



University Of Qom



Effect of Surfactant on Cleaning of Diesel Contaminated Clay Soil Using Electrokinetic Process and Determining the Uniaxial Resistance of Clay after Cleaning

Ali Taherian¹, Maryam Yazdi² , Iman Danaei³, Amirali zad⁴

1. PhD Student in Civil Engineering, Department of Civil Engineering, Faculty of Civil and Earth Resources Engineering, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. E-mail: ali.taherian1364@gmail.com
2. Corresponding author, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Civil and Earth Resources Engineering, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. E-mail: mar.yazdi@iauctb.ac.ir
3. Associate Professor, Department of Technical Inspection Engineering, Abadan Faculty of Petroleum, University of Petroleum Industry, Abadan, Iran. E-mail: imandanaee@gmail.com
4. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Civil and Earth Resources Engineering, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. E-mail: a.zad@iauctb.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 07 Jun 2022
Revised 30 Oct 2022
Accepted 18 Nov 2022

Keywords:
Electrokinetics,
Clay,
Diesel,
PH control,
Surfactant,
Compressive strength.

ABSTRACT

Pollution of soils containing petroleum products is one of the most important environmental challenges. Therefore, it is necessary to take measures for the purification of petroleum products, including diesel, to clean these compounds from the soil, various solutions are used, including the use of electrokinetic process. The result of the electrokinetic process in the soil is the movement of water, ions and charged particles due to the difference in electrical potential. In this study, the purification of diesel-contaminated clay by electrokinetic method in the presence of ABTS and saponin surfactants is investigated and the effect of pH control on catolite and anolite on the electrokinetic modification process of clay is evaluated. The results show that in the absence of the surfactant, the electrokinetic method has a very low removal efficiency of 3% to 7%, but in the presence of the surfactant, the efficiency is significantly increased by 20% to 54%, with pH control in Velit, anolyte and the amount of active substance increase the level of efficiency of diesel removal from soil. With the use of Saponin, the lowest amount of removal at a concentration of 0.05% equal to 20% has been obtained, while ABTS has been able to remove about 54% of diesel at the highest concentration of surfactant (0.15%), in the continuation of the research A uniaxial test has been conducted to determine the unconfined compressive strength of the soil sample, which shows that the cleaning process increases the compressive strength of the soil by 15%.

Cite this article: Taherian, Ali., Yazdi, Maryam., Danaei, Iman., & Zad, Amirali. (2023). Effect of Surfactant on Cleaning of Diesel Contaminated Clay Soil Using Electrokinetic Process and Determining the Uniaxial Resistance of Clay after Cleaning. *Civil Infrastructure Researches*, 9(1), 105-119. <https://doi.org/10.22091/cer.2022.8264.1403>





تأثیر ماده فعال سطحی بر پاکسازی خاک رسی آلوده به گازوئیل با استفاده از فرآیند الکتروکینتیک و تعیین مقاومت تک محوری خاک رس پس از پاکسازی

علی طاهریان^۱، مریم یزدی^۲، ایمان دانایی^۳، امیرعلی زاد^۴

۱. دانشجوی دکتری مهندسی عمران- ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران و منابع زمین، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. رایانامه: ali.taherian1364@gmail.com

۲. نویسنده مسئول، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران و منابع زمین، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. رایانامه: mar.yazdi@iauctb.ac.ir

۳. دانشیار، گروه مهندسی بازرسی فنی، دانشکده نفت آبادان، دانشگاه صنعت نفت، آبادان، ایران. رایانامه: imandanaee@gmail.com

۴. استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران و منابع زمین، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. رایانامه: a.zad@iauctb.ac.ir

چکیده

آلودگی خاک‌های حاوی مواد نفتی از مهم‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی جهان امروز به شمار می‌رود. بنابراین ضروری است تا در مورد پاکسازی مواد نفتی از جمله گازوئیل تدابیری صورت گیرد. جهت پاکسازی این ترکیبات از خاک راهکارهای مختلف از جمله استفاده از فرآیند الکتروکینتیک به کار می‌رود. نتیجه فرآیند الکتروکینتیک در خاک، حرکت آب، یون‌ها و ذرات باردار در اثر ایجاد اختلاف پتانسیل الکتریکی می‌باشد. در این تحقیق، پاکسازی خاک رسی آلوده به گازوئیل به روش الکتروکینتیک در حضور مواد فعال سطحی ABTS و Saponin مورد بررسی قرار گرفته است و اثر کنترل pH در کاتولیت و آنولیت بر فرآیند اصلاح الکتروکینتیک خاک رسی ارزیابی شده است. نتایج نشان داده که در غیاب ماده فعال سطحی، روش الکتروکینتیک بازدهی حذف خیلی کم به میزان ۳ تا ۷ درصد داشته ولی در حضور ماده فعال سطحی بازدهی حذف افزایش چشمگیری به میزان ۲۰ تا ۵۴ درصد داشته است. با کنترل pH در کاتولیت و آنولیت و افزایش غلظت ماده فعال سطحی بازدهی حذف گازوئیل از خاک افزایش یافته است. با کاربرد Saponin، کمترین میزان حذف در غلظت ۰/۰۵ برابر با ۲۰ درصد به دست آمده است، در حالی که ABTS توانسته حدوداً ۵۴ درصد از گازوئیل را در بیشترین غلظت ماده فعال سطحی (۰/۱۵ درصد) حذف کند. در ادامه تحقیق، آزمایش تک محوری جهت تعیین مقاومت فشاری محصور نشده نمونه خاک انجام گرفته است که نشان می‌دهد که فرآیند پاکسازی سبب افزایش مقاومت فشاری خاک به میزان ۱۵ درصد خواهد شد.

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۳/۱۷

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۸/۰۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۲۷

کلیدواژه‌ها:

الکتروکینتیک،

خاک رس،

گازوئیل،

pH،

ماده فعال سطحی،

مقاومت فشاری.

استناد: طاهریان، علی؛ یزدی، مریم؛ دانایی، ایمان؛ و زاد، امیرعلی. (۱۴۰۲). تأثیر ماده فعال سطحی بر پاکسازی خاک رسی آلوده به گازوئیل با استفاده از فرآیند الکتروکینتیک و تعیین مقاومت تک محوری خاک رس پس از پاکسازی. پژوهش‌های زیرساخت‌های عمرانی، ۱۹(۱).

