و همچنین میزان حرکت آلاینده نفتی در خاک مطابق شکل های ۲ و ۳ از راکتور الکتروکینیتیک از جنس پلکسی گلاس^۲ به ضخامت 5 mm به شکل مکعب مستطیل با ابعاد خارجی $6/5 \times 6 \times 22 \text{ cm}$ (به ترتیب طول، عرض و ارتفاع) استفاده گردید. سامانه مزبور از سه قسمت میانی به طول 10 cm حاوی نمونه خاک متراکم آلوده و دو قسمت انتهایی (در دو طرف نمونه خاک) به ابعاد $4/5 \times 5 \text{ cm}$ (به ترتیب طول و عرض) و به ارتفاع 6 cm به عنوان محل نصب الکترو و نگهداری الکترولیت ها (مخزن آند و کاتد) طراحی و ساخته شد. جداسازی قسمت های مختلف از طریق نصب دیواره های مشبک سوراخ دار از جنس پلکسی گلاس انجام شد.

شستشو با آب معمولی تاثیری روی آن نمی گذارد. پایین بودن ضریب نفوذ پذیری خاک رس عامل دیگری است که روش های احیای خاک های آلوده رسی را با محدودیت هایی مواجه می کند [۲۵]. کاتیون ها نقش مهمی در فرآیند الکتروکینیتیک دارند (مکانیزم مهاجرت یونی). لذا مقادیر آن ها در خاک، در جدول ۲ ارائه شده است [۲۶].

جدول ۲- مقادیر کاتیون های موجود در خاک

نوع کاتیون	K	Na	Mg	Ca	Fe
مقدار در هر کیلوگرم خاک خشک، mg/kg	۳/۵۳	۲/۲۷	۴/۴۷	۵/۲۱	۰/۱۲

خصوصیات پرکلرواتیلن^۱

پرکلرواتیلن، کلروکربنی با فرمول $\text{Cl}_2\text{C}=\text{CCl}_2$ و مایعی بی رنگ است که از کلردار کردن هیدروکربن ها تهیه می شود و به طور وسیع به عنوان حلال و پاک کننده در صنایع فلزی و در خشک شویی ها کاربرد دارد. این ترکیب فرار، بسیار پایدار و غیر مشتعل است. پرکلرواتیلن مورد نیاز برای این تحقیق از شرکت DJ (DAE JUNG) کره خریداری گردید و ویژگی های آن در جدول ۳ آمده است [۲۷].

بر اساس تحقیق آژانس بین المللی بر روی سرطان، پرکلرواتیلن در گروه 2A مواد سرطان زا قرار دارد و مشابه بسیاری از هیدروکربن های کلرینه، موجب اختلال در سیستم عصبی شده و می تواند از طریق تماس پوستی وارد بدن شود [۲۷].

