

## ارزیابی کارایی مواد فعال سطحی SDS و Tween 20 بر پالایش خاک رسی آلوده به گازوئیل با بهره‌گیری از فرآیند الکتروکینتیک و تعیین مقاومت فشاری خاک رس پس از حذف آلاینده

علی طاهریان<sup>۱</sup>، مریم یزدی<sup>۲\*</sup>، ایمان دانایی<sup>۳</sup>، امیرعلی زاد<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری مهندسی عمران گرایش ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران و منابع زمین، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران  
<sup>۲</sup> استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران و منابع زمین، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران  
<sup>۳</sup> دانشیار گروه مهندسی بازرسی فنی، دانشکده نفت آبادان، دانشگاه صنعت نفت، آبادان  
<sup>۴</sup> استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران و منابع زمین، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران

دریافت: ۱۴۰۱/۳/۱۶، بازنگری: ۱۴۰۱/۱۱/۲۲، پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۲۴، نشر آنلاین: ۱۴۰۱/۱۱/۲۴

### چکیده

آلودگی خاک‌های حاوی هیدروکربن‌های نفتی یکی از مهم‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی می‌باشد، از این رو لازم است تا در مورد پاکسازی مواد هیدروکربنی از جمله گازوئیل در مناطق نفت خیز تدابیری صورت بگیرد، جهت پاکسازی این ترکیبات از خاک راه کارهای مختلف از جمله استفاده از فرآیند الکتروکینتیک به کار می‌رود. این روش برای پاکسازی خاک‌های ریزدانه خصوصاً رسی مؤثر می‌باشد، در این تحقیق، پاکسازی خاک رسی آلوده به گازوئیل به روش الکتروکینتیک در حضور مواد فعال سطحی (Surfactant) SDS (Sodium Dodecyl Sulfate) و Tween 20 مورد ارزیابی قرار می‌گیرد و اثر کنترل pH در کاتولیت و آنولیت بر فرآیند اصلاح الکتروکینتیک (Electrokinetic) خاک رسی مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج فرآیند نشان می‌دهد که در غیاب ماده فعال سطحی روش الکتروکینتیک راندمان بسیار کم در پاکسازی گازوئیل از خاک رس دارد آن‌گاه در حضور ماده فعال سطحی بازدهی حذف افزایش چشمگیری دارد، با کنترل pH در کاتولیت و آنولیت و افزایش غلظت ماده فعال سطحی بازدهی حذف گازوئیل از خاک افزایش می‌یابد. با کاربرد Tween 20 کمترین میزان پاکسازی در غلظت ۰/۰۵٪ برابر با ۱۸٪ به دست آمده است این در حالی است که SDS توانست حدوداً ۴۹٪ از گازوئیل را در غلظت ۰/۱۵٪ ماده فعال سطحی حذف کند، در ادامه تحقیق آزمایش تک‌محوری جهت تعیین مقاومت فشاری محصورنشده نمونه خاک انجام گرفته است که نشان می‌دهد فرآیند پاکسازی سبب افزایش مقاومت فشاری خاک می‌گردد.

**کلیدواژه‌ها:** الکتروکینتیک، خاک رس، گازوئیل، کنترل pH، ماده فعال سطحی، مقاومت فشاری، الکترواسموز، ژئوتکنیک.

### ۱- مقدمه

آلودگی خاک‌ها و منابع آب زیرزمینی با هیدروکربن‌های نفتی در اطراف پالایشگاه‌ها، جایگاه‌های سوخت‌گیری و محل عبور لوله‌های تأسیسات انتقال سوخت صورت می‌پذیرد که از جمله معضلات مهم محیط زیست به‌شمار می‌آید. هیدروکربن‌های نفتی مذکور در مواد شیمیایی که توسط انسان برای فعالیت‌های مختلف شامل سوخت-گیری وسائل نقلیه و گرم کردن منازل استفاده می‌شوند، به‌طور طبیعی وجود دارند. نشت ترکیبات نفتی تحت تأثیر نیروهای

در عصر حاضر، آلودگی محیط زیست یک بحران جهانی می‌باشد، رشد روزافزون جمعیت و توسعه شهرها، گسترش صنایع و بهره‌برداری نامحدود از منابع طبیعی، از عوامل مهم فزاینده آلاینده‌ها به‌حساب می‌آیند (Reilly و همکاران، ۱۹۹۶). آلودگی زیستگاه به انواع آلاینده‌ها خصوصاً مواد هیدروکربنی هرساله روبه افزایش بوده و به‌عنوان یکی از موضوعات بسیار مهم در زندگی بشر مطرح است.

\* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۹۱۲-۶۹۳۹۶۱۲

موئینگی و ثقلی منجر به حرکت عمودی در خاک‌های غیراشباع شده و خلل و فرج خاک را پر می‌کند. از میان آلاینده‌ها، هیدروکربن‌های نفتی از رایج‌ترین آلوده‌کننده‌های آب و خاک محسوب می‌شوند (Usepa, ۲۰۰۰). انباشته شدن این مواد در طبیعت به‌ویژه در خاک به سبب سمی بودن آن‌ها، نگران‌کننده است. سم این مواد به علت آسیب‌هایی مثل سرطان‌زایی، جهش‌زایی و از سوی دیگر کاهش پتانسیل بالفعل این خاک‌ها جهت استفاده بهینه در کشاورزی، کاهش ظرفیت باربری خاک جهت احداث سازه و طرح‌های عمرانی بسیار مورد توجه قرار گرفته است. با توجه به مشکلات ذکر شده و توجه به اصل حفظ سلامت جامعه، لزوم پاکسازی محیط زیست از این آلاینده‌ها امری ضروری است (Berg و همکاران، ۱۹۹۸). اصلاح خاک‌های آلوده به هیدروکربن‌های نفتی، به‌علت ناهماهنگی خاک و حجم بالای موادی که باید اصلاح شوند، بسیار پرهزینه و وقت‌گیر است و اکثر روش‌های به‌کار رفته برای اصلاح این خاک‌ها فاقد کارایی لازم بوده است. سرعت بالا، هزینه مورد نیاز و قابلیت کاربری زمین در آینده سبب شده است تا روش اصلاح الکتروکینتیکی مورد توجه قرار گیرد. در حال حاضر با توجه به سهولت استفاده از این روش، تحقیقات در دنیا به این روش اختصاص یافته است. از مزایای فرآیند الکتروکینتیکی می‌توان به درجا بودن روش، قابلیت استفاده در خاک‌های با غلظت بالای آلاینده‌های آلی و معدنی، قابلیت کاربرد در خاک‌های با نفوذپذیری کم، خاک‌های اشباع و غیراشباع و همچنین رسوبات دریایی و لجن‌ها اشاره کرد. از معایب عمده آن نیز می‌توان به تغییرات شدید pH در طی فرایند و کارایی پایین در خاک‌های با رطوبت کم اشاره کرد که می‌توان با استفاده از عوامل کنترل‌کننده pH کارایی فرایند را بهبود بخشید، الکتروکینتیکی روشی فیزیکی برای جداسازی مواد مضر در طبیعت اعم از ترکیبات شیمیایی آلی و معدنی از مکان‌های آلوده مانند خاک، رسوبات و آب‌های زیرزمینی است. نتیجه فرآیند الکتروکینتیکی در خاک، حرکت آب، یون‌ها و ذرات باردار در اثر اعمال پتانسیل الکتریکی است. اعمال پتانسیل الکتریکی سبب انتقال آلاینده‌ها از طریق مکانیسم‌های مختلف مانند مهاجرت الکتریکی، الکترواسمز و الکتروفورز می‌شود. مهاجرت الکتریکی، انتقال یون‌ها و مولکول‌های قطبی تحت تأثیر میدان الکتریکی به سمت الکتروود با بار مخالف، الکترواسمز<sup>۱</sup> جریان سیال یونی تحت تأثیر میدان الکتریکی نسبت به یک سطح باردار و الکتروفورز<sup>۲</sup>، حرکت کلوئید باردار مانند رس به سمت الکتروود با بار مخالف در یک میدان الکتریکی است. حرکت از طریق الکتروفورز در

سیستم خاک بسیار جزئی است. الکترواسمز فرآیند غالب انتقال آلاینده‌های آلی است که به‌صورت محلول، سوسپانسیون، امولسیون و یا شکل‌های مشابه دیگر وجود دارند. در اثر حرکت یون‌ها و ذرات باردار به سمت قطب‌های غیرهمنام، مولکول‌های آب همراه با آن‌ها به حرکت در می‌آید. از سوی دیگر به‌علت وجود بار منفی در سطح ذرات رس، حرکت یون‌های مثبت و در نتیجه مولکول‌های آب به سمت کاتد، به‌صورت جریان حاکم مشاهده می‌گردد. الکترولیز شامل واکنش‌های شیمیایی است که در فرآیند الکتروکینتیکی در مجاورت الکتروودها رخ می‌دهد. در اثر ایجاد شرایط اکسیداسیون در آند، اکسیژن و یون هیدروژن و در نتیجه شرایط کاهش در کاتد، هیدروژن و یون هیدروکسیل تولید می‌شود. بخشی از مواد آلی به-دلیل حلالیت در آب و یا به‌علت قطبی بودن، از سطح خاک جدا شده و به‌وسیله جریان الکترواسمز در خاک به حرکت در می‌آیند و در انتهای مسیر خود می‌تواند از کاتولیت خارج شوند. بدیهی است که بازدهی سامانه الکتروکینتیکی در حذف آلاینده‌های آلی به‌میزان حلالیت و یا قطبی بودن آن‌ها بستگی دارد. از طرف دیگر آلاینده‌های آلی شامل مولکول‌های سنگین و غیرقطبی به‌راحتی در آب حل نمی-شوند و در نتیجه الکترواسمز توان کمی در جابه‌جایی این مولکول‌ها دارد. تحقیقات سال‌های اخیر، کارایی روش الکتروکینتیکی برای حذف آلاینده‌های مختلف مانند فلزات سنگین و آلاینده‌های آلی از خاک را نشان داده است.