<https://doi.org/10.22091/cer.2022.8264.1403>. ۱۱۹-۱۰۵



۱- مقدمه

آلوده شدن محیط زیست به انواع آلاینده‌ها، هر ساله رو به افزایش بوده و به‌عنوان یکی از مباحث بسیار مهم در زندگی بشر مطرح است. رشد روز افزون جمعیت و توسعه شهرها، گسترش صنایع و بهره‌برداری نامحدود از منابع طبیعی، از عوامل مهم فزاینده آلاینده‌ها به حساب می‌آیند [۱]. از میان آلاینده‌ها، هیدروکربن‌های نفتی از رایج‌ترین آلوده‌کننده‌های آب و خاک محسوب می‌شوند [۲]. 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 خاک‌ها جهت استفاده بهینه در کشاورزی، کاهش ظرفیت باربری خاک جهت احداث سازه و طرح‌های عمرانی بسیار مورد توجه قرار گرفته است. همچنین ایران کشوری نفت‌خیز بوده و آلودگی‌های هیدروکربنی تهدیدی برای محیط‌زیست مناطق نفت‌خیز این کشور می‌باشد [۳]. بنابراین با توجه به مشکلات ذکر شده و توجه به اصل حفظ سلامت جامعه، لزوم پاکسازی محیط‌زیست از این آلاینده‌ها امری ضروری است [۴]. اصلاح خاک‌های آلوده به هیدروکربن‌های نفتی، به علت ناهمگنی خاک و حجم بالای موادی که باید اصلاح شوند، بسیار غیراقتصادی و وقت‌گیر است و اکثر روش‌های به‌کار رفته مثل پالایش زیستی، گرمادهی ناحیه‌ای و اکسیداسیون شیمیایی نسبت به این روش بسیار پرهزینه‌تر و برای پاکسازی این خاک‌ها فاقد کارایی لازم بوده است [۵ و ۶]. سرعت بالا، هزینه مورد نیاز و قابلیت کاربری زمین در آینده سبب شده است تا روش اصلاح الکتروکینتیک^۱ مورد توجه قرار گیرد [۷]. در حال حاضر، با توجه به سهولت استفاده از این روش، بسیاری از تحقیقات در دنیا به این روش اختصاص یافته است [۸]. از مزایای فرآیند الکتروکینتیک 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 و پاکسازی زمین‌های با وسعت زیاد از آلاینده‌ها اشاره نمود [۹]. از معایب عمده آن نیز می‌توان به تغییرات شدید pH در طی فرآیند و کارایی پایین در خاک‌های با رطوبت کم اشاره کرد که می‌توان با استفاده از عوامل کنترل‌کننده pH کارایی فرآیند را بهبود بخشید [۱۰]. الکتروکینتیک روشی فیزیکی برای جدا سازی مواد مضر در طبیعت اعم از ترکیبات شیمیایی آلی و معدنی از مکان‌های آلوده مانند خاک، رسوبات و آب‌های زیرزمینی است. نتیجه فرآیند الکتروکینتیک 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^۲، الکترواسمز^۳ و الکتروفورز^۴ می‌شود [۱۱]. مهاجرت الکتریکی، انتقال یون‌ها و مولکول‌های قطبی تحت تأثیر میدان الکتریکی به سمت الکتروود با بار مخالف، الکترواسمز جریان سیال یونی تحت تأثیر میدان الکتریکی نسبت به یک سطح باردار و الکتروفورز، حرکت کلونید باردار مانند رس به سمت الکتروود با بار مخالف در یک میدان الکتریکی می‌باشد [۵]. 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، به علت وجود بار منفی در سطح ذرات رس، حرکت یون‌های مثبت و در نتیجه، مولکول‌های آب به سمت کاتد، به‌صورت جریان حاکم مشاهده می‌گردد [۱۲]. الکترولیز شامل واکنش‌های

² - Electromigration

³ - Electroosmos

⁴ - Electrophores

¹ - Electrokinetic

شیمیایی است که در فرآیند الکتروکینتیک در مجاورت الکترودها 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 [۱۳]. بخشی از مواد آلی به دلیل حلالیت در آب و یا به علت قطبی بودن، از سطح خاک جدا شده و بوسیله جریان الکترواسمز در خاک به حرکت در می‌آیند و در انتهای مسیر خود می‌توانند از کاتولیت خارج شوند. بدیهی است که بازدهی سامانه الکتروکینتیک در حذف آلاینده‌های آلی به میزان حلالیت و یا قطبی بودن آنها بستگی دارد [۱۴]. از طرف دیگر، آلاینده‌های آلی شامل مولکول‌های سنگین و غیرقطبی به راحتی در آب حل نمی‌شوند و در نتیجه، الکترواسمز توان کمی در جابه‌جایی این مولکول‌ها دارد [۱۵]. تحقیقات سال‌های اخیر، کارایی روش الکتروکینتیک برای حذف آلاینده‌های مختلف مانند فلزات سنگین و آلاینده‌های آلی از خاک را نشان داده است [۱۶]. در تحقیقات صورت گرفته کارایی این روش برای حذف هیدروکربن‌های نفتی در خاک بررسی می‌شود که برخی از مشتقات نفتی به وسیله این فرآیند قابل حذف، اما برخی از آنها به خوبی حذف نمی‌شوند. نقش مکانیسم الکترواسمز در فرآیند اصلاح الکتروکینتیک در حذف هیدروکربن‌های نفتی در یک خاک رسی مورد تأیید قرار گرفته است [۱۷]. با توجه به قابلیت روش الکتروکینتیک 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 دارد، ماده فعال سطحی^۵ است. مواد فعال سطحی ترکیبات آمفیفیلیک^۶ شامل هر دو گروه آب‌دوست^۷ و آب‌گریز^۸ هستند. این ترکیبات هم به صورت طبیعی و هم به صورت مصنوعی کاربرد دارند. جهت انتخاب ماده فعال

سطحی مناسب در تصفیه الکتروکینتیک، عوامل مختلفی نظیر راندمان و کارایی ماده فعال سطحی در تصفیه آلاینده‌ها، عملکرد ماده فعال در pHهای مختلف، بارهای الکتریکی قابل حمل توسط ماده فعال سطحی و هزینه را می‌توان در نظر گرفت. به طور کلی، انحلال در آب‌های زیرزمینی در دماهای طبیعی، جذب کم به ذرات خاک و کارایی در غلظت کمتر از ۳ درصد 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. در سال ۲۰۱۱، با کاربرد ماده فعال سطحی Saponin به شستشوی خاک آلوده به نفت خام پرداخته شده و به راندمان حذف مناسبی رسیده‌اند [۱۸]. در مطالعه‌ای در سال ۲۰۱۴، برای بهبود حذف هیدروکربن‌ها از خاک آلوده به روش الکتروکینتیک، استفاده از Igepal ۷۲۰-CA و پرسولفات^۹ به ترتیب به عنوان ماده فعال سطحی و اکسیدکننده راندمان حذف ۳۸ درصد حاصل شده است [۱۹]. باربا^{۱۰} و همکاران، در مطالعه تأثیر فرآیند الکتروکینتیک همراه با شوینده بر روی ترکیبات هیدروکربن کلردار در خاک دریافته‌اند که این فرآیند به کمک استفاده از شوینده جهت حذف آلاینده‌های هیدروکربنی از نمونه خاک رسی کارآمد خواهد بود [۲۰]. وسیانته^{۱۱}، در مطالعه پایداری در فرآیندهای اصلاح الکتروکینتیک مشاهده کردند که استفاده از روش الکتروکینتیک جهت پاکسازی آلاینده‌های غیرآلی از خاک رس مناسب می‌باشد [۲۱]. محققان در مطالعه حذف سطحی آلودگی از خاک به روش الکتروکینتیک دریافتند که فرآیند الکتروکینتیک جهت پاکسازی خاک رسی از اتیلن کلرزه مناسب می‌باشد [۲۲]. در مطالعه تأثیر کاربرد بیوسورفاکتانت‌ها و روش الکتروکینتیک بر روی

^۹- Persulfate

^{۱۰}- Barba

^{۱۱}- Vocciante

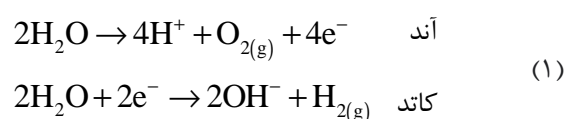
^۵- Surfactant

^۶- Amphiphilic

^۷- Hydrophile

^۸- Hydrophobe

مناسب باشد [۲۹]. پژوهشگران مشاهده کردند 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 [۳۰]. کامیسل^{۱۷} و همکاران در تحقیقی جهت اصلاح الکتروکینتیک پیشرفته برای از بین بردن فلزات سنگین از خاک‌های آلوده دریافتند 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 [۳۱]. محققان دریافتند 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 [۳۲]. کای^{۱۸} و همکاران در تحقیقی دریافتند که پاکسازی کادمیوم از خاک‌های ریزدانه با استفاده از فرآیند الکتروکینتیک حدود ۶۴ درصد می‌باشد [۳۳]. با توجه به رابطه (۱)، هنگام 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، به علت تشکیل یون‌های هیدروکسیل، pH این ناحیه، به شدت 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^- به ترتیب در آنولیت و کاتولیت، یک جبهه اسیدی از سمت آند و یک جبهه بازی از سمت کاتد به درون خاک حرکت خواهد کرد [۳۴].