جدول ۳- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی پرکلرواتیلن

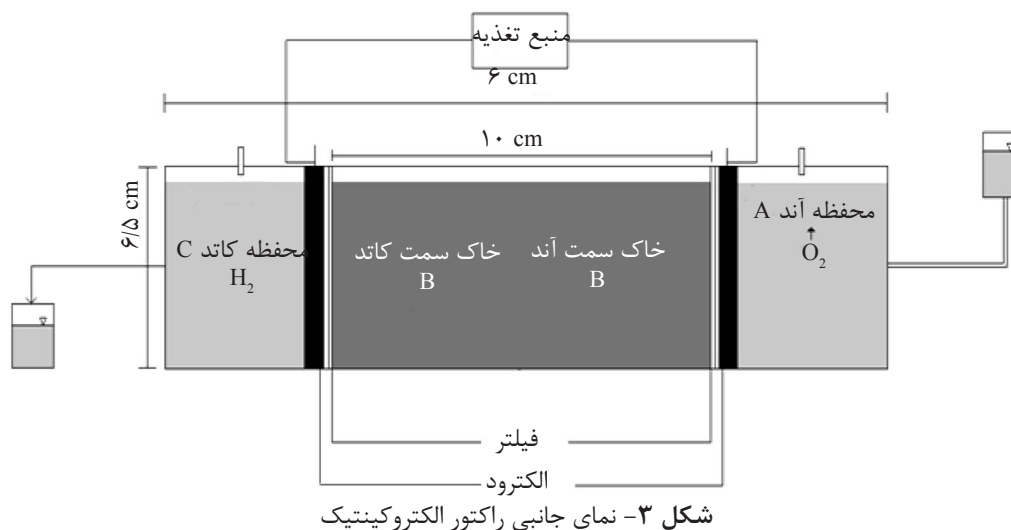
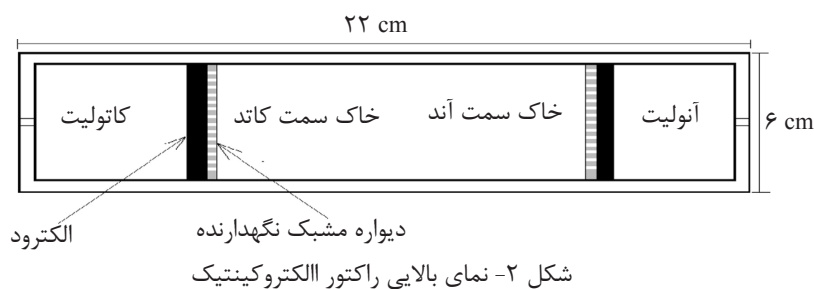
مشخصات	واحد	مقدار
فرمول مولکولی	-	C_2Cl_4
جرم مولی	gr/mol	۱۶۵/۸۳
چگالی	gr/cm^3	۱/۶۲۲
نقطه ذوب	$^{\circ}\text{C}$	-۱۹
نقطه جوش	$^{\circ}\text{C}$	۱۲۱
انحلال پذیری در آب در 20°C	گرم در هر ۱۰۰ میلی لیتر	۰/۰۱۵
ویسکوزیته در 25°C	cP	۰/۸۹

شوینده غیر یونی Triton X-100

در این تحقیق از Triton X-100 (محصول شرکت مرک

1. Perchloroethylene (PCE)

2. Plexiglass



برنامه آزمایش‌ها

در این پژوهش، سه آزمایش مختلف شامل حذف آلاینده از خاک به تنهایی، حذف آلاینده از خاک آلوده با استفاده از الکتروکینتیک (EK)^۱ و حذف آلاینده از خاک با استفاده از الکتروکینتیک همراه با شوینده غیر یونی (EK+S)^۲ انجام گرفت. در هر آزمایش ۴۰۰ gr خاک داخل راکتورها متراکم گردید و برای جلوگیری از پراکندگی ذرات خاک، فیلتر واتمن شماره ۴۲ بین محفظه آند و کاتد و سلول خاک قرار داده شد. در دو محفظه آند و کاتد الکترودهای گرافیتی قرار داده شد و با آب مقطر پر گردید. میزان جریان الکتریکی و دما در هر ساعت پس از شروع تا پایان آزمایش‌ها اندازه‌گیری شد. میزان pH در خاک، محلول آند و کاتد و همچنین حجم جریان الکترواسمز به صورت روزانه ثبت گردید. در آزمایش سوم مقدار ۱۰ mmol/lit شوینده غیر یونی به محفظه آند اضافه شد. سپس با استفاده از یک منبع تغذیه مدل DAZHENGps 3050 با جریان مستقیم، میدان الکتریکی یکنواخت به شدت ۱۰ V (۱ V در هر cm

۱ طول نمونه خاک) در دو سر نمونه خاک برقرار گردید. با توجه به اینکه در روش‌های الکتریکی، مدت زمان آزمایش تاثیر مستقیم بر روی میزان هزینه پاک‌سازی دارد، در این تحقیق مدت زمان ۱۰ روز برای آزمایش‌ها انتخاب شد و در پایان روز دهم از خاک نمونه برداری لازم انجام شد.

تحلیل شیمیایی

برای تعیین میزان pH و پرکلرواتیلن در پایان روز دهم، از هر پایلوت ۳ نمونه از آند، وسط و کاتد برداشته شد. نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در هوا خشک و سپس از الک نم‌ه ۲۰ عبور داده شد. به منظور استخراج پرکلرواتیلن از نمونه‌های خاک، ابتدا ۱۰ gr از نمونه مورد نظر (توزین شده با ترازوی ۰/۱ gr خطا) در داخل لوله شیشه‌ای به حجم ۴۰ ml قرار داده شد و بلافاصله ۲۰ ml حلال مورد نظر (n-هگزان) به نمونه اضافه گردید. نمونه روی تکان دهنده لوله‌ای به مدت ۲ دقیقه تکان داده شد تا عمل استخراج پرکلرواتیلن از خاک انجام گیرد. در پایان نمونه‌ها به وسیله دستگاه FTIR تحلیل شد.