Bahemmat و همکاران (۲۰۱۱) کارایی روش الکتروکینتیکی را برای حذف هیدروکربن‌های نفتی در خاک بررسی کرده‌اند، که بر این اساس برخی از مشتقات نفتی به‌وسیله این فرآیند قابل حذف، اما برخی از آن‌ها به‌خوبی حذف نمی‌شوند. Eykholt و همکاران (۱۹۹۴) نقش مکانیسم الکترواسمز را در فرآیند اصلاح الکتروکینتیکی در حذف هیدروکربن‌های نفتی در یک خاک رسی مناسب ارزیابی کردند. با توجه به قابلیت روش الکتروکینتیکی در حذف انواع آلاینده‌های آلی، اغلب تحقیقات به-سمت بهینه‌سازی و رفع محدودیت‌های آن سوق یافته است. از جمله موادی که در شستشوی خاک کاربرد دارند، مواد فعال سطحی هستند. مواد فعال سطحی ترکیبات آمفیفیلک<sup>۳</sup> شامل هر دو گروه آب دوست و آب‌گریز هستند. این ترکیبات هم به‌صورت طبیعی و هم به‌صورت مصنوعی کاربرد دارند. جهت انتخاب ماده فعال سطحی مناسب در تصفیه الکتروکینتیکی، عوامل مختلفی نظیر: راندمان و کارایی ماده فعال سطحی در تصفیه آلاینده‌ها، عملکرد ماده فعال در

1. Electroosmos  
2. Electrophores

3. Amphiphilic

انتقال را درگیر می‌کند، در موارد ارزیابی شده، ثابت شده است که اثر بافر باعث بهبود در عملکرد کلی فرآیند الکتروکینتیک می‌شود. Gidudu (۲۰۲۰) در مطالعه تأثیر کاربرد بیوسورفاکتانت‌ها<sup>۴</sup> و روش الکتروکینتیک بر روی خاک آلوده به پتروشیمی دریافت که اصلاح الکتروکینتیک نه تنها یک اصلاح بوده بلکه با این فناوری می‌توان آلاینده را از خاک به فاز دیگری منتقل کرد و منجر به حذف کامل آن شود. Nasiri (۲۰۱۹) دریافت است که استفاده از روش الکتروکینتیک همراه با کنترل PH می‌تواند برای پاکسازی خاک‌های آلوده به کروم بسیار مناسب باشد.

Yongsong و همکاران (۲۰۱۸) پاکسازی خاک رسی آلوده به هیدروکربن با استفاده از فرآیند الکتروکینتیک و اعمال جریان مستقیم الکتریکی را مؤثر ارزیابی کردند.

Zhou (۲۰۲۱) دریافت که استفاده از روش الکتروکینتیک در حذف فلزات سنگین روی، کادمیوم، منگنز از خاک مؤثر بوده و منجر به پاکسازی حدود ۷۲ درصدی آلاینده از نمونه خاک می‌گردد. Vaishnavi (۲۰۲۱) در مطالعه اصلاح بیوالکتروکینتیک با واسطه بیوسورفاکتانت محیط آلوده به دیزل دریافت که این روش جهت پاکسازی و تمیز کردن خاک‌های آلوده به هیدروکربن دیزل روشی کارا می‌باشد.

Cameselle (۲۰۲۱) در تحقیقی جهت اصلاح الکتروکینتیک پیشرفته برای از بین بردن فلزات سنگین از خاک‌های آلوده دریافت است که استفاده از روش الکتروکینتیک باعث پاکسازی ۷۸/۷ درصد کادمیوم، ۷۸/۶ درصد کبالت، ۷۲/۵ درصد مس، ۷۳/۳ درصد روی، ۱۱/۸ درصد کروم و ۹/۸ درصد سرب از خاک می‌شود.

Boulakradeche (۲۰۲۲) در مطالعه‌ای دریافت است که استفاده از فرآیند الکتروکینتیک جهت پاکسازی سرب و مس از خاک روشی مؤثر بوده و باعث حذف ۹۶ درصدی این آلاینده‌ها از خاک می‌شود. Sun (۲۰۲۱) دریافت که پاکسازی کادمیوم از خاک‌های ریزدانه با استفاده از فرآیند الکتروکینتیک حدود ۶۴ درصد می‌باشد. Hamidi و همکاران (۲۰۲۱) دریافتند که با ادامه روند گیاه پالایی، حد روانی، حد پلاستیک، رطوبت بهینه و نفوذپذیری افزایش و حداکثر چگالی خشک کاهش می‌یابد.

Hosseini و همکاران (۲۰۱۹) دریافتند که آلاینده‌ها می‌توانند بر میزان نشست نهایی و تعداد سیکل‌های بارگذاری برای رسیدن به این مقدار تأثیر بگذارند. با افزایش عمق، تعداد چرخه‌های بار و محتوای آلودگی، نشست نهایی را افزایش داده و تعداد چرخه‌های بارگذاری برای رسیدن به آن سطح افزایش می‌یابد.

PHهای مختلف، بارهای الکتریکی قابل حمل توسط ماده فعال سطحی و هزینه را می‌توان در نظر گرفت. به‌طور کلی، انحلال در آب‌های زیرزمینی در دماهای طبیعی، جذب کم به ذرات خاک و کارایی در غلظت کمتر از ۳٪ از جمله ویژگی‌های مطلوب ماده فعال سطحی برای تصفیه خاک هستند. بسیاری از پژوهشگران از انواع مواد فعال سطحی برای شستشوی خاک‌های آلوده به مواد آلی استفاده کرده‌اند.

Razavi و همکاران (۲۰۱۱) با کاربرد ماده فعال سطحی Saponin به شستشوی خاک آلوده به نفت خام پرداختند و به راندمان حذف مطلوبی رسیدند.

Khataei (۲۰۱۶) برای بهبود حذف هیدروکربن‌ها از خاک آلوده به روش الکتروکینتیک، با استفاده از CA-Igepal ۷۲۰ و پرسولفات به ترتیب به‌عنوان ماده فعال سطحی و اکسیدکننده راندمان حذف ۳۸٪ رسید. Barba (۲۰۱۷) در مطالعه تأثیر فرآیند الکتروکینتیک همراه با شوینده بر روی ترکیبات هیدروکربن کلردار در خاک دریافت است که این فرآیند به کمک استفاده از شوینده جهت حذف آلاینده‌های هیدروکربنی از نمونه خاک رسی روشی کارآمد خواهد بود.

Vocciante (۲۰۲۱) در مطالعه پایداری در فرآیندهای اصلاح الکتروکینتیک دریافت است که استفاده از روش الکتروکینتیک جهت پاکسازی آلاینده‌های غیرآلی از خاک رس مناسب می‌باشد.

Lisbeth و همکاران (۲۰۱۹) در مطالعه حذف سطحی آلودگی از خاک به روش الکتروکینتیک دریافتند که فرآیند الکتروکینتیک جهت پاکسازی خاک رسی از اتیلن کلرزده مناسب می‌باشد.

Ukleja (۲۰۲۰) با استفاده از فرآیند الکتروکینتیک دریافت است که استفاده از روش مذکور باعث افزایش پارامترهای مقاومتی خاک رس اشباع خواهد شد.

Saini و همکاران (۲۰۲۰) در تحقیق مروری بر الکتروکینتیک پیشرفته فناوری‌های زیست هسته‌ای دریافتند الکتروکینتیک مزایایی چون پاکسازی هدفمند، عدم نیاز به حفاری، کاربرد در خاک‌های اشباع و غیراشباع، توانایی تصفیه آلاینده‌های آلی و غیرآلی دارد.

López و همکاران (۲۰۱۷) در مطالعه‌ای از فرآیندهای انحلال و ته‌نشینی کالیکت تحت فرآیند الکتروکینتیک در خاک دریافتند اهمیت در نظر گرفتن فرآیندهای انحلال-ته‌نشینی در بهسازی الکتروکینتیک بسیار مهم است، زیرا توزیع pH خاک تا حد زیادی به این پارامترها بستگی دارد. PH آب‌های زیرزمینی خاک یک متغیر اساسی در بهسازی فرآیند الکتروکینتیک است و مستقیماً بر روی خاصیت آلاینده‌ها تأثیر می‌گذارد و به‌طور غیرمستقیم مکانیسم‌های

است، خاک به‌طور مصنوعی به گازوئیل آلوده شده است. خاک پس از آلوده شدن دو هفته در شرایط آزمایشگاه در ظرف درب بسته قرار داده شد و پس از این مدت مخلوط تهیه شده در فضای باز به آرامی هم‌زده شد تا حلال به‌طور کامل از خاک تبخیر گردد. با توجه به این‌که امکان دارد بخش کوچکی از هیدروکربن‌های نفتی در زمان هم‌زدن خاک، همراه حلال از خاک خارج شوند، پس از تبخیر کامل حلال، غلظت هیدروکربن‌های نفتی موجود در خاک دوباره اندازه‌گیری شد. جهت جلوگیری از ورود خاک آلوده از ستون خاک به درون مخزن‌های کناری محفظه الکتروکینتیک که محل قرارگیری محلول‌های الکترولیت هستند، از کاغذ صافی استفاده گردیده است. جهت ورود و خروج مایع پیش‌برنده در طول ستون و نگهداشتن خاک در شرایط اشباع (منظور از شرایط اشباع، نفوذ محلول‌های الکترولیت از محفظه‌های کناری به محفظه خاک می‌باشد)، شیرهایی در دو طرف مخزن تعبیه شده است، ولتاژ مورد نظر توسط یک منبع جریان الکتریکی از طریق دو الکترود موجود در آنولیت و کاتولیت، به نمونه خاک اعمال شده و توسط یک مولتی‌متر به‌صورت روزانه کنترل گردیده است. الکترودهای به‌کاررفته از جنس گرافیت توسط پایه در مخزن‌های آنولیت و کاتولیت نگه‌داشته شدند. ویژگی‌های سیستم مورد استفاده این تحقیق در جدول (۱) ارائه شده است. با توجه به مطالعات انجام شده در زمینه پاکسازی خاک‌های آلوده به مواد نفتی، مواد فعال سطحی SDS و Tween 20 انتخاب شدند. در پژوهش حاضر از یک سلول الکتروکینتیک به‌شکل مکعب مستطیل از جنس پلکسی گلاس و به ابعاد  $50 \times 15 \times 20$  cm مطابق شکل (۱) استفاده شده است.

