

تحلیلی بر روش ها و فناوری های بهبوددهنده پاک سازی الکتروکینتیک در خاک های آلوده به منظور دستیابی به فناوری سبز، گامی نوین در توسعه پایدار محیط زیستی

محمد سینا سرمدی^۱، * غلامرضا اسدالله فردی^۲

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی عمران محیط زیست، دانشگاه خوارزمی

۲. استاد دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه خوارزمی

(دریافت: ۱۳۹۶/۱۲/۱۵ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۲/۱۷)

An Analysis of Methods and Technologies for Improving Electrochemical Remediation in Contaminated Soils in Order to Achieve Green Technology, a New Step In Sustainable Environmental Development

Mohammad Sina Sarmadi¹, * Gholamreza Asadollahfardi²

1. Master of Science Student, Civil and Environmental Engineering, Kharazmi University, Tehran, Iran

2. Professor, Faculty of Engineering, Civil Engineering Department, Kharazmi University, Tehran, Iran

(Received: 06/03/2018

Accepted: 07/05/2018)

Abstract:

Recently, many concerns have been raised about the soil contamination as a result of anthropogenic activities associated with the environment. Heavy metals and organic pollutants are the most important pollutants released into the environment. Therefore, to achieve a cost-effective and sustainable technique to remove contaminants is necessary. The Electrokinetic remediation in the development and application of green technologies is able to remove a wide range of pollutants or converting them into compounds with lower toxicity. On the other hand, communication media, as informative tools, can affect social change. This article is intended to be a practical purpose by utilizing the media tool and in the framework of environmental communication through a descriptive-analytical method of the documentary type. This paper also considers the fundamental concepts of electrochemical remediation, considering the challenges facing this process, which leads to reduced efficiency. The removal of pollutants will examine the various techniques and technologies used in electrokinetic to improve the remediation efficiency. At the end of the research, future work to improve the electrokinetic is presented. According to the results of this paper, electrokinetic coupled with various detergents and chemical & biological oxidants greatly helps keep pollutants in solution form by adjusting soil pH. While increasing the efficiency of removing pollutants, and enabling a reduction in energy consumption. While the use of Geo-Synthetic materials reduces electrode corrosion significantly. Also, biological methods, while increasing biodegradability of disintegrating pollutants makes possible to convert electrokinetic into a green technology using a variety of environmentally eco-friendly adsorbent mixtures.

Keywords: Soil Contamination, Electrokinetic Remediation, Green Technology, Sustainable Development, Environmental Communication.

چکیده:

در طول سالیان اخیر نگرانی های بسیاری در رابطه با آلودگی خاک ها در نتیجه فعالیت های انسانی در ارتباط با محیط زیست شکل گرفته است. فلزات سنگین و آلاینده های آلی، از آلاینده های مهم منتشر شده در محیط هستند که دستیابی به روشی مقرون به صرفه و پایدار برای پاک سازی آنها ضروری می باشد. پاک سازی الکتروکینتیک در راستای توسعه و کاربرد فناوری های سبز، قادر است محدوده وسیعی از آلاینده ها را پاک سازی کرده و یا آنها را به ترکیباتی با سمیت کمتر تبدیل کند. از سوی دیگر رسانه های ارتباطی، به عنوان ابزاری آموزش دهنده می توانند تأثیرات فراوانی بر روی تغییرات اجتماعی داشته باشند این پژوهش از نظر هدف کاربردی است و با بهره گیری از ابزار رسانه و در چارچوب ارتباطات محیط زیستی با روش توصیفی - تحلیلی از نوع اسنادی، مفاهیم بنیادین پاک سازی الکتروکینتیک را بررسی کرده است. همچنین با توجه به چالش های پیش روی این فرایند که منجر به کاهش راندمان حذف آلاینده ها می شود، انواع روش ها و فناوری های کاربردی در تصفیه الکتروکینتیک را به منظور ارتقاء عملکرد و راندمان پاک سازی مورد تحلیل قرار داده و در پایان زمینه های تحقیقاتی آبی برای بهبود الکتروکینتیک را ارائه کرده است. یافته های این پژوهش نشان داد که ترکیب تصفیه الکتروکینتیک با انواع شوینده ها با تنظیم pH خاک به جلوگیری از رسوب آلاینده ها در حین فرایند کمک شایانی کرده و ضمن افزایش راندمان حذف آلاینده، امکان کاهش انرژی مصرفی را نیز فراهم می کند. استفاده از مواد ژئوسنتتیک، خوردگی الکترودها را به شکل چشمگیری کاهش داده و روش های زیستی ضمن افزایش زیست دسترس پذیری آلاینده ها با استفاده از انواع مخلوط های جاذب سازگار با محیط زیست امکان تبدیل پاک سازی الکتروشیمیایی به یک فناوری سبز را به ارمغان می آورد.