خاک آلوده به پتروشیمی سال ۲۰۲۰ یافته‌ها حاکی از آن بود 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 شد [۲۳]. محققان، پاکسازی خاک رسی آلوده به هیدروکربن با استفاده از فرآیند الکتروکینتیک و اعمال جریان مستقیم الکتریکی را مؤثر ارزیابی کرده‌اند [۲۴]. پژوهشگران در مطالعه اصلاح بیوالکتروکینتیک با واسطه بیوسورفکتانت^{۱۲} محیط آلوده به دیزل^{۱۳} دریافت که این روش جهت پاکسازی و تمیز کردن خاک‌های آلوده به هیدروکربن دیزل روشی کارا می‌باشد [۲۵]. اوکلیا^{۱۴} در مطالعه تثبیت لایه لغزشی زمین با استفاده از روش الکتروکینتیک و تصفیه خلاء دریافتند که استفاده از روش مذکور باعث افزایش پارامترهای مقاومتی خاک رس اشباع خواهد شد [۲۶]. محققان در تحقیق مروری بر الکتروکینتیک پیشرفته فناوری‌های زیست‌هسته‌ای دریافتند الکتروکینتیک مزایایی چون پاکسازی هدفمند، عدم نیاز به حفاری، کاربرد در خاک‌های اشباع و غیراشباع، توانایی تصفیه آلاینده‌های آلی و غیرآلی دارد [۲۷]. لوپز^{۱۵} و همکاران در مطالعه‌ای از فرآیندهای انحلال و ته‌نشینی کالیکت^{۱۶} 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 انتقال را درگیر می‌کند [۲۸]. نصیری در تحقیقی دریافتند که استفاده از روش الکتروکینتیک همراه با کنترل pH می‌تواند برای پاکسازی خاک‌های آلوده به کروم بسیار

12- Biosurfactant

13- Diesel

14- Ukleja

15- López

16- Calichite

17- Cameselle

18- Cai

۲- مواد و روش‌ها

هدف از انجام این پژوهش، افزایش کارایی الکتروکینتیک در تصفیه خاک رس آلوده به گازوئیل، از طریق تلفیق روش مذکور با کاربرد مواد فعال سطحی بوده است. به منظور بهبود فرآیند حذف به روش الکتروکینتیک از مواد فعال سطحی ABTS با فرمول شیمیایی $C_{18}H_{18}N_4O_6S_4$ و Saponin با فرمول شیمیایی $C_{42}H_{66}O_{14}$ استفاده شده که به صورت جامد و به عنوان الکترولیت مورد استفاده قرار گرفته است. شرکت سازنده مواد فعال سطحی مورد استفاده Sigma-Aldrich Products بوده است. این مواد با توجه به مطالعات انجام شده در زمینه پاکسازی خاک‌های آلوده به مواد نفتی انتخاب شده‌اند [۱۹]. همچنین مواد فعال سطحی مورد استفاده در دسته مواد سمی و آلاینده محیط‌زیست نبوده و Saponin منشأ گیاهی دارد [۳۵]. درصد استفاده از ماده فعال سطحی در این پژوهش ناچیز بوده، اما تأثیر چشمگیری بر بهبود فرآیند و بازدهی پاکسازی دارد. 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.

به منظور تعیین ویژگی‌های فیزیکی خاک پایه آزمایش‌های هیدرومتری، تعیین حدود اتربرگ و تراکم انجام گرفته است. همچنین از اسید نیتریک جهت کنترل تغییرات pH و 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 به لحاظ شرایط فیزیکی به صورت مایع می‌باشد. جهت اختلاط مناسب‌تر و آلوده کردن بهتر نمونه خاک از حلال استون استفاده شده است که به جهت قطبی بودن این حلال در فرآیند اختلاط مواد آلی از آن استفاده می‌گردد. پس از اختلاط با خاک، حلال کاملاً از محیط خاک تبخیر می‌شود. از آنجا که آلودگی در خاک وجود نداشته است، خاک به‌طور مصنوعی به

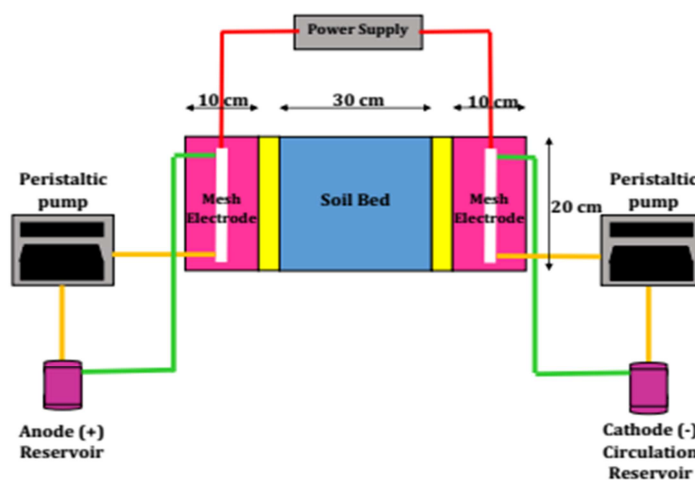
گازوئیل آلوده شده است. خاک پس از آلوده شدن دو هفته در شرایط آزمایشگاه در ظرف درب بسته قرار داده شده و پس از این مدت مخلوط تهیه شده در فضای باز به آرامی هم زده شده تا حلال به‌طور کامل از خاک تبخیر گردد. با توجه به اینکه امکان دارد بخش کوچکی از هیدروکربن‌های نفتی در زمان هم زدن خاک، همراه حلال از خاک خارج شوند، پس از تبخیر کامل حلال، غلظت هیدروکربن‌های نفتی موجود در خاک دوباره اندازه‌گیری شده‌اند. جهت جلوگیری از ورود خاک آلوده از ستون خاک به درون مخزن‌ها، از کاغذ صافی استفاده گردیده است. جهت ورود و خروج مایع پیش‌برنده در طول ستون و ننگ داشتن خاک در شرایط اشباع، شیرهایی در دو طرف مخزن تعبیه شده است. در طول آزمایش ولتاژ به‌کار رفته تقریباً ثابت و به میزان ۱۲ ولت بر سانتیمتر ننگ داشته شده، ولی اختلاف پتانسیل در نقاط مختلف خاک به‌طور قابل توجهی متغیر و تا حدود زیادی غیرقابل کنترل بوده است. علت این تغییرات، واکنش‌های حاکم در زمان برقراری میدان الکتریکی در دو سر الکترودها است که موجب حرکت یون‌ها و جریان منفی درون خلل و فرج خاک شده و در نتیجه، خاک مقاومت‌های متغیری نشان می‌دهد [۳۶ و ۳۷]. ولتاژ موردنظر توسط یک منبع جریان الکتریکی از طریق دو الکتروده موجود در آنولیت و کاتولیت، به نمونه خاک اعمال شده و توسط یک مولتی‌متر به صورت روزانه کنترل گردیده است. الکترودهای به‌کار رفته از جنس گرافیت توسط پایه در مخزن‌های آنولیت و کاتولیت ننگ داشته شده‌اند. ویژگی‌های سیستم مورد استفاده این تحقیق در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- ویژگی‌های آزمایش‌های انجام گرفته

نوع خاک	رس
نوع آلاینده	گازوئیل
غلظت اولیه گازوئیل	۱٪
نوع الکتروده	گرافیت
مدت زمان آزمایش	۱۰ روز
نوع ماده فعال سطحی	ATBS Saponin

آزمایش را فراهم می‌سازد. با توجه به حرکت محلول‌های الکترولیت و تغییر ارتفاع در اثر جریان الکترواسمز و جلوگیری از جریان الکترواسمز معکوس، الکترولیت در محفظه‌های آند و کاتد (برای جلوگیری از اثر گرادیان هیدرولیکی در مهاجرت الکتریکی و جریان الکترواسمز) به طور مداوم توسط پمپ کنترل شده است. در شکل ۲ محفظه ساخته شده تحقیق انجام شده قابل‌ملاحظه می‌باشد.

در پژوهش حاضر از یک سلول الکتروکینتیک به شکل مکعب مستطیل از جنس پلکسی گلاس و به ابعاد $50 \times 15 \times 20$ سانتیمتر مطابق شکل ۱ استفاده شده است. در سیستم مذکور، محفظه میانی به طول ۳۰ سانتیمتر محل قرارگیری خاک بوده و محفظه‌های طرفین جهت ریختن محلول‌های الکترولیت هستند. 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



شکل ۱- سیستم اجرایی الکتروکینتیک

محلول‌های الکترولیت نیز برای تعیین pH و غلظت آلاینده مورد آنالیز قرار گرفته است. به منظور بررسی میزان تأثیر pH بر کارایی حذف هیدروکربن‌های نفتی، دو آزمایش، یکی بدون کنترل pH و دیگری همراه با کنترل pH انجام گرفته است. در آزمایش دوم به منظور کنترل pH در آنولیت و کاتولیت، به ترتیب از تزریق محلول‌های سود و اسیدنیتریک استفاده گردیده است. پس از شروع آزمایش و برقراری جریان الکتریکی، تغییرات pH توسط دستگاه pH متر به‌طور روزانه اندازه‌گیری و کنترل شده است [۳۸]. برای اندازه‌گیری گازوئیل در خاک، به ۱۰ گرم خاک آلوده به گازوئیل، ۴ میلی‌لیتر حلال هگزان (هگزان به دلیل 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 رفت‌وبرگشتی



شکل ۲- محفظه ساخته شده تحقیق حاضر

در این تحقیق برای هر ماده فعال سطحی، سه غلظت ۰/۰۵، ۰/۱ و ۰/۱۵ برحسب در ASTM صد مدنظر قرار گرفته است [۱۹]. در تمام آزمایش‌ها غلظت گازوئیل برابر با 10 g/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.