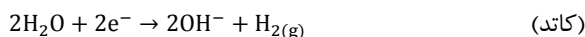
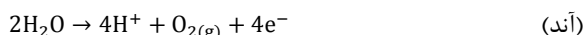
جدول ۱- ویژگی‌های آزمایش‌های انجام گرفته

نوع خاک	رس
نوع آلاینده	گازوئیل
غلظت اولیه گازوئیل	۱٪
نوع الکترود	گرافیت
زمان فرآیند نوع ماده فعال سطحی	۱۰ روز SDS Tween 20

در سیستم مذکور، محفظه میانی به طول ۳۰ سانتی‌متر، محل قرارگیری خاک و محفظه‌های طرفین جهت ریختن محلول‌های الکترولیت هستند، محلول الکترولیت‌ها ۰/۱ مولار سولفات سدیم بوده و محفظه الکترولیت‌ها و محل قرارگیری خاک توسط صفحات مشبک از جنس پلاستیک از یکدیگر جدا شده‌اند. مشبک بودن صفحات، امکان عبور جریان الکترواسمز در طول آزمایش را فراهم می‌سازد. با توجه به حرکت محلول‌های الکترولیت و تغییر ارتفاع در

Hanaei و همکاران (۲۰۲۱) دریافتند که آزمون برش مستقیم نشان می‌دهد که چسبندگی نمونه خاک افزایش یافته و زاویه اصطکاک پس از آلودگی روغن کاهش یافته است و آزمایش نفوذپذیری نشان می‌دهد که آلودگی نمونه خاک باعث کاهش نفوذپذیری خاک شنی شده و این تغییر تابعی از میزان روغن و ویسکوزیته روغن‌ها است.

Joukar و همکاران (۲۰۱۹) دریافتند که آلودگی نمونه خاک به نفت سفید سبب کاهش ظرفیت باربری خاک می‌گردد. در طی فرآیند الکتروکینتیک، در نتیجه الکترولیز آب و تولید یون‌های هیدروژن در آنولیت، با گذشت زمان غلظت  $H^+$  افزایش یافته و در نتیجه pH این ناحیه کاهش می‌یابد، در مقابل در کاتد، به‌علت تشکیل یون‌های هیدروکسید، pH این ناحیه، به‌شدت افزایش یافته است.



فرآیند الکتروکینتیک در شرایط عدم کنترل pH، تغییرات این پارامتر را در خاک بسیار چشمگیر نشان می‌دهد. با افزایش غلظت  $H^+$  و  $OH^-$  به‌ترتیب در آنولیت و کاتولیت، یک جبهه اسیدی از سمت آند و یک جبهه بازی از سمت کاتد به درون خاک حرکت می‌کند. در پژوهش حاضر، به‌منظور بهبود فرآیند حذف به‌روش الکتروکینتیک از مواد فعال سطحی SDS و Tween 20 به‌عنوان الکترولیت استفاده شده است. هدف از انجام این پژوهش، افزایش کارایی روش الکتروکینتیک در تصفیه خاک رس آلوده به گازوئیل، از طریق تلفیق روش مذکور با کاربرد مواد فعال سطحی بوده است. همچنین اثر دو پارامتر غلظت مواد فعال سطحی و کنترل pH در میزان خروج گازوئیل از خاک و راندمان تصفیه مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۲- مواد و روش‌ها

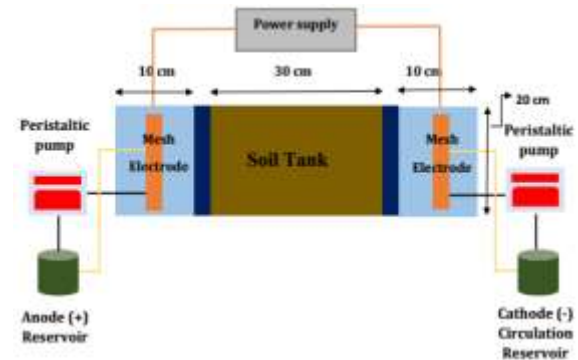
در تحقیق صورت گرفته از اسید نیتریک جهت کنترل تغییرات pH استفاده گردیده است، همچنین از حلال هگزان برای جداسازی ماده هیدروکربنی از خاک مورد استفاده قرار گرفته است، ماده آلی هیدروکربنی آلاینده خاک رسی گازوئیل با فرمول شیمیایی  $C_{12}H_{23}$  بوده که به‌لحاظ شرایط فیزیکی به‌صورت مایع می‌باشد، جهت پخش یکنواخت گازوئیل به‌عنوان ماده آلاینده در این تحقیق از حلال استون استفاده شد. پس از اختلاط با خاک، حلال کاملاً از محیط خاک تبخیر می‌شود. از آنجایی که آلودگی در خاک وجود نداشته

متر به‌طور روزانه اندازه‌گیری و کنترل pH انجام گرفته است. برای اندازه‌گیری گازوئیل در خاک، به ۱۰ گرم خاک آلوده به گازوئیل، ۴ میلی‌لیتر حلال هگزان (هگزان به‌دلیل غیرقطبی بودن خود حلال ترکیبات غیرقطبی محسوب می‌شود در نتیجه می‌توان از آن جهت پاکسازی مواد هیدروکربنی از آب و خاک استفاده کرد) اضافه و به مدت پنج دقیقه به‌صورت تکان رفت و برگشتی مخلوط می‌شود. سپس نمونه به مدت ۱۰ دقیقه در ۳۰۰۰ دور در دقیقه، سانتریفیوژ و محلول آلی بالایی با احتیاط جمع‌آوری می‌شود پس از سه بار انجام مراحل بالا، محلول به‌منظور اندازه‌گیری مقدار گازوئیل در خاک، به دستگاه کروماتوگرافی گازی (GC) تزریق شده است. نتایج کروماتوگرافی به‌صورت نمودارهای خروجی نمایش داده می‌شود. پیک‌های به‌دست آمده نمودارهای خروجی حاصل از خاک پاکسازی شده با پیک اولیه (خاک رس آلوده به گازوئیل) مقایسه می‌گردد و میزان حذف آلاینده از خاک رس به‌صورت درصد ارزیابی می‌گردد. در این حالت ترکیب نفتی با استفاده از حلال آلی جدا سازی شده و به‌وسیله دستگاه کروماتوگرافی تعیین مقدار شد، این مقایسه می‌بایست برای تمامی آزمایش‌ها با حضور مواد فعال سطحی مختلف که در ابتدا به آن‌ها اشاره شد تکرار گردد. به‌منظور تعیین میزان پارامترهای مقاومتی خاک بر روی خاک رسی، نمونه خاک رس آلوده به گازوئیل و نمونه خاک رس پاکسازی شده پس از فرآیند الکتروکینتیک آزمایش تک‌محوری بر اساس استاندارد ASTM D2166 انجام گرفته است، سطح مقطع، طول و وزن مخصوص خشک نمونه به‌ترتیب برابر  $11/1 \text{ cm}^2$ ،  $7/4 \text{ cm}$  و  $1/76 \text{ gr/cm}^3$  بوده است، با توجه به شرایط فرآیند الکتروکینتیک نمونه‌ها به‌صورت دست‌خورده تهیه شده و بر اساس استاندارد ذکر شده مورد آزمایش قرار گرفته است و مقادیر مقاومت فشاری محصور نشده نمونه خاک در شرایط مختلف به‌دست آمده است.

### ۳- نتایج و بحث

در تحقیق انجام شده، قبل از انجام فرآیند الکتروکینتیک بر روی نمونه خاک به‌منظور تعیین اندازه ریزدانه خاک آزمایش هیدرومتری بر اساس استاندارد ASTM D422 انجام گرفته است، در این آزمایش از هیدرومتر H152 استفاده شده است که نتایج حاصل از آزمایش هیدرومتری نمونه خاک در نمودار شکل (۳) قابل مشاهده می‌باشد.

اثر جریان الکترواسمز و جلوگیری از جریان الکترواسمز معکوس، سطح الکترولیت در محفظه‌های آند و کاتد (برای جلوگیری از اثر گرادیان هیدرولیکی در مهاجرت الکتریکی و جریان الکترواسمز) به‌طور مداوم توسط پمپ کنترل شده است. در شکل (۲) محفظه ساخته شده تحقیق انجام شده قابل ملاحظه می‌باشد.



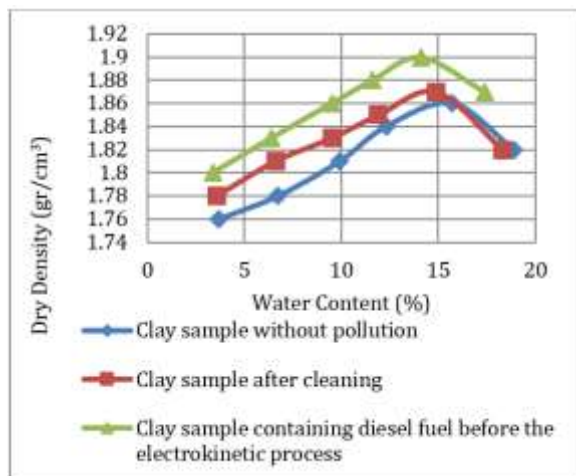
شکل ۱- سیستم اجرایی الکتروکینتیک



شکل ۲- محفظه ساخته شده تحقیق حاضر

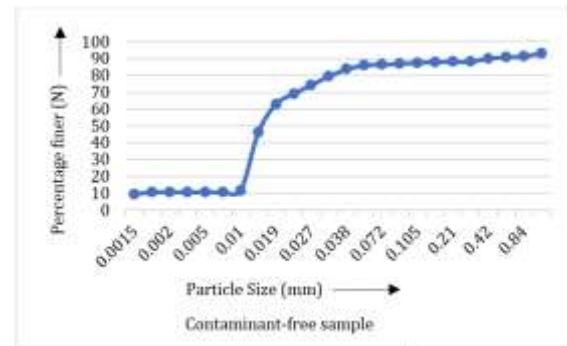
در این تحقیق برای هر ماده فعال، ۳ غلظت مدنظر قرار گرفته است. در تمام آزمایش‌ها غلظت گازوئیل برابر با  $10 \text{ gr/kg}$  و مدت زمان انجام آزمایش‌ها برابر با ۱۰ روز بوده است. در طول آزمایش، نمونه خاک داخل سلول برای اندازه‌گیری pH و تعیین غلظت در راستای طولی در چهار نقطه نمونه‌برداری شده است. محلول‌های الکترولیت نیز برای تعیین pH و غلظت آلاینده مورد آنالیز قرار گرفته است. به‌منظور بررسی میزان تأثیر pH بر کارایی حذف هیدروکربن‌های نفتی از خاک توسط فرآیند الکتروکینتیک دو آزمایش، یکی بدون کنترل pH و دیگری همراه با کنترل pH انجام گرفت، در آزمایش دوم به‌منظور کنترل pH در آنولیت و کاتولیت، به‌ترتیب از تزریق محلول‌های سود و اسید نیتریک استفاده گردید. پس از شروع آزمایش و برقراری جریان الکتریکی، تغییرات pH توسط دستگاه pH

بر طبق جدول (۲)، نتایج آزمایش تعیین حدود اتربرگ بر روی نمونه‌های خاک در شرایط مختلف بیانگر آن است که میزان نشانه خمیری با اضافه شدن آلاینده گازوئیلی، افزایش داشته و مقدار آن ۱۵/۶۲۸٪ می‌باشد، این مقدار در حالی است که میزان نشانه خمیری نمونه خاک بدون آلاینده ۱۲/۱۶۶٪ بوده و مقدار نشانه خمیری نمونه بعد از پاکسازی ۱۴/۹۲۵٪ به دست آمده است، در ادامه روند تحقیق به منظور تعیین وزن مخصوص خشک نمونه‌ها، آزمایش تراکم بر اساس استاندارد ASTM D698 انجام گرفته است که در شکل (۴) نتایج مربوط به این آزمایش بر روی نمونه‌ها قابل مشاهده می‌باشد. بر طبق شکل (۴) وزن مخصوص خشک نمونه بدون آلاینده در درصد رطوبت ۱۵/۷٪ به میزان  $1.86 \text{ gr/cm}^3$  و وزن مخصوص خشک نمونه همراه با آلاینده گازوئیلی در درصد رطوبت ۱۴/۱٪ به میزان  $1.82 \text{ gr/cm}^3$  و ۱/۹ و میزان وزن مخصوص خشک نمونه بعد از فرآیند الکتروکینتیک در درصد رطوبت ۱۴/۹٪ به میزان  $1.87 \text{ gr/cm}^3$  به دست آمده است.