واژه های کلیدی: آلودگی خاک، پاک سازی الکتروکینتیک، فناوری سبز، توسعه پایدار، ارتباطات محیط زیستی.

* نویسنده مسئول: غلامرضا اسدالله فردی

E-mail: fardi@khu.ac.ir

*Corresponding Author: Gholamreza Asadollahfardi

مقدمه

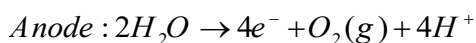
خاک به‌عنوان یک منبع طبیعی، سرمایه ملی و بستر حیات، نقش اساسی در استقرار و رشد جوامع بشری و سایر مخلوقات داشته و درواقع بخشی از زنجیره غذایی موجودات است، به همین دلیل هرگونه آلودگی موجود در خاک می‌تواند در طی زنجیره غذایی، به سطوح بالاتر انتقال یافته و درنهایت در انسان تمرکز یابد (Jamshidi et al., 2013). حرکت به‌سوی فناوری‌های سبز که به مفهوم گسترش فناوری‌های پاک برای به حداقل رساندن تهدیدات سلامت انسانی و محیطی اطلاق می‌شود به کاهش اثرات زیست‌محیطی حاصل از فعالیت مجموعه‌های فناوری کمک کرده و این تأثیرات مثبت توسعه محصولاتی را که از نظر زیست‌محیطی غیر مضر و از نظر اقتصادی توجیه‌پذیر باشد به‌عنوان امری کارگشا در راستای توسعه پایدار زیست‌محیطی به همراه خواهد داشت نیل به این هدف زمانی تحقق می‌یابد که اطلاعات محیط‌زیستی در میان مردم گسترش یافته و مشارکت مردم در حراست از محیط‌زیست از این طریق، افزایش یابد (Bashiri 2017). چراکه کم‌توجهی به نقش راهبردی افکار عمومی در فرایند حفاظت از محیط‌زیست ما را از اقدامی فراگیر و همه‌جانبه مردم‌گرایانه محروم خواهد ساخت. در این میان رسانه‌های عمومی می‌بایست نقش مؤثر خویش را بیابند و به‌عنوان انتقال‌دهنده پیام‌ها در ارتباطات محیط زیستی موردتوجه باشند. تردیدی نیست که از بدیهی‌ترین تأثیرگذاران بر آموزش و تنویر افکار عمومی در نگهداری از محیط‌زیست، رسانه‌ها هستند (Dabiri and Vahednavan, 2011). اهمیت رسانه‌ها در آموزش مردم با آگاهی از این‌که نیروی انسانی توانمند مهم‌ترین دارایی هر سازمان است و امروزه پیشرفت علمی نیروی انسانی سازمان‌ها به‌عنوان یک سیاست کارآمد در رشد و ارتقاء آنها مطرح است (Delnavaz et al., 2017). دوچندان خواهد شد. ایزدی (۲۰۰۹) رسانه را پدیده‌ای فیزیکی دانسته که مشابه متن عمل می‌کند (Izadi, 2009). در فرهنگ لغت نیز مفهوم کلی و تعریف رسانه برای معانی مختلف ارتباطی به کار گرفته می‌شود. با این تعریف، فصلنامه‌های علمی نیز یک رسانه ارتباطی آموزش‌دهنده شمار می‌روند. رسانه‌های جمعی و عمومی می‌توانند نقش مهمی در برقراری ارتباط و ایجاد تأثیرات اجتماعی لازم بر روی مخاطب خود از نقطه‌نظر لزوم توجه به مسائل و بحران‌های محیط زیستی داشته باشند (Carroll and McCombs, 2003). ارتباطات محیط زیستی حوزه‌ای تقریباً نوپا و پراهمیت در راستای انتقال