سطحی مختلف که در ابتدا به آنها اشاره شد تکرار گردد. در ادامه، به منظور تعیین میزان مقاومت فشاری محصور نشده خاک، بر روی خاک رسی، نمونه خاک رس آلوده به گازوئیل و نمونه خاک رس پاکسازی شده پس از فرآیند الکتروکینتیک آزمایش تک محوری طبق استاندارد ASTM D2166 انجام گرفته است. سطح مقطع، طول و وزن مخصوص خشک نمونه به ترتیب برابر $11/1 \text{ cm}^2$ ، $7/4 \text{ cm}$ و $1/76 \text{ gr/cm}^3$ بوده است. شکل ۳، دستگاه تک محوری مورد استفاده در این تحقیق و نمونه های خاک مورد آزمایش را نشان می دهد. در شکل ۴ نیز روش کار تحقیق در قالب نمودار جریانیه مشاهده می گردد.

مخلوط شده است. سپس نمونه به مدت ۱۰ دقیقه در ۳۰۰۰ دور در دقیقه، سانتریفیوژ و محلول آلی رویی با احتیاط جمع آوری می شود. پس از سه بار انجام مراحل بالا، محلول به منظور اندازه گیری مقدار گازوئیل در خاک، به دستگاه کروماتوگرافی گازی (GC) تزریق شده است. نتایج کروماتوگرافی به صورت نمودارهای خروجی نمایش داده می شود. پیک های به دست آمده نمودارهای خروجی حاصل از خاک پاکسازی شده با پیک اولیه (خاک رس آلوده به گازوئیل) مقایسه گردیده و میزان حذف آلاینده از خاک رس به صورت درصد ارزیابی می گردد. این مقایسه می بایست برای تمامی آزمایش ها با حضور مواد فعال

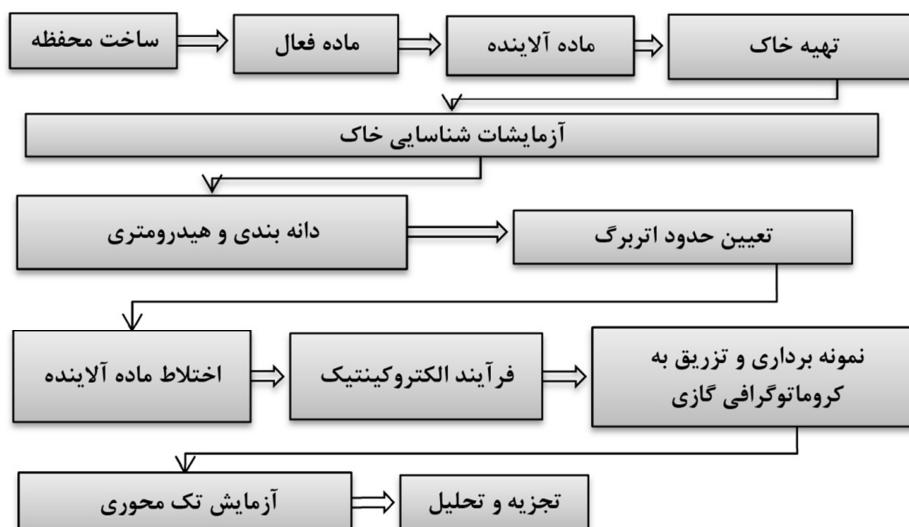


(ب)



(الف)

شکل ۳- (الف) تصویر دستگاه تک محوری به منظور تعیین مقاومت فشاری محصور نشده نمونه های خاک رسی و (ب) نمونه های خاک آزمایش تک محوری

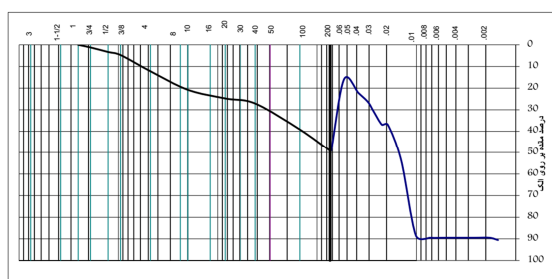


شکل ۴- نمودار جریانیه مراحل تحقیق

۳- نتایج و بحث

نتایج حاصل از این آزمایش در نمودار شکل ۵ قابل مشاهده می‌باشد.

پس از انجام آزمایش هیدرومتری، آزمایش تعیین حدود اتربرگ براساس استاندارد ASTM D4318-93 بر روی خاک بدون آلاینده، خاک آلوده و خاک پاکسازی شده انجام گرفته است. نتایج این آزمایش در جدول ۲ ارائه شده است. نتایج آزمایش تعیین حدود اتربرگ بر روی نمونه‌های خاک در شرایط مختلف بیانگر آن است که میزان نشانه خمیری با اضافه شدن آلاینده گازوئیلی حدود ۳/۵ درصد افزایش داشته و پس از پاکسازی تغییر محسوسی نکرده است.

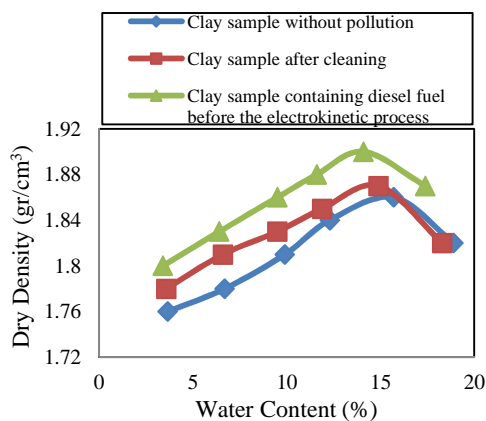


شکل ۵- نتایج آزمایش هیدرومتری خاک

در تحقیق انجام شده، به‌منظور تعیین اندازه ریزدانه خاک آزمایش هیدرومتری براساس استاندارد D7928 ASTM انجام گرفته است، که این آزمایش پس از آلوده کردن خاک با گازوئیل و همچنین پس از انجام فرآیند الکتروکینتیک تکرار گردیده است. در این آزمایش از هیدرومتر H ۱۵۲ استفاده شده است. نتایج آزمایش هیدرومتری در سه شرایط انجام شده تغییری در نتایج نشان نداده است. نتایج فرآیند هیدرومتری انجام گرفته بر روی نمونه خاک نشان می‌دهد که اندازه قطر درشت‌ترین دانه حدود ۰/۰۷۲۱ میلی‌متر بوده که حدود ۸۶ درصد ریزدانه نمونه خاک را شامل می‌شود و این در حالی است که اندازه قطر ریزترین دانه برابر ۰/۰۰۱۵ میلی‌متر بوده است که حدود ۱۰ درصد ریزدانه نمونه خاک را تشکیل می‌دهد. با توجه به نتایج به‌دست آمده از اندازه دانه‌های خاک، میزان رس نمونه خاک بیش از ۸۶ درصد می‌باشد.