نتایج و بحث

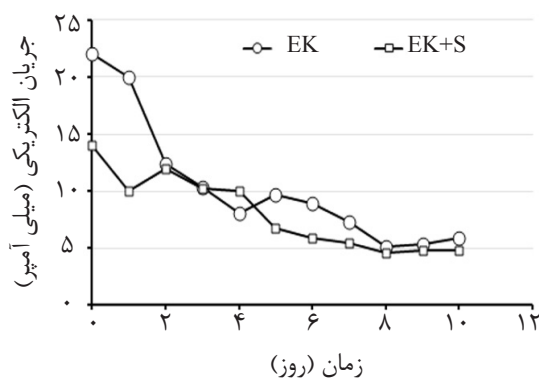
در این بخش نتایج مربوط به تغییرات pH، جریان الکتریکی، جریان الکترواسمز و میزان جابه‌جایی آلاینده پرکلرواتیلن تحت تاثیر برقراری میدان الکتریکی یکنواخت و ضعیف یک ولت در هر cm خاک ارائه شده است. در شکل ۴ تغییرات جریان الکتریکی بر حسب زمان در دو آزمایش الکتروکینتیک به تنهایی (EK) و الکتروکینتیک همراه با شوینده (EK+S)^۲ رسم شده است.

جریان الکتریکی تحت تاثیر هدایت الکتریکی محلول منفذی خاک، ترکیب محلول موجود در محفظه آند و کاتد و رطوبت خاک قرار دارد. به همین دلیل در دو آزمایش EK و EK+S، جریان الکتریکی در مدت ده روز کاهش می‌یابد. جریان در ابتدای هر دو آزمایش بیش‌ترین مقدار را داراست که علت آن را می‌توان ناشی از میزان زیاد یون‌ها در محلول منفذی در شروع آزمایش دانست. هنگام مهاجرت یون‌ها به سمت الکترودها با رسوب یون‌ها، جریان به طور ناگهانی

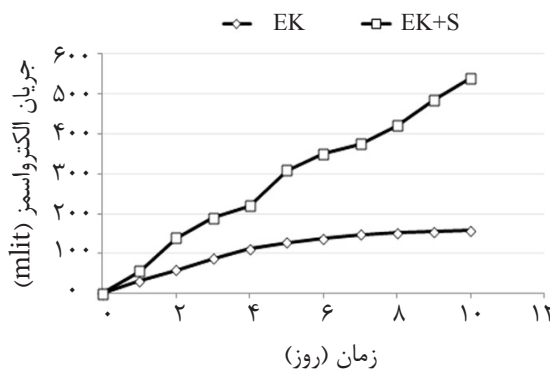
کاهش می‌یابد. در آزمایش EK+S به دلیل اینکه شوینده جذب ذرات خاک می‌شود، جذب یون‌های متحرک توسط ذرات خاک کاهش می‌یابد. لذا یون‌ها به صورت آزاد قرار داشته و رسوب کمتری تشکیل می‌شود در نتیجه جریان با سرعت کمتری کاهش می‌یابد بنابراین شیب نمودار در این آزمایش کمتر از شیب نمودار در آزمایش EK است [۲۹].

در اثر اعمال گرادیان الکتریکی در طول خاک، مولکول‌های آب به سمت قطب منفی (کاتد) به صورت جریان حاکم الکترواسمز حرکت می‌کنند. اندازه‌گیری جریان الکترواسمز هر ۲۴ ساعت با استفاده از استوانه مدرج انجام شد. در شکل ۵ تغییرات جریان الکترواسمز با زمان در دو آزمایش EK و EK+S رسم شده است.

نتایج نشان می‌دهد که جریان الکترواسمز در ابتدای کار پایین است و با گذشت زمان افزایش یافته و پس از مدتی متوقف می‌گردد.