شکل ۴- نتایج آزمایش تراکم نمونه‌های خاک در شرایط مختلف

با توجه به این که تحرک یونی پروتون خیلی بیشتر از تحرک یون هیدروکسیل است لذا جبهه اسیدی با سرعت بیشتری نسبت به جبهه بازی در امتداد ستون خاک پیشروی کرده و در ناحیه نزدیک به کاتد، این دو جبهه به هم خواهند رسید. در نتیجه در بیشتر طول ستون خاک شرایط اسیدی حاکم است. در مقابل در مجاورت کاتد، مقدار pH به شدت افزایش یافته و با رسوب فلزات و سایر آلاینده‌ها در این ناحیه، یک لایه متراکم تشکیل می‌شود. این لایه از سرعت جریان الکترواسمزی که به سمت کاتد در حرکت بود، کاسته و باعث کاهش کارایی جابه‌جایی گازوئیل در طول ستون خاک می‌شود. همان‌طور که در شکل (۵-الف) مشاهده می‌گردد، در شرایطی که



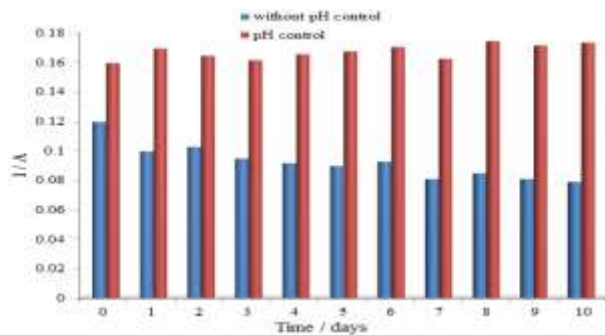
شکل ۳- نمودار آزمایش هیدرومتری جهت تعیین اندازه ریزدانه نمونه خاک

نتایج فرآیند هیدرومتری انجام گرفته بر روی نمونه خاک نشان می‌دهد که اندازه قطر درشت‌ترین دانه حدود  $0.0721$  میلی‌متر می‌باشد که حدود ۸۶ درصد ریزدانه نمونه خاک را تشکیل می‌دهد و این در حالی است که اندازه قطر ریزترین دانه برابر  $0.0015$  میلی‌متر بوده است که حدود ۱۰ درصد ریزدانه نمونه خاک را تشکیل می‌دهد که با توجه به نتایج به دست آمده از اندازه دانه‌های خاک مشخص شده است که میزان رس نمونه خاک بیش از ۸۶ درصد می‌باشد (شکل (۳)). پس از انجام آزمایش هیدرومتری، به منظور سنجش میزان رطوبت نمونه خاک و تعیین شرایط خمیری بر روی نمونه خاک فرآیند تعیین حدود اتربرگ بر اساس استاندارد ASTM D4318-93 انجام گرفته است که بدین منظور نمونه خاک از الک نمره ۴۰ عبور داده شده است، نتایج این آزمایش در جدول (۲) مشاهده می‌گردد.

جدول ۲- آزمایش تعیین حدود اتربرگ نمونه خاک

نمونه خاک بدون آلاینده	
حد خمیری	۲۰/۱۹۲٪
حد روانی	۳۲/۳۵۸٪
شاخص خمیری	۱۲/۱۶۶٪
نمونه خاک با آلاینده گازوئیلی	
حد خمیری	۱۴/۶۴۶٪
حد روانی	۳۰/۲۷۵٪
شاخص خمیری	۱۵/۶۲۸٪
نمونه خاک پاکسازی شده بعد از فرآیند الکتروکینتیک	
حد خمیری	۱۷/۷۷۸٪
حد روانی	۳۲/۷۰۳٪
شاخص خمیری	۱۴/۹۲۵٪

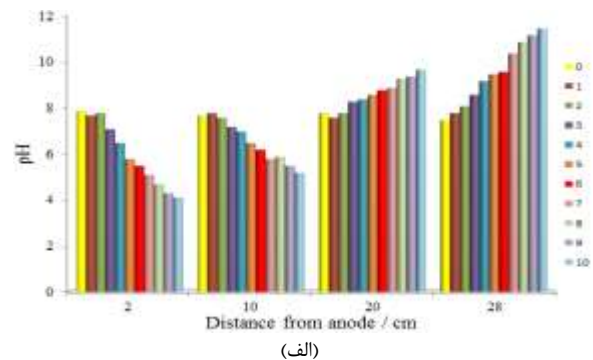
واکنش‌های حاکم در زمان برقراری میدان الکتریکی در دو سر الکترودها است که موجب حرکت یون‌ها و جریان منفذی درون خلل و فرج خاک شده و در نتیجه، خاک مقاومت‌های متغیری نشان می‌دهد، در شکل (۶) تغییرات جریان عبوری از مدار الکتروکینتیک در طول زمان آزمایش نشان داده است. در حالت بدون کنترل pH با توجه به تشکیل رسوب فلزات و آلاینده‌های آلی در مجاورت کاتد و همچنین حرکت معکوس جریان الکترواسمز به علت pH پایین در مجاورت آن، شدت جریان الکتریکی ضعیف‌تری نسبت به آزمایش دوم به دست می‌آید. با توجه به این که در حالت pH کنترل شده، از محلول‌های سدیم هیدروکسید و اسید نیتریک به منظور کنترل pH استفاده شد، این محلول‌ها به‌طور مستقیم باعث افزایش شدت جریان الکتریکی در طول ستون خاک شده و در نتیجه، شدت جریان در حالت دوم بیشتر از حالت اول به دست می‌آید. در غیاب کنترل pH، با توجه به این که در پایان دوره، از غلظت سایر یون‌های موجود در خاک به علت خروج آن‌ها از محلول خاک و یا رسوب در مجاورت کاتد کاسته شد، در اواخر دوره شدت جریان الکتریکی کاهش یافته است (شکل (۶)). اما در حالت تحت کنترل pH، تقریباً جریان در طول زمان آزمایش ثابت ماند. در شکل (۶) محور قائم بیانگر شدت جریان بر حسب آمپر بوده و محور افقی نمودار معرف مدت زمان بر حسب روز می‌باشد.



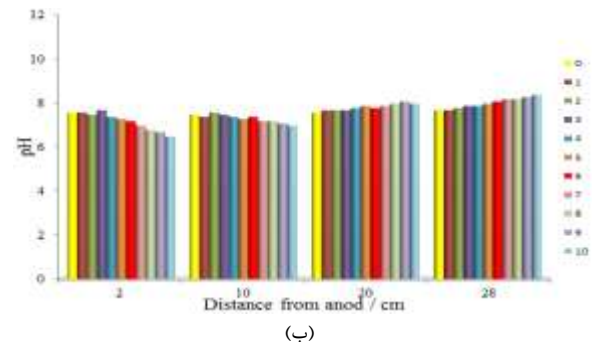
شکل ۶- تغییرات جریان، نمودار آبی بدون کنترل pH و نمودار قرمز با کنترل pH

پس از آنالیز خاک مورد آزمایش، میزان حذف گازوئیل از خاک در غیاب ماده فعال سطحی، بسیار کم و در حدود ۳٪ تا ۷٪ به دست آمده است. شکل (۷) بازدهی حذف الکتروکینتیک همراه با و بدون کنترل pH را در طول زمان نشان می‌دهد. این نتیجه بیانگر آن است که مقدار خیلی کمی از گازوئیل با روش فقط الکتروکینتیک از خاک خارج می‌شود.

فرآیند الکتروکینتیک بدون کنترل pH انجام می‌گردد، میزان pH بعد از ده روز در فاصله ۲ سانتی‌متری از آند برابر ۴/۱ بوده و این در شرایطی است که در فاصله ۲۸ سانتی‌متری از آند این مقدار برابر ۱۱/۵ بوده است. در مجاورت آند به علت کاهش شدید pH جریان الکترواسمز به صورت معکوس اتفاق افتاده و کارایی حذف گازوئیل از خاک را کاهش می‌دهد. اما با کنترل pH، از تغییرات pH در طول ستون خاک جلوگیری شده است و در آند تا حد زیادی از وقوع جریان الکترواسمز به صورت معکوس، جلوگیری می‌شود و در کاتد نیز تشکیل لایه متراکم به تعویق خواهد افتاد و در نهایت کارایی حذف گازوئیل در طول ستون خاک نسبت به آزمایش اول، بالاتر خواهد بود. شکل (۵-ب) تغییرات pH در خاک در فواصل مختلف از آند همراه با کنترل pH را نشان می‌دهد، بر طبق این شکل مقدار pH بعد از ده روز در فاصله ۲ سانتی‌متری از آند برابر ۶/۵ بوده و این در حالی است که در فاصله ۲۸ سانتی‌متری از آند میزان pH برابر ۸/۴ می‌باشد.