جدول ۲- آزمایش تعیین حدود اتربرگ نمونه خاک

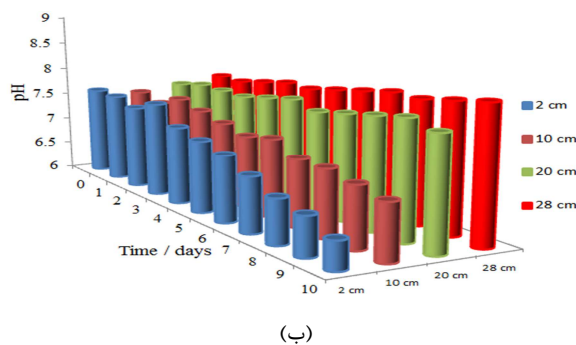
نمونه خاک			پارامترها
پس از پاکسازی (%)	با آلاینده گازوئیلی (%)	بدون آلاینده (%)	
۳۲/۷	۳۰/۳	۳۲/۳	حد روانی
۱۷/۸	۱۴/۶	۲۰/۲	حد خمیری
۱۴/۹	۱۵/۷	۱۲/۱	نشانه خمیری



شکل ۶- نتایج آزمایش تراکم نمونه‌های خاک در شرایط مختلف

در ادامه، به‌منظور تعیین وزن مخصوص خشک نمونه‌ها، آزمایش تراکم انجام گرفته که در شکل ۶، نتایج مربوط به این آزمایش ارائه شده است. مطابق این شکل، درصد رطوبت بهینه خاک در سه حالت تغییر محسوسی نداشته و بین ۱۴ تا ۱۵/۵ درصد است. از سوی دیگر، با افزودن آلاینده حداکثر وزن مخصوص خشک نیز در خاک بدون آلاینده، خاک آلوده و خاک پاکسازی شده به ترتیب برابر با ۱/۸۶، ۱/۸۷ و ۱/۹ گرم بر سانتیمترمکعب به‌دست آمده است.

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 می‌گردد. 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 ۷- 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 دو سانتیمتری از آند برابر ۶/۵ بوده و این در حالی است که در فاصله ۲۸ سانتیمتری از آند میزان pH برابر ۸/۴ بوده است.

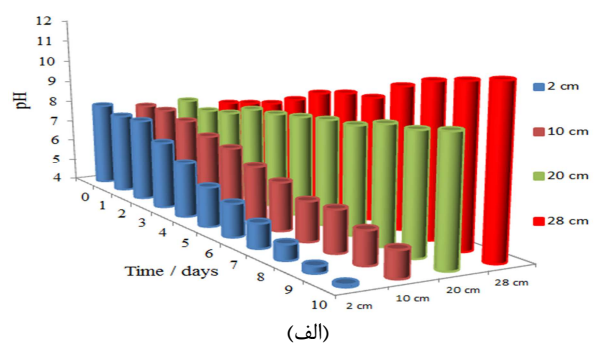


شکل ۷- تغییرات pH در خاک در فواصل مختلف از آند (الف) بدون و (ب) با کنترل pH

محلول‌ها به طور 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 که میزان شدت جریان پس از گذشت ۱۰ روز از شروع فرآیند برابر ۰/۱۷ آمپر بوده است. در غیاب کنترل pH، با توجه به اینکه در پایان دوره، از غلظت سایر یون‌های موجود در خاک به علت خروج آنها از محلول خاک و یا رسوب در مجاورت کاتد کاسته شده، در اواخر دوره شدت جریان الکتریکی کاهش یافته است، ولی در صورت کنترل

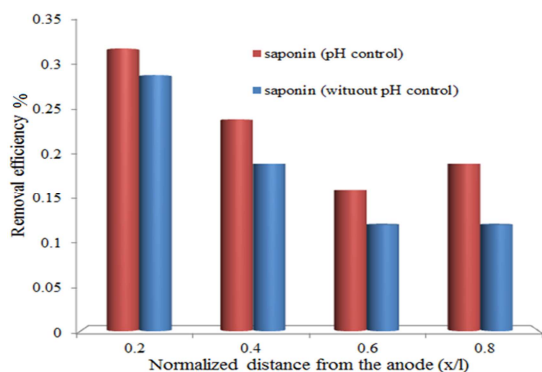
مطابق با نتایج به دست آمده، تغییر شرایط خاک تأثیر چندانی بر میزان حداکثر وزن مخصوص خشک نیز نداشته است. در طی فرآیند الکتروکینتیک، جبهه اسیدی با سرعت بیشتری نسبت به جبهه بازی در امتداد ستون خاک پیشروی کرده و در ناحیه نزدیک به کاتد، این دو جبهه به هم خواهند رسید. در نتیجه، در بیشتر طول ستون خاک، شرایط 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 ۷- الف مشاهده می‌گردد، در شرایطی که فرآیند الکتروکینتیک بدون کنترل pH انجام می‌گردد، میزان pH بعد از ۱۰ روز در فاصله دو سانتیمتری از آند برابر ۴/۱ بوده و این در



در شکل ۸، 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 آند، شدت جریان الکتریکی ضعیف‌تری نسبت به آزمایش دوم به دست می‌آید که این مقدار پس از ۱۰ روز به میزان ۰/۰۷۵ آمپر بوده است. با توجه به اینکه در حالت pH کنترل شده، از محلول‌های سدیم‌هیدروکسید و اسیدنیتریک به منظور کنترل pH استفاده شد، این

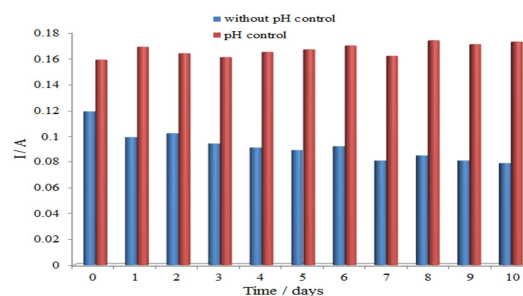
الکترولیت‌ها و عدم کنترل pH، غلظت یون H^+ در آند افزایش یافته و pH به شدت اسیدی می‌شود. همچنین در مجاورت کاتد، به‌علت تولید یون‌های هیدروکسیل، pH به شدت افزایش می‌یابد. از آنجاکه سرعت جریان الکترواسمز تابع تغییرات pH می‌باشد، بنابراین در آغاز فرآیند الکتروکینتیک، با توجه به اینکه شدت جریان الکتریکی نسبتاً بالا است، سرعت جریان الکترواسمز نیز بالا بوده و آن مقدار از آلاینده‌ها که وارد فاز محلول شده بودند همراه جریان منفذی از خاک خارج می‌شوند. با گذشت زمان و تجمع ترکیبات در مجاور کاتد و فشرده شدن این ناحیه، از شدت جریان الکتریکی کاسته شده و بنابراین سرعت جریان الکترواسمز نیز کاهش می‌یابد. در نتیجه، تجمع گازوئیل در این ناحیه نیز بیشتر خواهد شد. 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 به‌دست می‌آید.



شکل ۱۰- بازدهی حذف الکتروکینتیک، نمودار قرمز با کنترل PH و نمودار آبی بدون کنترل PH در حضور ماده فعال سطحی Saponin در فواصل مختلف از آند

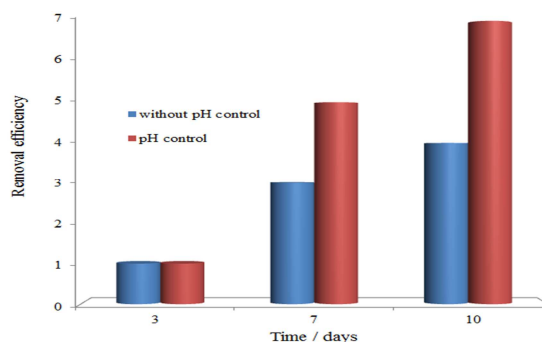
در شکل ۱۱، تغییرات جریان الکترواسمز در طول زمان نشان داده شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، در نزدیکی آند تفاوت در بازدهی حذف با کنترل و بدون کنترل pH کمتر است. این تفاوت در بازدهی، در مجاورت کاتد بیشتر دیده می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که جریان الکترواسمز در ابتدای کار پایین است و با گذشت زمان افزایش یافته و پس از مدتی تغییرات کم

pH، تقریباً جریان در طول زمان آزمایش ثابت مانده است.