شکل ۴- تغییرات جریان الکتریکی در دو آزمایش EK و EK+S



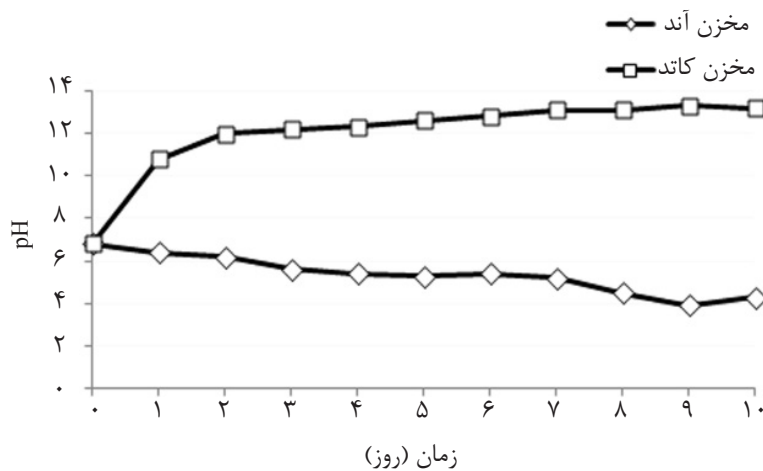
شکل ۵- تغییرات جریان الکترواسمز در دو آزمایش EK و EK+S

تولید H^+ و ایجاد جبهه اسیدی در مخزن آند و همچنین تولید OH^- در کاتد و ایجاد جبهه بازی در این مخزن می‌گردد، در نتیجه بین دو الکترود اختلاف pH ایجاد می‌شود. این اختلاف یکی از محدودیت‌های اصلی روش الکتروکینیتیک است که در شرایط قلبیایی موجب رسوب فلزات در کاتد می‌شود. در این تحقیق، تعدیل pH با افزودن اسید و باز به ترتیب در مخازن کاتد و آند انجام گرفت. در این روش هر ۲۴ ساعت pH مخازن کاتد و آند اندازه‌گیری شد و اسید و باز به آن‌ها اضافه شد تا pH به محدوده ۶-۸ برسد. تغییرات pH با گذشت زمان و پس از افزودن اسید و باز، نشان دهنده وقوع فرآیند است. مکانیزم‌های فرآیند الکتروکینیتیک سبب حرکت ذرات باردار و آب میان حفره‌ای می‌شود. در صورتی که pH در محدوده آند و کاتد کنترل نشود، حالت تثبیت خاک به وجود آمده و جریانی برقرار نمی‌شود. میزان تغییرات pH محلول الکترولیت در آند و کاتد، در آزمایش EK و EK+S در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده است.

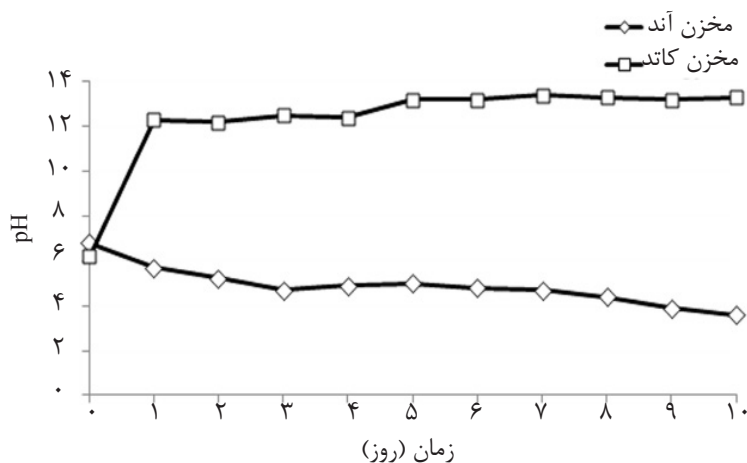
علت این امر اشباع نبودن خاک در ابتدای آزمایش‌ها می‌باشد. همان‌گونه که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، جریان آب منفذی پس از ۱۴۰ ساعت به حداکثر می‌رسد و در ادامه به دلیل بالا رفتن pH در منطقه نزدیکی کاتد، سیمانی شدن خاک در اثر تشکیل رسوبات فلزی در شرایط قلبیایی و مسدود شدن این منطقه، جریان بسیار ضعیفی عبور می‌کند.