(الف)



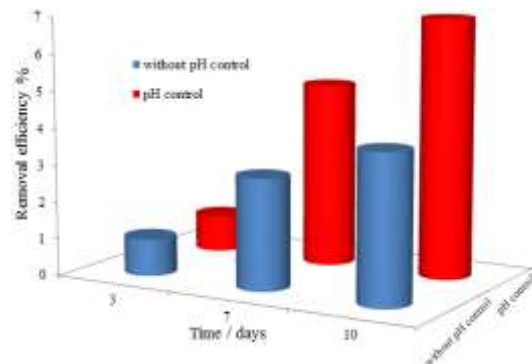
(ب)

شکل ۵-الف) تغییرات pH در خاک در فواصل مختلف از آند بدون کنترل pH از روز اول تا روز دهم، ب) تغییرات pH در خاک در فواصل مختلف از آند همراه با کنترل pH از روز اول تا روز دهم

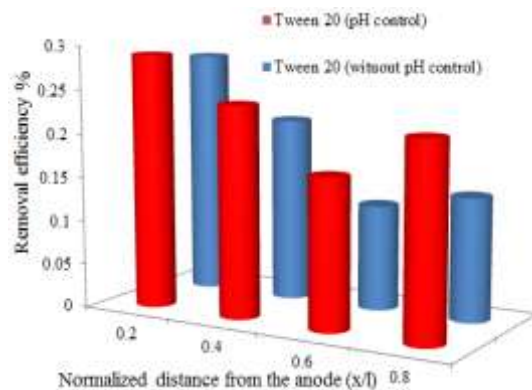
در طول آزمایش ولتاژ به کار رفته تقریباً ثابت نگه داشته شده ولی اختلاف پتانسیل در نقاط مختلف خاک به‌طور قابل توجهی متغیر و تا حدود زیادی غیرقابل کنترل بوده است. علت این تغییرات،



شده بودند همراه جریان منفذی از خاک خارج خواهند شد. با گذشت زمان و تجمع ترکیبات در مجاور کاتد و فشرده شدن این ناحیه، از شدت جریان الکتریکی کاسته شده و لذا سرعت جریان الکترواسمز نیز کاهش می‌یابد. در نتیجه تجمع گازوئیل در این ناحیه نیز بیشتر می‌شود. در این حالت کارایی جابه‌جایی گازوئیل در مجاورت آند بالاتر از بقیه نقاط خواهد بود اما با پیشروی به سمت کاتد، مقدار خروج این آلاینده‌ها کمتر شده و در ناحیه مجاور کاتد، حداقل حذف به دست می‌آید. همان‌طور که در شکل (۸) دیده می‌شود در نزدیکی آند تفاوت در بازدهی حذف با و بدون کنترل pH کمتر است اما این تفاوت در بازدهی در مجاورت کاتد بیشتر دیده می‌شود. در شکل (۹) تغییرات جریان الکترواسمز در طول زمان نشان داده شده است نتایج نشان می‌دهد که جریان الکترواسمز در ابتدای کار پایین است و با گذشت زمان افزایش یافته و پس از مدتی تغییرات کم می‌گردد. علت این امر اشباع نبودن خاک در ابتدای آزمایش‌ها است. همان‌طور که در شکل (۹) مشاهده می‌شود، بدون کنترل pH، جریان آب منفذی پس از حدود ۵ روز به حداکثر می‌رسد و در ادامه به دلیل بالا رفتن pH در منطقه نزدیکی کاتد، تشکیل رسوبات فلزی در شرایط قلیایی و مسدود شدن این منطقه، تغییرات جریان عبوری کم می‌شود. همان‌طور که مشخص است با کنترل pH، جریان الکترواسمز افزایش می‌یابد و به افزایش بازدهی الکتروکینتیک کمک می‌کند. اصلاح الکتروکینتیک همراه با کنترل pH در خاک‌های آلوده نشان می‌دهد که با توجه به کنترل pH و جلوگیری از تغییرات شدید آن در طول ستون خاک، درصد قابل توجهی از گازوئیل همراه با جریان الکترواسمز از ستون خاک خارج می‌شود. همچنین در این حالت با توجه به کنترل pH در الکترولیت‌ها و جلوگیری از افزایش آن در مجاورت کاتد از رسوب آلاینده‌ها در این ناحیه تا حد زیادی جلوگیری شده و کارایی حذف گازوئیل در مجاورت کاتد، نسبت به حالت بدون کنترل pH افزایش می‌یابد. بر طبق شکل (۹)، میزان جریان الکترواسمز تولید شده در حضور ماده فعال سطحی تا حدی افزایش داشته است و جذب شونده بر روی ذرات خاک، جذب یون-های متحرک را کاهش می‌دهد و با آزاد شدن یون‌ها، رسوب کمتری شکل می‌گیرد. از طرف دیگر ماده فعال سطحی نفوذپذیری خاک را بهبود می‌بخشد، (Farahbakhsh, ۲۰۱۷) و در نتیجه محلول منفذی با سرعت بیشتری حرکت می‌کند. به بیان دیگر با توجه به این که مواد هیدروکربنی باعث کاهش نفوذپذیری خاک می‌گردد و ماده فعال سطحی نقش پاکسازی مواد هیدروکربنی را دارد و از روی سطح خاک جذب می‌شود باعث افزایش سرعت حرکت محلول‌ها و آب گشته و نفوذپذیری را افزایش می‌دهد (Hanaei و همکاران، ۲۰۲۱).



شکل ۷- تغییرات بازدهی حذف دیزل در غیاب عامل فعال سطحی، نمودار آبی بدون کنترل pH و نمودار قرمز همراه با کنترل pH

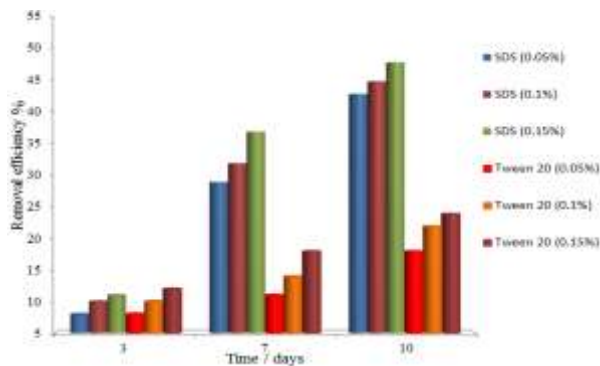


شکل ۸- بازدهی حذف الکتروکینتیک، نمودار قرمز با کنترل pH و نمودار آبی بدون کنترل pH در حضور ماده فعال سطحی Tween 20 در فواصل مختلف از آند

این نکته نشان‌دهنده عدم تمایل انحلال گازوئیل در آب و توان کم فرآیند الکترواسمز در جابه‌جایی و حذف این ماده است. در ادامه در سایر آزمایش‌ها از مواد فعال سطحی مختلف استفاده شده است. شکل (۸) بازدهی حذف الکتروکینتیک همراه با و بدون کنترل pH در حضور ماده فعال سطحی Tween 20 و در فواصل مختلف از آند را نشان می‌دهد. که در نمودار این شکل محور افقی بیانگر فاصله عادی شده از آند بوده است، در صورتی که pH کنترل نشود با توجه به شرایط الکترولیز در الکترولیت‌ها و عدم کنترل pH، غلظت یون  $H^+$  در آند افزایش یافته و pH به شدت اسیدی می‌شود. همچنین در مجاورت کاتد، به علت تولید یون‌های هیدروکسیل، pH به شدت افزایش می‌یابد. از آنجا که سرعت جریان الکترواسمز تابع تغییرات pH می‌باشد، لذا در آغاز فرآیند الکتروکینتیک، با توجه به این که شدت جریان الکتریکی نسبتاً بالا است در نتیجه سرعت جریان الکترواسمز نیز بالا بوده و آن مقدار از آلاینده‌ها که وارد فاز محلول



ماده فعال، افزایش قابل توجهی را نشان می‌دهد. افزایش بازدهی حذف با افزایش غلظت مواد فعال سطحی، نشان‌دهنده تأثیر مستقیم مواد فعال در جداسازی گازوئیل از خاک و جابه‌جایی آن در فشار اسمزی الکترولیت است. همان‌طور که مشخص است در مقایسه بازدارنده‌های مختلف SDS بازدهی حذف بیشتری را نشان می‌دهد. مواد فعال سطحی طی دو مکانیسم اصلی به حرکت در آوردن ذرات هیدروکربنی (تحریک نفت) و انحلال ترکیبات هیدروکربنی در آب باعث بهبود حذف ترکیبات هیدروکربنی از خاک می‌شوند. در مکانیسم تحریک، پدیده‌های کاهش کشش سطحی و کشش بین سطحی، کاهش نیروی موئینگی، رطوبت‌پذیری و افزایش زاویه تماس به‌وجود می‌آیند. در حالی که پدیده حلالیت، در اثر توزیع و انتقال ذرات آلاینده به داخل بخش آب گریز مواد فعال سطحی انجام می‌شود. از جمله عوامل مطلوب مواد فعال می‌توان بهبود انحلال‌پذیری، کاهش کشش سطحی، توانایی مرطوب‌کنندگی و کف‌سازی را نام برد. توانایی بیشتر SDS در حذف گازوئیل را می‌توان به ساختار نسبتاً کوچکتر آن ربط داد که در انحلال گازوئیل مؤثر است و سرعت مهاجرت بیشتری دارد.

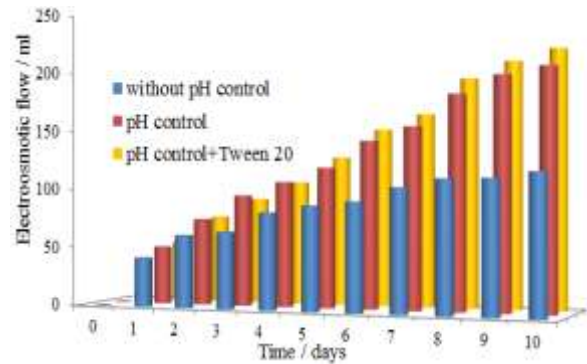


شکل ۱۱- تغییرات بازدهی حذف دیزل در حضور غلظت‌های مختلف مواد فعال سطحی بر حسب درصد مختلف همراه با کنترل pH در زمان‌های مختلف آزمایش

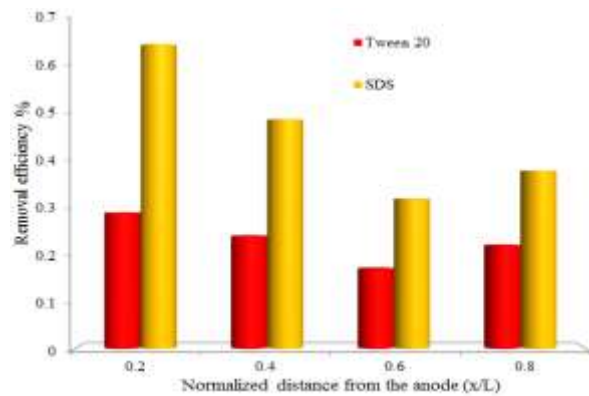
جدول ۳- مقایسه میزان غلظت انواع ماده فعال سطحی در