شکل ۸- نمودار تغییرات جریان، نمودار آبی بدون کنترل pH و نمودار قرمز با کنترل pH

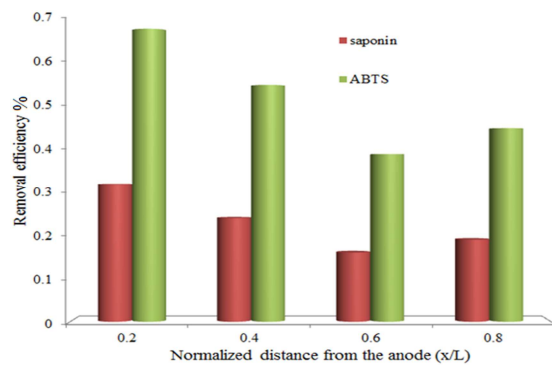
پس از آنالیز خاک مورد آزمایش، میزان حذف گازوئیل از خاک در غیاب ماده فعال سطحی، بسیار کم و در حدود ۳ تا ۷ درصد به‌دست آمده است. شکل ۹، بازدهی حذف الکتروکینتیک در غیاب ماده فعال سطحی با کنترل و بدون کنترل pH را در طول زمان نشان می‌دهد. این نتیجه بیانگر آن است که مقدار خیلی کمی از گازوئیل بدون حضور ماده فعال سطحی از خاک خارج می‌شود. 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 ۹- تغییرات بازدهی حذف گازوئیل در غیاب ماده فعال سطحی، نمودار آبی بدون کنترل pH و نمودار قرمز همراه با کنترل pH

شکل ۱۰، بازدهی حذف الکتروکینتیک با کنترل و بدون کنترل pH در حضور ماده فعال سطحی Saponin و در فواصل مختلف از آند را نشان می‌دهد. در صورتی که pH کنترل نشود، با توجه به شرایط الکترولیز در

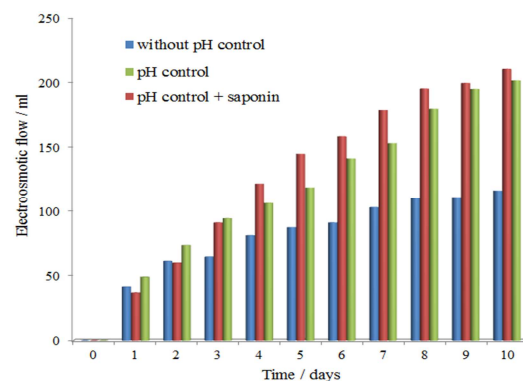
در شکل ۱۲، تغییرات بازدهی حذف دیزل همراه با کنترل pH بعد از ۱۰ روز در فواصل مختلف از آند در حضور مواد فعال سطحی مختلف نشان داده شده است. همانطور که مشخص است بیشترین بازدهی حذف در کنار آند به دست می‌آید و در فواصل نزدیک کاتد، تا حدی به دلیل تجمع گازوئیل، بازدهی کم می‌شود. براساس این شکل، رفتار سورفکتانت‌ها در حذف گازوئیل در فواصل مختلف از آند تقریباً یکسان است، اما ماده فعال سطحی ABTS عملکرد حذف قوی‌تری را نشان می‌دهند.



شکل ۱۲ - تغییرات بازدهی حذف دیزل در حضور ۰/۱۵ درصد مواد فعال سطحی مختلف همراه با کنترل pH بعد از ۱۰ روز در فواصل مختلف از آند

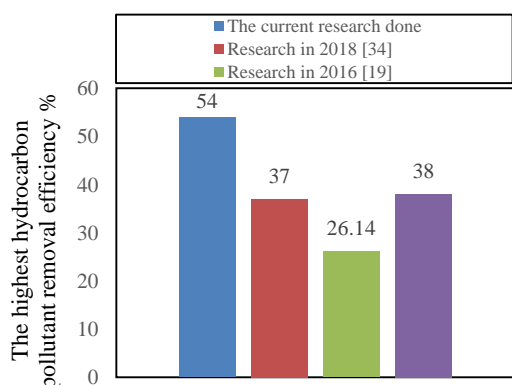
شکل ۱۳، تغییرات بازدهی حذف گازوئیل همراه با کنترل pH در طول ۱۰ روز الکتروکینتیک همراه با مواد فعال سطحی ABTS و Saponin را نشان می‌دهد. همچنین نتایج میزان پاکسازی گازوئیل براساس نوع و غلظت انواع ماده فعال سطحی در آزمایش الکتروکینتیک در جدول ۳ خلاصه شده است. براساس نتایج به دست آمده، با افزایش زمان، تقریباً 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 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.

می‌گردد. علت این امر، اشباع نبودن خاک در ابتدای آزمایش‌ها است. همانطور که در شکل ۱۱ 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 قلبایی و مسدود شدن این منطقه، تغییرات جریان عبوری کم می‌شود. با کنترل pH، جریان الکترواسمز افزایش یافته 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. براساس شکل ۱۱، میزان جریان الکترواسمز تولید شده در حضور ماده فعال سطحی تا حدی افزایش داشته است و 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 نفوذپذیری خاک را بهبود می‌بخشد و در نتیجه، محلول منفذی با سرعت بیشتری حرکت خواهد کرد.



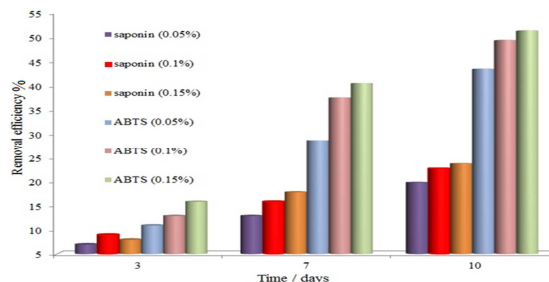
شکل ۱۱ - تغییرات جریان الکترواسمز در طول زمان با کنترل و بدون کنترل pH و همچنین حضور و عدم حضور ماده فعال سطحی Saponin

نهایت پاکسازی آن می‌گردد، اما ساختار Saponin غیریونی بوده و فعالیت مولکولی کمتری در پاکسازی گازوئیل داشته است. براساس شکل ۱۳، ABTS با غلظت ۰/۱۵ و ۰/۱ درصد بیشترین بازدهی پاکسازی گازوئیل را به ترتیب به میزان ۵۴ و ۵۰ درصد داشته و Saponin با غلظت ۰/۱ و ۰/۰۵ درصد کمترین پالایش گازوئیل از نمونه خاک رسی را به ترتیب به میزان ۲۳ و ۲۰ درصد داشته است. این فرآیند در شرایطی انجام گردیده است که در تحقیقات مشابه انجام شده پیشین در سال ۲۰۱۶ با استفاده از فرآیند الکتروکینتیک به همراه ماده فعال سطحی جهت پاکسازی مواد هیدروکربنی، میزان پاکسازی ۱۸/۳۵ و ۲۶/۱۴ درصد بوده است [۱۹]. بنابراین تحقیق انجام شده حاضر در مقایسه با تحقیقات انجام شده قبلی، بازدهی پالایش مطلوب‌تری تا دو برابر داشته است. همچنین در تحقیقات مشابه دیگر سال ۲۰۱۸ و ۲۰۱۴ بیشترین میزان پاکسازی هیدروکربن از خاک به ترتیب برابر ۳۷ و ۳۸ درصد بوده است که در مقایسه با تحقیق حاضر میزان پاکسازی به ترتیب ۱۷ و ۱۶ درصد کمتر به دست آمده است [۳۴ و ۴۰]. در شکل ۱۴، نمودار مقایسه بیشترین میزان بازدهی حذف تحقیقاتی انجام شده با تحقیق حاضر نشان داده شده است.



شکل ۱۴- مقایسه نتایج میزان بازدهی حذف آلاینده در تحقیقات مشابه با تحقیق حاضر

پس از انجام فرآیند الکتروکینتیک، به منظور تعیین مقاومت فشاری محصورنشده خاک، بر روی نمونه خاک



شکل ۱۳ - تغییرات بازدهی حذف گازوئیل در حضور درصدهای مختلف مواد فعال سطحی همراه با کنترل pH در زمان‌های مختلف آزمایش

همانطور که مشخص است ABTS بازدهی حذف بیشتری را نشان می‌دهد. مواد فعال سطحی طی دو مکانیسم اصلی به حرکت درآوردن ذرات نفتی (تحریک نفت) و انحلال ترکیبات نفتی در آب باعث بهبود حذف ترکیبات نفتی از خاک می‌شوند. در مکانیسم تحریک، پدیده‌های کاهش کشش سطحی و کشش بین سطحی، کاهش نیروی موئینگی، رطوبت‌پذیری و افزایش زاویه تماس به وجود می‌آیند [۳۹]. در حالی که پدیده حلالیت در اثر توزیع و انتقال ذرات آلاینده به داخل بخش آب‌گریز مواد فعال سطحی انجام می‌شود. از جمله عوامل مطلوب در استفاده از مواد فعال می‌توان به بهبود انحلال‌پذیری، کاهش کشش سطحی، توانایی مرطوب‌کنندگی و کف‌سازی را نام برد [۳۹].