همچنین، میزان جریان الکترواسمز تولید شده در آزمایش EK+S بیش‌تر از آزمایش EK است که علت این مسأله ناشی از حضور شوینده غیر یونی در آزمایش EK+S است. جذب شوینده بر روی ذرات خاک، جذب یون‌های متحرک را کاهش می‌دهد و با آزاد شدن یون‌ها، رسوب کمتری شکل می‌گیرد. از طرف دیگر شوینده به عنوان یک عامل پاشنده، نفوذپذیری خاک را بهبود می‌بخشد. در نتیجه محلول منفذی با سرعت بیشتری حرکت می‌کند [۲۹].

با اعمال میدان الکتریکی به خاک، الکترولیز آب در آند موجب



شکل ۶- تغییرات pH محلول مخزن آند و کاتد در آزمایش EK



شکل ۷- تغییرات pH محلول مخزن آند و کاتد در آزمایش EK+S

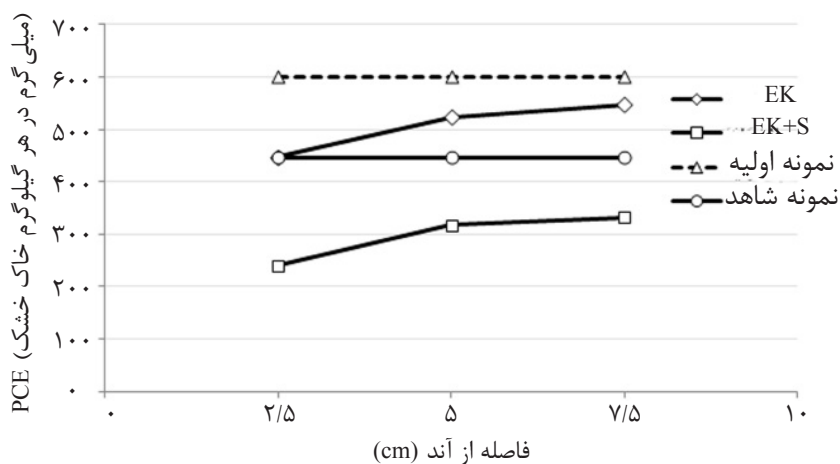
شوینده (EK+S) به ترتیب در شکل‌های ۸ و ۹ در مدت زمان ۱۰ روز نشان داده است.

برای تعیین میزان خودپالایی خاک به صورت طبیعی و بدون اعمال میدان الکتریکی در حذف آلاینده، آزمایش حذف آلاینده از خاک به تنهایی (به عنوان شاهد) انجام شد. نتایج نمونه شاهد در شکل ۸ نشان می‌دهد که در مدت ۱۰ روز میزان کاهش آلاینده در این آزمایش بسیار اندک است و علت آن را می‌توان ناشی از تبخیر، واکنش بین پرکلرواتیلن و اجزای تشکیل دهنده خاک و فعل و انفعالات میکروارگانیسم‌های موجود در خاک دانست.

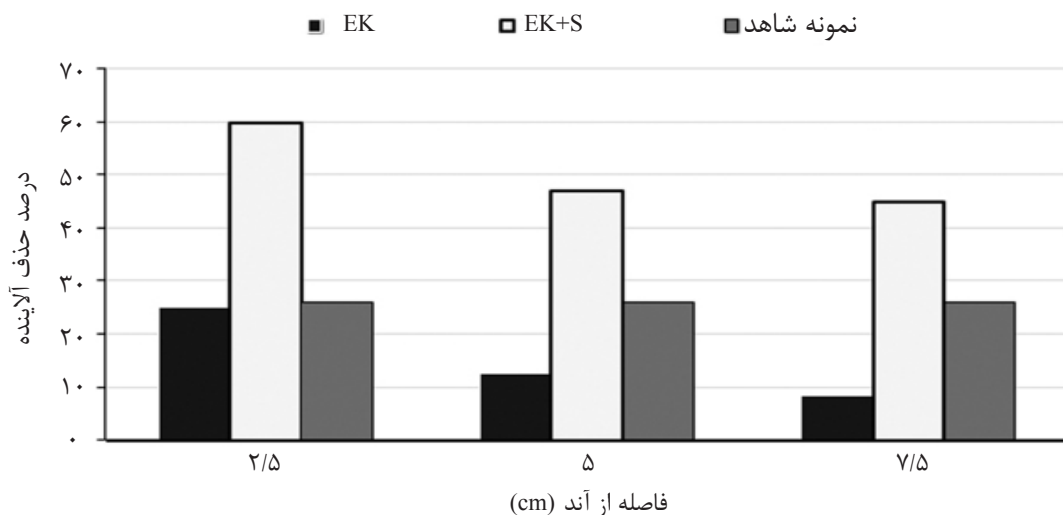
میزان pH در مخزن آند در آزمایش EK و EK+S، روندی کاهشی دارد که به دلیل اثر الکترولیز آب در آند و تولید H^+ است. همان‌طور که در نمودارها نیز دیده می‌شود، pH در آند در مدت ۱۰ روز از ۷ به ۴ می‌رسد. اما pH در اثر الکترولیز آب و تولید OH^- در مخزن کاتد روندی افزایشی دارد که در روزهای پایانی آزمایش ثابت شده و به مقدار ۱۳ می‌رسد.