آزمایش الکتروکینتیک

فرآیند الکتروکینتیک با مقایسه ماده فعال سطحی		
نوع ماده فعال سطحی		
غلظت ماده فعال سطحی %		
۰/۱۵	۰/۱	۰/۰۵
پاکسازی %		
۴۹	۴۵	۴۳
۲۴	۲۲	۱۸
SDS		
Tween 20		



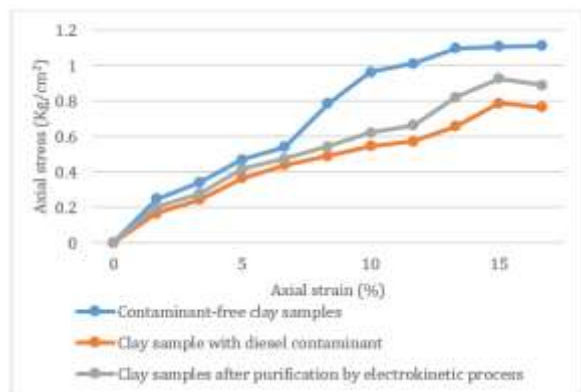
شکل ۹- تغییرات جریان الکترواسمز در طول زمان در حضور و غیاب کنترل pH و همچنین ماده فعال سطحی Tween 20



شکل ۱۰- تغییرات بازدهی حذف دیزل در حضور ۰/۱۵ درصد مواد فعال سطحی مختلف همراه با کنترل pH بعد از ۱۰ روز آزمایش در فواصل مختلف از آند

در شکل (۱۰) تغییرات بازدهی حذف دیزل همراه با کنترل pH بعد از ۱۰ روز آزمایش در فواصل مختلف از آند در حضور مواد فعال سطحی مختلف نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است بیشترین بازدهی حذف در کنار آند به‌دست می‌آید اما در فواصل نزدیک کاتد، تا حدی به‌دلیل تجمع گازوئیل، بازدهی کم می‌شود. برطبق این شکل، رفتار سورفکتانت‌ها در حذف گازوئیل در فواصل مختلف از آند تقریباً یکسان است اما ماده فعال سطحی SDS عملکرد حذف قوی‌تری را نشان می‌دهند. شکل (۱۱) تغییرات بازدهی حذف دیزل همراه با کنترل pH را در طول ۱۰ روز الکتروکینتیک همراه با مواد فعال سطحی SDS و Tween 20 نشان می‌دهد. بر طبق این شکل با افزایش زمان تقریباً با شیب خطی میزان حذف گازوئیل افزایش می‌یابد. این رفتار برای بازدارنده‌های مختلف یکسان است و نشان‌دهنده حرکت و حذف آرام گازوئیل از خاک است. بازدهی حذف در حضور تمامی مواد فعال سطحی استفاده شده با افزایش غلظت

این نمونه‌ها می‌باشد. شکل (۱۲) مقایسه میزان مقاومت فشاری محصور نشده خاک رس را در نتایج آزمایش تک‌محوری در حالت‌های مختلف نمونه خاک را نشان می‌دهد، همچنین به منظور مقایسه مقادیر تنش، کرنش و ضریب ارتجاعی نمونه‌ها، میزان بیشینه هر کدام از نمونه‌ها در جدول (۴) قابل ملاحظه می‌باشد، که نتایج بیانگر آن است که با حذف آلاینده میزان سختی نمونه افزایشی به میزان  $7/65 \text{ Kg/cm}^2$  داشته است.



شکل ۱۲- مقایسه مقادیر مقاومت فشاری محصور نشده به دست آمده از نتایج آزمایش تک‌محوری بر روی نمونه خاک رس قبل و بعد از حذف آلاینده گازوئیلی

در تحقیق مشابه انجام شده قبلی با استفاده از فرآیند الکتروکینتیک به همراه ماده فعال سطحی CA-Igepal ۷۲۰ جهت حذف مواد هیدروکربنی از خاک راندمان حذف به میزان ۳۸ درصد مشاهده گردیده است که در تحقیق حاضر راندمان پاکسازی حدود ۱۱ درصد بهبود یافته است (Khatraei, ۲۰۱۶)، در این شرایط پس از انجام فرآیند الکتروکینتیک به منظور تعیین پارامترهای مقاومتی خاک مانند مقاومت فشاری خاک رس با استفاده از آزمایش تک-محوری محصور نشده خاک بر روی نمونه خاک رس طبیعی و نمونه خاک رس قبل و بعد از فرآیند الکتروکینتیک پارامترهای ژئوتکنیکی خاک ارزیابی شدند (شکل (۱۲)) که در حالت اول نمونه خاک رس در شرایط طبیعی مورد ارزیابی قرار گرفته است و در این شرایط مقاومت فشاری نهایی خاک برابر  $1/111 \text{ kg/cm}^2$  حاصل گردیده است سپس خاک رس آلوده به ده گرم گازوئیل با رطوبت ۱۵٪ مورد آزمایش تک‌محوری قرار گرفته است، در این حالت مقاومت فشاری  $0/788 \text{ kg/cm}^2$  به دست آمده است پس از انجام فرآیند الکتروکینتیک و میزان حذف حدود ۴۹٪ گازوئیل، مجدد بر روی نمونه خاک رس پاکسازی شده تست تک‌محوری انجام گرفته است و مقاومت فشاری  $0/926 \text{ kg/cm}^2$  به دست آمده است. بر اساس شکل (۱۲) با توجه به شکست نمونه‌های خاک رس آلوده به گازوئیل و نمونه پاکسازی شده در کرنش بیشتر از ۱۵ درصد در آزمایش تک‌محوری، میزان مقاومت فشاری محصور نشده نمونه‌ها در انتهای فرآیند تک‌محوری قدری کاهش یافته است که علت این کاهش حضور درصدی گازوئیل در

جدول ۴- مقایسه نتایج میزان تنش، کرنش و مدول الاستیسیته نمونه‌ها در شرایط مختلف

نمونه خاک رس پس از پاکسازی با فرآیند الکتروکینتیک			نمونه خاک رس با آلاینده گازوئیلی			نمونه خاک رس بدون آلاینده		
ضریب ارتجاعی $\text{Kg/cm}^2$	کرنش cm	تنش $\text{Kg/cm}^2$	ضریب ارتجاعی $\text{Kg/cm}^2$	کرنش cm	تنش $\text{Kg/cm}^2$	ضریب ارتجاعی $\text{Kg/cm}^2$	کرنش cm	تنش $\text{Kg/cm}^2$
۷/۶۵	۰/۱۲۱۶۲	۰/۹۲۶	۶/۸۵	۰/۱۱۵۳۸	۰/۷۸۸	۸/۹۴	۰/۱۳۵۱۴	۱/۱۱۱

راندمان پاکسازی آلاینده گازوئیلی با کاربرد ماده فعال سطحی SDS با ۰/۱۵ درصد وزنی به میزان ۴۹ درصد به دست می‌آید، در حالی که با کاربرد ماده فعال سطحی Tween 20 با درصد وزنی ۰/۰۵ کمترین میزان پاکسازی به میزان ۱۸ درصد مشاهده می‌شود. در این تحقیق کنترل pH در فرآیند حذف مورد ارزیابی قرار گرفته است. کنترل pH برای بالا بردن کارایی پالایش آلاینده‌های آلی از خاک با فرآیند الکتروکینتیک بسیار حائز اهمیت ارزیابی شده است. با کنترل pH در الکتروکینتیک تا حد زیادی کارایی پاکسازی هیدروکربن‌ها خصوصاً گازوئیل از خاک رس افزایش یافته است. از

#### ۴- نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر، بهبود روش الکتروکینتیک با کاربرد مواد فعال سطحی SDS و Tween 20 به جهت پالایش خاک رس آلوده به گازوئیل ارزیابی شده است. به علت حلالیت کم گازوئیل در الکترولیت آب، این آلاینده بیشتر جذب سطح ذرات خاک می‌شود و از طریق جریان الکترواسمز از محیط خاک خارج نمی‌شود. از طرفی، کاربرد مواد فعال سطحی می‌تواند با کاهش نیروی کشش سطحی میزان ورود آلاینده را به محلول الکترولیت و جریان الکترواسمز را افزایش دهد. نتایج حاکی از آن است که بیشترین