جدول ۳- میزان پاکسازی گازوئیل براساس نوع و غلظت انواع ماده فعال سطحی در آزمایش الکتروکینتیک

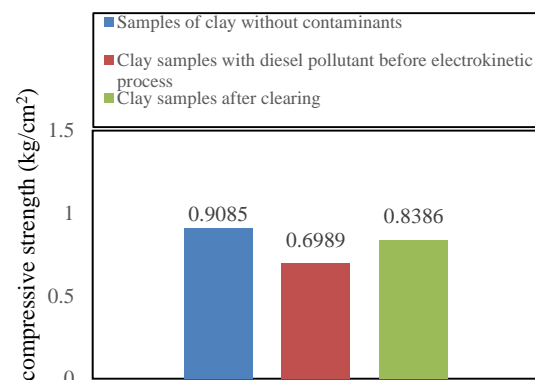
غلظت ماده فعال سطحی (%)			نوع ماده فعال سطحی
۰/۱۵	۰/۱	۰/۰۵	
میزان پاکسازی (%)			ABTS
۵۴	۵۰	۴۴	
۲۴	۲۳	۲۰	Saponin

توانایی بیشتر ABTS در حذف گازوئیل را می‌توان به ساختار مولکولی نسبتاً کوچکتر نسبت به Saponin ربط داد که در انحلال گازوئیل مؤثر بوده و سرعت مهاجرت بیشتری دارد. همچنین ساختار ABTS به‌صورت یونی بوده و سر فعال مولکول ABTS به خوبی در آب حل می‌گردد و باعث حرکت بهتر گازوئیل و در

الکترواسمز از محیط خاک خارج نمی‌شود. از سوی دیگر، کاربرد مواد فعال سطحی می‌تواند با کاهش نیروی کشش سطحی میزان ورود آلاینده را به محلول الکترولیت و در نتیجه جریان الکترواسمز را افزایش دهد. نتایج بیانگر آن است که بیشترین راندمان حذف گازوئیل با کاربرد ماده فعال سطحی ABTS با ۰/۱۵ درصد وزنی به دست می‌آید. در حالی که با کاربرد ماده فعال سطحی Saponin با ۰/۰۵ درصد وزنی کمترین میزان پاکسازی مشاهده می‌شود. در این تحقیق، کنترل pH در فرآیند حذف نیز مورد ارزیابی قرار گرفته است. کنترل pH برای بالا بردن کارایی حذف آلاینده‌های آلی از خاک به روش الکتروکینتیک بسیار مهم ارزیابی شده است. با کنترل pH در الکترولیت‌ها تا حد زیادی کارایی حذف گازوئیل از خاک رس افزایش یافته است. از طرفی با استفاده از اسیدنیتريك در محفظه کاتد و جلوگیری از تغییرات pH در این ناحیه، تا میزان زیادی از رسوب آلاینده‌ها و تشکیل لایه متراکم جلوگیری خواهد شد. 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 به دست آمده است. در ادامه، با مشاهده نتایج آزمایش تک‌محوری به جهت تعیین پارامترهای ژئوتکنیکی بر روی نمونه خاک رس و نمونه خاک رس آلوده به گازوئیل قبل از فرآیند الکتروکینتیک و نمونه خاک رس از پاکسازی نشان می‌دهد میزان پارامترهای مقاومتی خاک رس مانند مقاومت فشاری محصور نشده خاک رس بعد از پاکسازی به حدود ۹۲ درصد مقاومت فشاری محصور نشده نمونه خاک در شرایط بدون آلاینده می‌رسد.

بدون آلاینده، خاک آلوده و خاک پاکسازی شده آزمایش فشاری تک‌محوری انجام گرفته است. نتایج این آزمایش در شکل ۱۵ نشان داده شده است.

مطابق انتظار مقاومت خاک بدون آلاینده بیشترین مقدار (0.9085 kg/cm^2) و پس از اضافه کردن آلاینده گازوئیل به میزان ۱۰ گرم مقاومت تک‌محوری خاک تا 0.6989 kg/cm^2 کیلوگرم بر سانتیمترمربع کاهش یافته است. پس از انجام فرآیند الکتروکینتیک و میزان حذف حدود ۵۴ درصد گازوئیل، مقاومت فشاری تا 0.8386 kg/cm^2 کیلوگرم بر سانتیمترمربع افزایش یافته است. با توجه به نتایج به دست آمده فرآیند الکتروکینتیک توانسته با حذف بیش از نیمی از آلاینده خاک، مقاومت فشاری خاک را نیز به میزان قابل توجهی افزایش دهد.



شکل ۱۵- مقایسه نتایج آزمایش تک‌محوری بر روی خاک رس قبل و بعد از حذف گازوئیل

۴- نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر، بهبود روش الکتروکینتیک با کاربرد مواد فعال سطحی ABTS و Saponin به منظور تصفیه خاک آلوده به گازوئیل بررسی شده است. به علت حلالیت کم گازوئیل در الکترولیت آب، این آلاینده بیشتر جذب سطح ذرات خاک می‌شود و از طریق جریان

References

- [1] Reilley, K. A., Banks, M. K., & Schwab, A. P. (1996). Organic chemicals in the environment: dissipation of polycyclic aromatic hydrocarbons in the rhizosphere. *Journal Environmental Quality*, 25, 212-219. doi: 10.2134/jeq1996.00472425002500020002x
- [2] USEPA (2000). *A resource for MGP site characterization and remediation*, EPA/542-R-00-005, Washington, DC.