بررسی تاثیر جریان الکتریکی در حذف پرکلرواتیلن از خاک

میزان غلظت باقی‌مانده و درصد حذف پرکلرواتیلن از خاک تحت تاثیر جریان الکتریکی در آزمایشات شاهد، الکتروکینتیک به تنهایی (EK) و الکتروکینتیک به همراه



شکل ۸- تغییرات غلظت آلاینده نفتی پرکلرواتیلن در طول نمونه خاک در مدت زمان ۱۰ روز



شکل ۹- درصد حذف آلاینده نفتی پرکلرواتیلن در طول نمونه خاک در مدت زمان ۱۰ روز

نتیجه گیری

نتایج به دست آمده بر اساس آزمایشات انجام شده در خصوص امکان پذیری حرکت پرکلرواتیلن و حذف آن از خاک نشان می دهد که میدان الکتریکی یکنواخت با شدت جریان ثابت و کم در حالت طبیعی بر روی آلاینده پرکلرواتیلن غیرقطبی و بدون بارالکتریکی با حلالیت بسیار پایین در آب، تاثیر چندانی نداشته است. بنابراین، در این تحقیق استفاده از شوینده غیر یونی TX-100 ضمن افزایش حلالیت آلاینده، موجب گردید آلاینده در اثر جریان الکترواسمز از آند به سمت کاتد حرکت کند. از بین مکانیزم های مختلف فرآیند الکتروکینیتیک، جریان الکترواسمز به عنوان مکانیزم غالب شناخته شد. با افزودن شوینده، میزان جذب یون ها و آلاینده بر روی ذرات خاک، کاهش می یابد. در نتیجه با آزاد شدن یون ها، رسوب کمتری تشکیل می شود و نفوذپذیری خاک بهبود می یابد، بنابراین محلول منفذی با سرعت بیشتری حرکت می کند.

راندمان پاک سازی در آزمایشات الکتروکینیتیک به تنهایی از آند به سمت کاتد کاهش می یابد. همچنین در این آزمایشات با افزودن شوینده غیر یونی TX-100، میزان درصد حذف پرکلرواتیلن حدود ۳۵٪ در قسمت آند افزایش می یابد. بیشترین راندمان حذف پس از ۱۰ روز حدود ۶۰٪، در نزدیکی آند، مربوط به آزمایشی است که تحت فرآیند الکتروکینیتیک با محلول الکتروولیت دارای شوینده غیر یونی TX-100 انجام شده است.

به طور کلی استفاده از شوینده سبب واجذبی و کاهش میزان جذب یون ها و هیدروکربن های کلرینه روی سطح ذرات خاک شده و با افزایش میزان نفوذپذیری خاک، میزان جریان الکترواسمز را افزایش می دهد. بنابراین، حجم زیادی از آلاینده با سرعت بیشتر حرکت می کند و با ترک از محیط خاک آلوده، خاک احیا می شود.