- Chemistry, Faculty of Chemistry, University of Sciences and Technology Houari Boumediene, Algeria, Environmental Engineering Research, 2022, 27 (4), 210167.  
<https://doi.org/10.4491/eer.2021.167>
- Cameselle C, "Enhanced electrokinetic remediation for the removal of heavy metals from contaminated soils", Department of Chemical Engineering, BiotechIA, University of Vigo, 36310 Vigo, Spain, Applied. Sciences. 2021, 11, 179.  
<https://doi.org/10.3390/app11041799>
- Eykholt GR, Daniel DE, "Impact of system chemistry on electroosmosis in contaminated soil", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1994, 120 (5), 797-815.  
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)07339410\(1994\)120:5\(797\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)07339410(1994)120:5(797))
- Farahbakhsh M, "The effect of PH on electrokinetic modification of a microstructure contaminated with crude oil", Iranian Soil and Water Research, Volume 49, Number 3, August and September 2017, 483-491.  
<https://doi.org/10.22059/ijswr.2017.38715.666902>
- Gidudu B, "Application of biosurfactants and pulsating electrode configurations as potential enhancers for electrokinetic remediation of petrochemical contaminated soil", Department of Chemical Engineering, University of Pretori, 13 July 2020.  
<https://doi.org/10.3390/su12145613>
- Hamidi A, Karimi AH, "Effect of phytoremediation on compression characteristics of silty clayey sand contaminated with crude oil", International Journal of Civil Engineering, 2021, 19 (8), 973-995.  
<https://doi.org/10.1080/15320383.2021.1900065>
- Hanaei F, Sarmadi MS, Rezaee M, Rahmani A, "Experimental investigation of the effects of gas oil and benzene on the geotechnical properties of sandy soils", Innovative Infrastructure Solutions, 2021, 6 (2), 1-8. <https://doi.org/10.31272/jeasd.27.3.1>
- Hosseini A, Hajiani Boushehrian A, "Laboratory and numerical study of the behavior of circular footing resting on sandy soils contaminated with oil under cyclic loading", Scientia Iranica, 2019, 26 (6), 3219-3232. <https://doi.org/10.24200/sci.2018.5427.1267>
- Joukar A, Boushehrian AH, "Experimental study of strip footings rested on kerosene oil-and gas oil-contaminated sand slopes", Iranian Journal of Science and Technology-Transactions of Civil Engineering, 2019, 44 (1), 209-217.  
<https://doi.org/10.22107/jpg.2023.417661.1210>
- Khataei B, "Removal of crude oil from soil using electrokinetic method improved with surfactants", 2016, 33-2 (1-2), 107-114.  
<https://doi.org/10.24200/j30.2017.4544>
- Lambert P, Fingas M, Goldthorp M, "An Evaluation of field total petroleum hydrocarbon-contaminated soil by composting in biopiles", Environment Pollution. 2001, 409-411.  
<https://doi.org/10.22059/ijswr.2017.38715.666902>
- طرفی با استفاده از اسیدنیتريك در محفظه كاتد و جلوگیری از تغییرات pH در این ناحیه تا حد زیادی از رسوب آلاینده‌ها و تشکیل لایه متراکم جلوگیری می‌شود. همچنین در آنولیت با استفاده از محلول سود تا حد زیادی از کاهش pH و عکس شدن جریان الکترواسمز در این ناحیه جلوگیری و در نتیجه مقدار جابه‌جایی و حذف گازوئیل در مجاور آند، بیشتر از سایر نواحی ستون خاک به‌دست آمده است. در ادامه تحقیق با مشاهده نتایج آزمایش تک-محوری به‌جهت تعیین پارامترهای ژئوتکنیکی بر روی نمونه خاک رس و نمونه خاک رس آلوده به گازوئیل قبل از فرآیند الکتروکینتیک و نمونه خاک پس از پاکسازی نشان می‌دهد میزان پارامترهای مقاومتی خاک رس مانند مقاومت فشاری محصور نشده خاک رس بعد از پاکسازی حدود ۱۲ درصد افزایش می‌یابد و حدود ۸۳ درصد مقاومت فشاری محصور نشده نمونه خاک در شرایط بدون آلاینده می‌رسد.
- ۵- مراجع**
- Acar YB, Alshwabkeh AN, "Principles of electrokinetic remediation", Environmental Science and Technology, 1993, 27 (13), 2638-2647.  
<https://doi.org/10.1021/es00049a002>
- ASTM D 2166, Standard Test Method for The uniaxial test, 2010. <https://doi.org/10.1520/D2166-06>
- ASTM D 422, Standard Test Method for Hydrometric test, 2007. <https://doi.org/10.1520/D0422-63R07>
- ASTM D 4318-93, Standard Test Method for Atterberg test, 2020. <https://doi.org/10.1520/D4318-17>
- ASTM D 698, Standard Test Method for Compaction test, 2000. <https://doi.org/10.1520/D0698-12>
- Bahemmat M, Farahbakhsh M, Kianirad M, "Electrokinetically enhanced remediation of contaminated soil with Ni by use of humic acid and fulvic acid", In: Proceedings of 12th Iranian Soil Science Congress, 3-8 September, Tabriz University, Tabriz, Iran, 2011.  
<https://doi.org/10.22059/ijswr.2012.24353>
- Barba S, Villaseñor J, Rodrigo MA, Cañizares P, "Effect of the polarity reversal frequency in the electrokinetic-biological remediation of oxyfluorfen polluted soil", Chemosphere, 2017.  
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.03.002>
- Berg MS, Webster MT, "Release of petroleum hydrocarbon from bioremediated soil", Journal of Soil Contamination, 1998, 7, 675-695.  
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090025X\(2001\)5:2\(78\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090025X(2001)5:2(78))
- Boulakradeche OM, "Enhancement of electrokinetic remediation of lead and copper contaminated soil by combination of multiple modified electrolyte conditioning techniques", School Laboratory of Hydrometallurgy and Molecular Inorganic

- bioremediation technologies for PHs", *Journal of Environmental Sciences*, 2020, 88, 31-45. <https://10.1016/j.jes.2019.08.010>
- Schwab AP, SU J, Wetzels S, Pekarek S, Banks MK, "Extraction of petroleum hydrocarbons from soil by mechanical shaking", *Environmental Science and Technology*, 1999, 33:1940-1945. <https://doi.org/10.1021/es9809758>
- Seyed Razavi SN, Khoda Dadi A, Ganji dost H, "Removal of crude oil from soil by biosurfactant treatment of soil contaminated with crude-oil using biosurfactants", 2011, 37 (60), 107-116. <https://doi.org/10.5897/JPGE11.044>
- Shapiro AP, Probststein RF, "Removal of contaminant from saturated clay by electroosmosis", *Environmental Science and Technology*, 1993, 27 (2), 283-291. <http://dx.doi.org/10.1021/es00039a007>
- Sun Y, "In situ electrokinetic (EK) remediation of the total and plant available cadmium (Cd) in paddy agricultural soil using low voltage gradients at pilot and full scales", *Faculty of Biological and Environmental Sciences, Ecosystems and Environment Research Programme, University of Helsinki, Niemenkatu 73, FI-15140 Lahti, Finland, Science of the Total Environment*, 785, 2021, 147277. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147277>
- USEPA, "A resource for MGP site characterization and remediation", EPA/542-R-00-005, Washington, DC, 2000. [https://www.epa.gov/sites/default/files/201508/documents/mgp\\_chap1-4a.pdf](https://www.epa.gov/sites/default/files/201508/documents/mgp_chap1-4a.pdf)
- Ukleja J, "Stabilization of landslides sliding layer using electrokinetic phenomena and vacuum treatment", *Faculty of Civil Engineering and Architecture, Geosciences*, 25 July 2020. <https://doi.org/10.3390/geosciences10080284>
- Vaishnavi J, "Biosurfactant mediated bioelectrokinetic remediation of diesel contaminated environment", *Chemosphere*, 2021, 264 (1), 128377. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128377>
- Vocciantè M, "Sustainability in electrokinetic remediation processes: a critical analysis", *Department of Chemistry and Industrial Chemistry, University of Genova, 16146 Genova, Italy, Sustainability* 14 January 2021. <https://doi.org/10.3390/su13020770>
- Yongsong Ma, Xi Li Hongmin Mao, Bing Wang B, Peijie Wang P, "Remediation of hydrocarbon-heavy metal co-contaminated soil by electrokinetics combined with biostimulation", *Chemical Engineering Journal*, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.07.131>
- Zhou JL, "Effective remediation of heavy metals in contaminated soil by electrokinetic technology incorporating reactive filter media", *Science of The Total Environment*, 2021, 794, 148668. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148668>
- Lisbeth M, Thomas H, Pernille E, Jensen Gunvor M, "Electrokinetics applied in remediation of subsurface soil contaminated with chlorinated ethenes A review", *Chemosphere* 235, 2019, 113-125. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.06.075>
- López-Vizcaíno R, "Calcite buffer effects in electrokinetic remediation of clopyralid-polluted soils", *et al Electrochimica Acta*, 225, 2017, 93-104. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.11.034>
- Nasiri A, "The effect of time and ph on improving the efficiency of the electrokinetic method for remediation of the soil contaminated by chromium", M.Sc Student, Dept. of Mining, Faculty of Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, *Journal of Mineral Resources Engineering*, 21 Apr 2019. <https://doi.org/10.30479/jmre.2019.9945.1213>
- Pamukcu S, Wittle JK, "Electrokinetically enhanced in situ soil decontamination. In, D. L. Wise and D. J. Trantolo (Eds.) *Remediation of Hazardous Waste Contaminated Soils*", (p.p. 245-298), Marcel Dekker, New York, 1994. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)07339410\(1996\)122:8\(666\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)07339410(1996)122:8(666))
- Pamukcu S, Weeks A, Wittle JK. "Electrochemical separation and stabilization of selected inorganic species in porous media", *Journal of Hazardous Materials*, 1997, 55, 305-318, <http://dx.doi.org/10.1201/9780203740880-13>
- Reddy KR, Saichek RE, "Enhanced electrokinetic removal of phenanthrene from clay soil by periodic electric potential application", *Journal of Environmental Science and Health part A Toxic/Hazardous Substances & Environmental Engineering*, 2004, 39 (5), 1189-1212. <http://doi.org/10.1081/ESE-120030326>
- Reddy KR, Saichek RE, "Effect of soil type on Electrokinetic removal of phenanthrene using surfactants and cosolvents", *Journal of Environmental Engineering*, 2003, 129 (4), 336-346. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)07339372\(2003\)129:4\(336\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)07339372(2003)129:4(336))
- Reilley KA, Banks MK, Schwab AP, "Organic chemicals in the environment: dissipation of polycyclic aromatic hydrocarbons in the rhizosphere", *Journal Environmental Quality*, 1996, 25, 212-219. <https://doi.org/10.2134/jeq1996.0047242500250020002x>
- Saichek RE, Reddy KR, "Electrokinetically enhanced remediation of hydrophobic organic compounds in soils: A review", *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2005, 35 (2), 115-119. <http://dx.doi.org/10.1080/10643380590900237>
- Saichek RE, Reddy KR, "Effect of Ph control at the anode for the electrokinetic removal of phenanthrene from kaolin soil", *Chemosphere*, 2003, 51, 273-287. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.19437870.0000203](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.19437870.0000203)
- Saini A, Bekele DN, Chadalavada S, Fang C, Naidu R, "A review of electrokinetically enhanced

## EXTENDED ABSTRACT

# Evaluation of Efficiency of SDS and Tween 20 Surfactants on Refining of Diesel Contaminated Clay Using Electrokinetic Process and Determination of Compressive Strength of Clay after Removal of Contaminant

Ali Taherian<sup>a</sup>, Maryam Yazdi<sup>a\*</sup>, Iman Danaei<sup>b</sup>, AmirAli zad<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Department of Civil Engineering, Faculty of Civil and Earth Resources Engineering, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

<sup>b</sup> Department of Technical Inspection Engineering, Abadan Faculty of Petroleum, University of Petroleum Industry, Abadan, Iran

**Received:** 06 June 2022; **Review:** 11 February 2023; **Accepted:** 13 February 2023

---

### Keywords:

Electrokinetics; Clay, diesel, pH control, Surfactant, Compressive strength, Electroosmosis, Geotechnical.

---

## 1. Introduction

In the present era, environmental pollution is a global crisis, increasing population growth and urban development, industrial expansion and unlimited use of natural resources, are among the increasingly important factors of pollutants (Reilley, 1996). Vocciante (2021) found in the study of stability in electrokinetic modification processes that the electrokinetic method is suitable for cleaning inorganic pollutants from clay. Zhou (2021) found that using the electrokinetic method is effective in removing heavy metals zinc, cadmium, and manganese from the soil and leads to the removal of about 72% of the pollutant from the soil sample. Vaishnavi (2021) in the study of bio-electrokinetic modification of diesel-contaminated environment with biosurfactant found that this method is an effective method for cleaning and cleaning soils contaminated with diesel hydrocarbons. Hanaei et al. (2021) found that the direct shear test showed that the adhesion of the soil sample increased and the friction angle decreased after oil contamination, and the permeability test showed that the contamination of the soil sample decreased the permeability of sandy soil and this change It is a function of the amount of oil and the viscosity of oils.