- [3] Salehian, E. (2012). The possibility of cleaning soil contaminated with diesel fuel with the help of detergents using a laboratory pilot, *Journal of Environmental science and technology*, 14(1), 73-82. [In Persian]
- [4] Berg, M. S., Loehr, R. C., & Webster, M. T. (1998). Release of petroleum hydrocarbon from bioremediated soil". *Journal of Soil Contamination*, 7(6), 675-695. doi: 10.1080/10588339891334537
- [5] Li, J. L. and Chen, B. H. (2002). Solubilization of model polycyclic aromatic hydrocarbons by nonionic surfactants, *Chemical Engineering Science*, 57(14), 2825-2835. doi: 10.1016/S0009-2509(02)00169-0
- [6] Huang, H., Tang, J., Niu, Z., & Giesy, J. P. (2019). Interactions between electrokinetics and rhizoremediation on the remediation of crude oil-contaminated soil, *Chemosphere*, 229, 418-425. doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.04.150
- [7] Pamukcu, S., & Wittle, J. K. (1994). *Electrokinetically enhanced in situ soil decontamination*, In Remediation of hazardous waste contaminated soils, 245-298.
- [8] Saichek, R. E., & Reddy, K. R. (2005). Electrokinetically enhanced remediation of hydrophobic organic compounds in soils: A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 35(2), 115-119. doi: 10.1080/10643380590900237
- [9] Ramírez, E. M., Camacho, J. V., Rodrigo, M. A., & Cañizares, P. (2015). Combination of bioremediation and electrokinetics for the in-situ treatment of diesel polluted soil: A comparison of strategies, *Science of the total environment*, 533, 307-316. doi: 10.1016/j.scitotenv.2015.06.127
- [10] Saichek, R. E., & Reddy, K. R. (2003). Effect of Ph control at the anode for the electrokinetic removal of phenanthrene from kaolin soil, *Chemosphere*, 51(4), 273-287. doi: 10.1016/S0045-6535(02)00849-4
- [11] Acar, Y. B., & Alshwabkeh, A. N. (1993). Principles of electrokinetic remediation. *Environmental Science and Technology*, 27(13), 2638-2647. doi: 10.1021/es00049a002
- [12] Shapiro, A. P., & Probststein, R. F. (1993). Removal of contaminant from saturated clay by electroosmosis, *Environmental Science and Technology*, 27(2), 283-291. doi: 10.1021/es00039a007
- [13] Lambert, P., Fingas, M., & Goldthorp, M. (2001). An Evaluation of Field Total Petroleum Hydrocarbon Contaminated Soil by Composting in biopiles, *Environ. Pollut*, 409-411.
- [14] Pamukcu, S., Weeks, A., & Wittle, J. K. (1997). Electrochemical separation and stabilization of selected inorganic species in porous media, *Journal of Hazardous Materials*, 55(1-3), 305-318. doi: 10.1016/S0304-3894(97)00025-3
- [15] Pazos, M., Rosales, E., Alcántara, T., Gómez, J., & Sanromán, M. A. (2010). Decontamination of soils containing PAHs by electroremediation: A review, *Journal of Hazardous Materials*, 177(1-3), 1-11. doi: 10.1016/j.jhazmat.2009.11.055
- [16] Bahemmat, M., Farahbakhsh, M., & Kianirad, M. (2011). 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*. [In Persian]
- [17] Eykholt, G. R., & Daniel, D. E. (1994). Impact of system chemistry on electroosmosis in contaminated soil, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 120(5), 797-815. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9410(1994)120:5(797)
- [18] Seyed Razavi, S. N., Khodadadi, A., & Ganjidoust, H. (2012). Treatment of Soil Contaminated with Crude-Oil Using Biosurfactants, *Journal of Environmental Studies*, 37(60), 107-116. doi: 20.1001.1.10258620.1390.37.60.11.5 [In Persian]
- [19] Khataei, B., Mokhtarani, N., & Ganjidoust, H. (2017). Removal of crude oil from soil using surfactants-enhanced electrokinetic method, *Sharif Journal of Civil Engineering*, 33(2.1), 107-114. doi: 10.24200/j30.2017.4544 [In Persian]
- [20] Barba, S., Villaseñor, J., Rodrigo, M. A., & Cañizares, P. (2017). Effect of the polarity reversal frequency in the electrokinetic-biological remediation of oxyfluorfen polluted soil, *Chemosphere*, 177, 120-127. doi: 10.1016/j.chemosphere.2017.03.002
- [21] Vocciant, M., Dovì, V. G., & Ferro, S. (2021). Sustainability in ElectroKinetic Remediation Processes: A Critical Analysis, *Sustainability*, 13(2), 770. doi: 10.3390/su13020770
- [22] Lisbeth M. Ottosen, Thomas H., Pernille E., Jensen, Gunvor M., Kirkelund, Henriette Kern-Jespersen, Nina Tuxen, Bente H. Hyldegaard, (2019). Electrokinetics applied in remediation of subsurface soil contaminated with chlorinated ethene A review, *Chemosphere*, 235, 113-125. doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.06.075
- [23] Gidudu, B., & M. Nkhalambayausi Chirwa, E. (2020). Application of Biosurfactants and Pulsating Electrode Configurations as Potential Enhancers for Electrokinetic Remediation of Petrochemical Contaminated Soil, *Sustainability*, 12(14), 5613. doi: 10.3390/su12145613
- [24] Ma, Y., Li, X., Mao, H., Wang, B., & Wang, P. (2018). Remediation of hydrocarbon-heavy metal co-contaminated soil by electrokinetics combined with biostimulation. *Chemical Engineering Journal*, 353, 410-418. doi: 10.1016/j.cej.2018.07.131

- [25] Vaishnavi, J., Devanesan, S., AlSalhi, M. S., Rajasekar, A., Selvi, A., Srinivasan, P., & Govarthanam, M. (2021). Biosurfactant mediated bioelectrokinetic remediation of diesel contaminated environment. *Chemosphere*, 264, 128377. doi: **10.1016/j.chemosphere.2020.128377**
- [26] Ukleja, J. (2020). Stabilization of landslides sliding layer using electrokinetic phenomena and vacuum treatment. *Geosciences*, 10(8), 284. doi: **10.3390/geosciences10080284**
- [27] Saini, A., Bekele, D. N., Chadalavada, S., Fang, C., & Naidu, R. (2020). A review of electrokinetically enhanced bioremediation technologies for PHs, *Journal of Environmental Sciences*, 88, 31-45. doi: **10.1016/j.jes.2019.08.010**
- [28] López-Vizcaíno, R., Yustres, A., León, M. J., Saez, C., Cañizares, P., Rodrigo, M. A., & Navarro, V. (2017). Multiphysics implementation of electrokinetic remediation models for natural soils and porewaters. *Electrochimica Acta*, 225, 93-104. doi: **10.1016/j.electacta.2016.12.102**
- [29] Nasiri, A., Jamshidi-Zanjani, A., & Khodadadi Darban, A. (2019). The Effect of Time and pH on Improving the Efficiency of the Electrokinetic Method for Remediation of the Soil Contaminated by Chromium. *Journal of Mineral Resources Engineering*, 4(4), 111-125. doi: **10.30479/jmre.2019.9945.1213**
- [30] Ghobadi, R., Altaee, A., Zhou, J. L., Karbassiyazdi, E., & Ganbat, N. (2021). Effective remediation of heavy metals in contaminated soil by electrokinetic technology incorporating reactive filter media. *Science of The Total Environment*, 794, 148668. doi: **10.1016/j.scitotenv.2021.148668**
- [31] Cameselle, C. (2021). Enhanced Electrokinetic Remediation for the Removal of Heavy Metals from Contaminated Soils, *Department of Chemical Engineering, BiotechnIA, University of Vigo, 36310 Vigo, Spain*, Appl. Sci.
- [32] Boulakradeche, O. M., Merdoud, O., & Akretche, D. E. (2022). Enhancement of electrokinetic remediation of lead and copper contaminated soil by combination of multiple modified electrolyte conditioning techniques. *Environmental Engineering Research*, 27(4), 210167. doi: **10.4491/eer.2021.167**
- [33] Cai, Z., Sun, Y., Deng, Y., Zheng, X., Sun, S., Romantschuk, M., & Sinkkonen, A. (2021). 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. *Science of the Total Environment*, 785, 147277. doi: **10.1016/j.scitotenv.2021.147277**
- [34] Farahbakhsh, M., Sheikhpouri, H., & Kiani Rad, M. (2018). The effect of PH on electrokinetic modification of a microstructure contaminated with crude oil, *Iranian Soil and Water Research*, 49(3), 483-491. doi: **10.22059/ijswr.2017.38715.666902** [In Persian]
- [35] Taghavi Shirazi, M., Shojaii, A., Aliasl, J., & Aliasl, F. (2018). Natural laundry detergents from the perspective of Iranian traditional medicine. *Journal of Islamic and Iranian Traditional Medicine*, 8(4), 439-449. [In Persian]
- [36] Reddy, K. R., & Saichek, R. E. (2004). Enhanced electrokinetic removal of phenanthrene from clay soil by periodic electric potential application. *Journal of Environmental Science and Health part A*, 39(5), 1189-1212. doi: **10.1081/ESE-120030326**
- [37] Reddy, K. R., & Saichek, R. E. (2003). Effect of soil type on Electrokinetic removal of phenanthrene using surfactants and cosolvents. *Journal of Environmental Engineering*, 129(4), 336-346. doi: **10.1061/(ASCE)0733-9372(2003)129:4(336)**
- [38] Schwab, A. P., SU, J., Wetzal, S., Pekarek, S., & Banks, M. K. (1999). Extraction of petroleum hydrocarbons from soil by mechanical shaking. *Environmental Science and Technology*, 33(11), 1940-1945. doi: **10.1021/es9809758**
- [39] Hatta, M., Measures, C. I., & Ruzicka, J. J. (2019). Determination of traces of phosphate in sea water automated by programmable flow injection: Surfactant enhancement of the phosphomolybdenum blue response, *Talanta*, 191, 333-341. doi: **10.1016/j.talanta.2018.08.045**
- [40] Fan, G., Cang, L., Fang, G., & Zhou, D. (2014). Surfactant and oxidant enhanced electrokinetic remediation of a PCBs polluted soil, *Separation and Purification Technology*, 123, 106-113. doi: **10.1016/j.seppur.2013.12.035**