در آزمایش EK نیز با برقراری میدان الکتریکی، مقادیر اندکی از ذرات پرکلرواتیلن در طول نمونه خاک از آند به کاتد حرکت کردند. به طوری که میزان درصد حذف در قسمت آند در هر دو آزمایش نمونه شاهد و EK تقریباً با هم برابر است. دلیل پایین بودن میزان حذف را می توان ناشی از غیر قطبی بودن پرکلرواتیلن و کاهش فعالیت میکروارگانیزم ها در اطراف آند و کاتد به علت برقراری میدان الکتریکی دانست. همچنین پرکلرواتیلن آلاینده ای غیرقطبی است و تحت میدان الکتریکی به سختی حرکت می کند. برای برطرف نمودن این مشکل و افزایش میزان تحرک آلاینده در میدان الکتریکی و خروج آن از محفظه کاتد، از شوینده غیر یونی TX-100 استفاده شد (آزمایش EK+S). شوینده زاویه تماس بین خاک و آلاینده آب گریز را افزایش داده و از سوی دیگر باعث کاهش نیروی کشش بین سطوح خاک و آلاینده نفتی می گردد. بنابراین، نیروی مؤثری که عامل اصلی چسبیدن ذرات خاک و آلاینده نفتی است، تقلیل می یابد و موجب حرکت آلاینده در طول نمونه خاک می شود. با توجه به شکل ۸، در آزمایش EK+S میزان زیادی از غلظت آلاینده از آند به سمت کاتد کم شده و وارد محفظه کاتد می شود.

در شکل ۹ راندمان حذف پرکلرواتیلن از خاک در آزمایشات شاهد، الکتروکینیتیک به تنهایی (EK) و الکتروکینیتیک به همراه شوینده (EK+S) نسبت به زمان رسم شده است. بر اساس نتایج به دست آمده در مدت زمان ۱۰ روز بیشترین راندمان حذف به ترتیب حدود ۴۱٪ و ۶۰٪ و کمترین راندمان نیز به ترتیب ۶٪ و ۸٫۵٪، در بخش کاتد آزمایش های EK و EK+S به دست آمد. می توان نتیجه گرفت که استفاده هم زمان از فرآیند الکتروکینیتیک و شوینده غیر یونی بر روی حذف هیدروکربن های کلردار از خاک نسبت به فرآیند الکتروکینیتیک به تنهایی تاثیر بیشتری داشته است.

مراجع

- [1]. Bour M. and Yousefi Kebria D., "Effects of Biosurfactants in Electrokinetic Remediation of contaminated soils. Second International Conference on Geotechnique, Construction Matrials and Environment", Kuala Lumpur, Malaysia, 2012. Nov. pp. 14-16, (ISBN: 978-4-9905958-1-4 C3051), 2012.