## 2. Methodology

According to the studies performed in the field of cleaning of soils contaminated with oil, SDS and Tween 20 surfactants were selected. In the present study, an electrokinetic cell in the shape of a soil box made of Plexiglas with dimensions of 50×15×50cm according to Fig. 1 has been used. In this system, the middle chamber is 30 cm long, where the soil is located and the chambers on the both sides are for pouring electrolyte solutions. The electrolyte chamber and the soil location are separated by plastic mesh plates. The lattice of the plates allows the flow of electro-osmosis to pass during the test. Due to the movement of electrolyte solutions and change in height due to electroosmotic current and prevent reverse electroosmotic current, the electrolyte in the anode and cathode chambers (to prevent the effect of hydraulic gradient on electrical migration and electroosmotic current) is continuously controlled by the pump.

---

\* Corresponding Author

E-mail addresses: ali.taherian1364@gmail.com (Ali Taherian), mar.yazdi@iauctb.ac.ir (Maryam Yazdi), imandanaee@gmail.com (Iman Danaei), a.zad@iauctb.ac.ir (Amir Ali Zad).

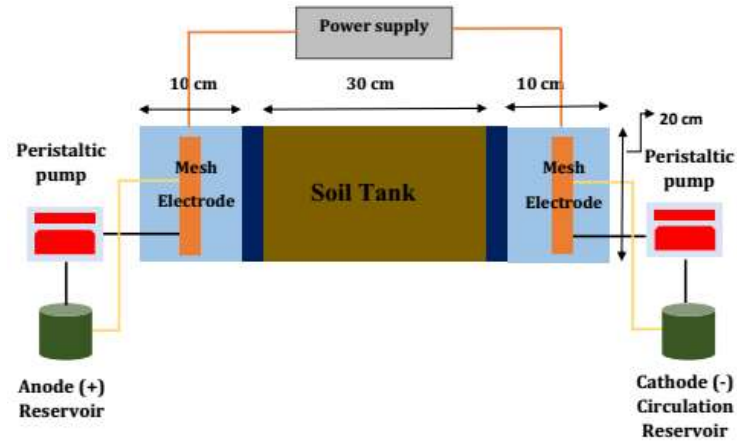
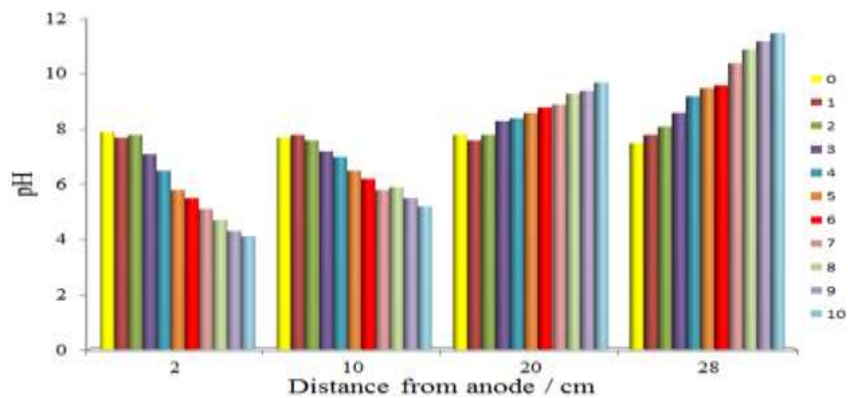


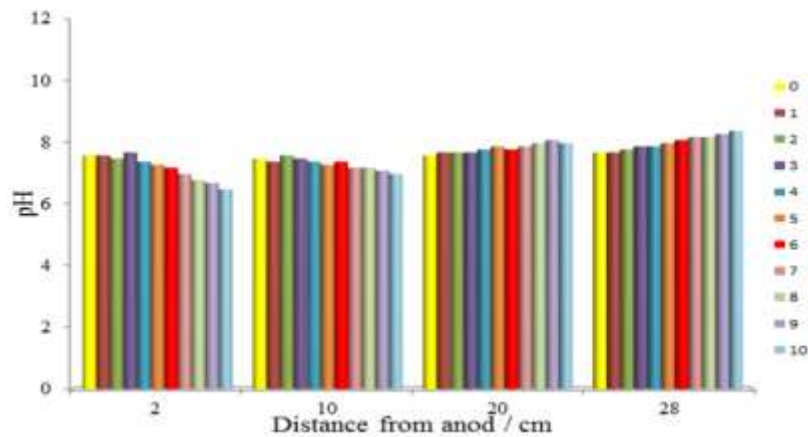
Fig. 1. Electrokinetic process executive system

### 3. Results and discussion

The electrokinetic process in the absence of pH control shows very significant changes in this parameter in the soil. With increasing concentrations of  $H^+$  and  $OH^-$  in the anolite and catholite, respectively, an acidic front moves from the anode side and a base front moves from the cathode side into the soil. Due to the fact that the proton ion mobility is much higher than the hydroxyl ion mobility, so the acidic front will advance faster than the base front along the soil column and in the area near the cathode, these two fronts will meet.



(a)



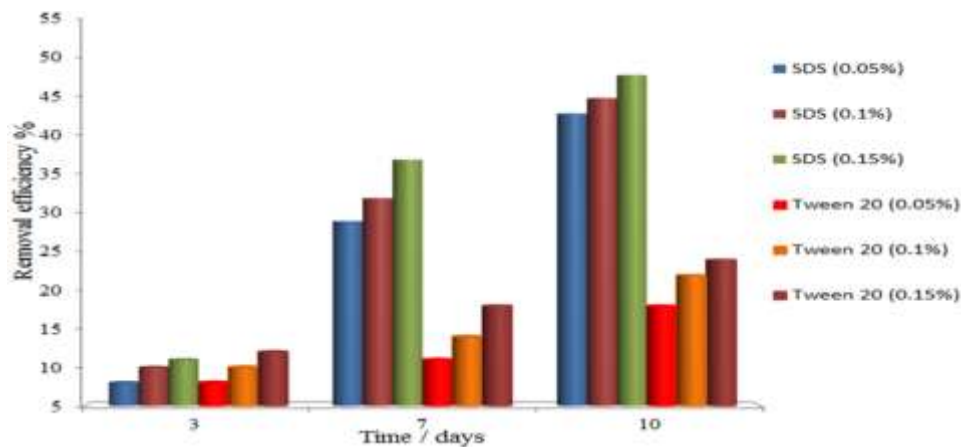
(b)

Fig. 2. a) Soil pH changes at different distances from the anode without pH control from the first to the tenth day, b) Soil pH changes at different distances from the anode along with pH control from the first to the tenth day

In the vicinity of the cathode, the pH value increases sharply and a dense layer is formed by the deposition of metals and other contaminants in this area. This layer reduces the rate of the electro-osmotic current moving towards the cathode, reducing the efficiency of moving the diesel along the soil column (Fig. 2-a).

Also in the vicinity of the anode, due to the sharp decrease in pH, the electroosmotic current occurs in reverse and reduces the efficiency of removing diesel from the soil. But by controlling the pH, pH changes along the soil column are prevented. Therefore, in the anode, the occurrence of reverse electro-osmotic current is largely prevented, and in the cathode, the formation of a dense layer will be delayed, and ultimately the efficiency of diesel removal along the soil column will be higher than the first experiment (Fig. 2-b).

As it turns out, compared to different SDS inhibitors, it shows higher removal efficiency. Surface active substances improve the removal of hydrocarbon compounds from the soil through two main mechanisms: the movement of hydrocarbon particles (oil stimulation) and the dissolution of hydrocarbon compounds in water. In the excitation mechanism, the phenomena of reduction of surface tension and interfacial tension, reduction of capillary force, moisture content and increase of contact angle occur. SDS's greater ability to remove diesel can be attributed to its relatively smaller structure, which is effective in dissolving diesel and has a faster migration rate. Fig. (3) shows the changes in diesel removal efficiency with pH control during 10 days of Electrokinetic with SDS and Tween 20 surfactants. According to this figure, with the increase of time, the amount of diesel removal increases almost linearly. This behavior is the same for different inhibitors and indicates the slow movement and removal of diesel from the soil. Removal efficiency in all the surface active materials used with the increase of the active material shows a significant increase in attention.



**Fig. 3.** Changes in diesel removal efficiency in the presence of different concentrations of surfactants in different percentages with pH control at different test times

#### 4. Conclusions

In the present study, the improvement of electrokinetic method using SDS and Tween 20 surfactants for refining diesel contaminated clay has been evaluated. The results show that the highest cleaning efficiency of diesel pollutant is obtained by applying SDS surfactant with 0.15 wt% to 49%, while with application of Tween 20 surfactant with 0.05 wt% the lowest Clearance of 18% is observed. Continuing the research by observing the results of uniaxial experiment to determine geotechnical parameters on clay samples and diesel-contaminated clay samples before electrokinetic process and soil samples after cleaning shows the amount of clay resistance parameters such as unrestricted compressive strength After cleaning, the clay increases by about 12% and reaches about 83% of the unenclosed compressive strength of the soil sample in contaminant-free conditions.

#### 5. References

- Hanaei F, Sarmadi MS, Rezaee M, Rahmani A, "Experimental investigation of the effects of gas oil and benzene on the geotechnical properties of sandy soils", *Innovative Infrastructure Solutions*, 2021, 6 (2), 1-8. <https://doi.org/10.31272/jeasd.27.3.1>
- Reilly KA, Banks MK, Schwab AP, "Organic chemicals in the environment: dissipation of polycyclic aromatic hydrocarbons in the rhizosphere", *Journal Environmental Quality*, 1996, 25, 212-219. <https://doi.org/10.2134/jeq1996.00472425002500020002x>
- Vaishnavi J, "Biosurfactant mediated bioelectrokinetic remediation of diesel contaminated environment", *Chemosphere*, 2021, 264 (1), 128377. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128377>



Vocciante M, "Sustainability in ElectroKinetic Remediation Processes: A Critical Analysis", Department of Chemistry and Industrial Chemistry, University of Genova, 16146 Genova, Italy, Sustainability 14 January 2021. <https://doi.org/10.3390/su13020770>

Zhou JL, "Effective remediation of heavy metals in contaminated soil by electrokinetic technology incorporating reactive filter media", Science of The Total Environment, 2021, 794, 148668. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148668>