- [۲]. سیدعلیخانی س.، شرفا م.، توسلی ا.، ابراهیمی س.، بررسی اثر رشد گیاهان در تراکم‌های مختلف بر پاک‌سازی هیدروکربن‌های نفتی خاک. نشریه آب و خاک، (۲۵) ۱۳۹۰.
- [3]. Khodadadi A., Yousefi D., Ganjidoust H., and Yari M, "Bioremediation of diesel- contaminated soil using *bacillus sp*", (stratin TMY-2) in soil by uniform and non- uniform electrokinetic technology field. Journal of Toxicology and Environmental Health Sciences, 3(15): pp. 376-384, 2011.
- [4]. Kebria D. Y., Khodadadi A. Ganjidoust H., Badkoubi A., and Amoozegar M. A., "Isolation and characterization of a novel native *Bacillus* strain capable of degrading diesel fuel", International Journal of Environmental Science and Technology, 2009. 6(3): pp. 435-442.
- [5]. Shariatmadari N., Weng C. H., and Daryaei H., "Enhancement of hexavalent chromium [Cr (VI)] remediation from clayey soils by electrokinetics coupled with a nano-sized zero-valent iron barrier", Environmental Engineering Science, 2009. 26(6): p. 1071-1079.
- [6]. Yalcin B., Li H., R. J., "Phenol removal from kaolinite by electrokinetics", J. Geotech. Eng, 1992. 118(11): pp. 1837-1853.
- [7]. Ho V. S., "The lasagnatechnology for in-situ soil remediation: small field test", Environmental Engineering Science, 33(7): pp. 1086-1091, 1999.
- [8]. Weng, C.H., C. Yuan, and H.H. Tu, "Removal of trichloroethylene from clay soil by series-electrokinetic process", Practice Periodical of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste Management, 7(1): pp. 25-30, 2003.
- [9]. Alshawabkeh A. N., Yeung A.T., and Bricka M. R., "Practical aspects of in-situ electrokinetic extraction", Journal of Environmental Engineering, 125(1): pp. 27-35, 1999.
- [10]. Coletta T. F., Bruell C. F., and Rayan D. K., "Cation- enhance removal of lead from kaolinite by electrokinetics", Environmental Engineering Science, 123(12): pp. 1227-1233, 1997.
- [11]. Sah J. G. and Lin L. Y., "Electrokinetic study on copper contaminated soils", Journal of Environmental Science & Health Part A, 35(7): pp. 1117-1139, 2000.
- [12]. Gholami M. and Yousefi Kebria D., "The comparison of phytoremediation and electrokinetic methods in remediation of petroleum hydrocarbons contaminated soil", Second International Conference on Geotechnique, Construction Materials and Environment, Kuala Lumpur, Malaysia, 2012. Nov. 14-16, (ISBN: 978-4-9905958-1-4 C3051, 2012.
- [13]. Adams A., "Transport of nanoscale zero valent iron using electrokinetic phenomena", Honours Dissertation, The University of Western Australia, Crawley, 2006.
- [14]. Zeng S., Chen C., Mikkelsen J., and Santiago J. G., "Fabrication and characterization of electroosmotic micropumps", Sensors and Actuators B 79, 2001.
- [15]. Acar YB A.A., "Principles of electrokinetic remediation", Environ. Sci. Technol., 27(13): pp. 2638-2647, 1993.
- [16]. Van Cauwenberghe L., "Electrokinetics. Ground Water Remediation Technologies Analysis Center", TO-97-03, 1997.
- [17]. Braraud F T. S. and Astruc M., "Ion velocity in soil solution during electrokinetic remediation", Journal of Hazardous Materials, 56: pp. 315-332, 1997.

- [18]. Taylor J., Zafiratos C. D., and Dubson M. A., *Modern Physics for Scientists and Engineers*, Prentice Hall, Upper Saddle River, 2004.
- [19]. Virkutyte J., M. Sillanpää, and P. Latostenmaa, "Electrokinetic soil remediation— critical overview", *Science of The Total Environment*, 289(1-3): pp. 97-121, 2002.
- [20]. Zelina JP R. J., *Electrochemical Remediation of Soils*, pp. 532-539, 1999.
- [۲۱]. عنذلیب مقدم س. ح.، عبادی ت.، خدادادی دربان ا.، بررسی کارایی دو محلول سورفکتانت آنیونی و غیر یونی در حذف هیدروکربن‌های نفتی از خاک آلوده به روش خاک‌شویی، سمینار تخصص نفت، گاز و محیط زیست- شیراز، ۱۳۸۷.
- [22]. Ahn C. K. Y., Woo S., and Park J., *Soil washing using various nonionic surfactants and their recovery by selective adsorption with activated carbon*. Hazardous Materials, 2007.
- [23]. Song G., L. C., and Lin J., *Application of surfactants and microemulsions to the extraction of pyrene and phenanthrene from soil with three different extraction methods*, *Chimica Acta*, 2007.
- [24]. Astm E., "06a standard test method for measurement of fracture toughness", *Annual Book of ASTM Standards*, Philadelphia PA: American Society for Testing and Materials, 2006.
- [۲۵]. یوسفی کبریا د.، زیست سالم‌سازی خاک آلوده به مواد نفتی به روش الکتروکینیتیک ناهمگن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۸۸.
- [۲۶]. ناهید م.، تشریح روش‌ها و بررسی‌های آزمایشگاهی روی نمونه‌های خاک و آب، نشریه شماره ۱۶۸، ۱۳۶۵. موسسه تحقیقات خاک و آب.
- [27]. Organization W. H., "*Concise International Chemical Assessment Document 68*", Tetrachloroethylene, 2006.
- [28]. http://en.wikipedia.org/wiki/Triton_X-100.
- [29]. Yuan S., Tian M., and Lu X., "*Electrokinetic movement of hexachlorobenzene in clayed soils enhanced by Tween 80 and B-cyclodextrin*", *J Hazard Mater*, B137: p. 1218-1225, 2006.