اطلاعات محیط زیستی به مردم است. فرایندی که باعث ارتقا آگاهی‌های محیط زیستی عموم مردم می‌گردد. در این میان رسانه‌ها نقش بسیار مهمی را در این زمینه ایفا می‌کنند. تصادفات، رویدادها و اتفاقات جهانی، اثرات ناسازگار آلاینده‌های آلی و فلزات سنگین باعث افزایش نگرانی‌های عمومی شده است. آلاینده‌های آلی بسیاری مانند علف‌کش‌های ارگانوکلرین^۱ (OCPs)، بی‌فنیل‌های پلی‌کلرینه^۲ (PCBs)، فتالات استرها^۳ (PAEs)، هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه‌ای^۴ (PAHs) و آلاینده‌های فلزی بسیاری از جمله فلزات سنگین روی (Zn)، آرسنیک (As)، سرب (Pb)، کادمیوم (Cd)، سلیوم (Se)، اورانیوم (U)، جیوه (Hg)، کروم (Cr) و مس (Cu) که به‌صورت عنصر آزاد و ترکیب با عناصر دیگر در طبیعت رها می‌شوند، به داخل ساختمان خاک نفوذ کرده و با سمیت بالا، ماندگاری و تجمع زیستی حتی پس از گذر مدت‌زمان طولانی در داخل خاک باقی می‌مانند (Khalid et al., 2017, Sun et al., 2018). در نتیجه پاک‌سازی خاک‌های آلوده به فلزات سنگین و آلاینده‌های آلی امری ضروری است (Cheng et al., 2016). تلاش‌های بسیاری برای حل مشکل آلودگی خاک‌ها انجام شده است و استراتژی‌ها و روش‌های بسیاری برای کاهش و کنترل آلودگی‌ها به کار گرفته شده است (Cheng et al., Xu et al., 2012). از جمله روش‌های تصفیه می‌توان به پاک‌سازی الکتروکینتیک به‌عنوان یک روش فیزیکی جدید، مقرون به‌صرفه (Khalid et al., 2017) و در حال توسعه، با تولید تعداد محدودی از آلاینده‌های ثانویه برای تصفیه فلزات سنگین، آلاینده‌های آلی و رادیونوکلئیدها به‌ویژه از خاک‌های باقابلیت نفوذپذیری کم و خاک‌های ناهمگن اشاره کرد (Bahemmat et al., Chirakkara et al., 2015, Shin et al., 2016). لازم به ذکر است که تعدادی از محققان این روش را در طبقه‌بندی روش‌های شیمیایی تصفیه خاک‌های آلوده قرار داده‌اند (Pham, 2014). با توجه به محدودیت‌ها و عوامل مؤثر بر کارایی تصفیه الکتروکینتیک نظیر تأثیر تغییرات pH در حالت شیمیایی آلاینده‌ها و احتمال رسوب آلاینده‌ها در اثر تولید یون‌های OH⁻ ناشی از واکنش‌های الکترولیز آب، تغییر جهت جریان الکترواسمز از کاتد به سمت آند در اثر تغییر علامت پتانسیل زتای خاک از

1. Organ Chlorine
2. Polychlorinated Biphenyl
3. Phthalate Esters
4. Polycyclic Aromatic Hydrocarbon

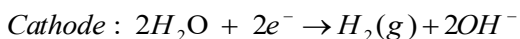
(and Alshawabkeh, 1993).

معادله (۱): اکسایش در آند



$$E_0 = -1.229 \text{ Anode}$$

معادله (۲): کاهش در کاتد



$$E_0 = -0.828 \text{ Cathode}$$

گرادیان الکتریکی برحسب (v/cm) که بنا به تعریف اختلاف پتانسیل الکتریکی عبوری برحسب ولتاژ بر سانتی متر عبوری از الکترود در زمین آلوده می باشد (Saeedi and Komreyi, 2013)، باعث ایجاد تحرک در گونه های باردار خاک، یون ها و مایع میان حفره های خاک به سمت الکترودها می شود. مکانیسم های اصلی در تصفیه الکتروکینتیک الکترواسمز^۱ و مهاجرت یونی^۲ نامیده می شوند. مکانیسم مهاجرت یونی که به حرکت یون ها از قبیل یون های H^+ و OH^- انواع کاتیون ها، آنیون ها و همچنین ترکیبات آلی قابل یونیزه شدن در اثر اعمال جریان الکتریکی به سمت الکترود با بار مخالف اطلاق می شود، تابعی از فرایند الکتروکینتیک است، که بستگی به اندازه حفره های خاک نداشته و عملکردی مشابه در خاک های ریزدانه و درشت دانه دارد. فرایند الکترواسمز که حرکت آب نسبت به خاک تحت تأثیر گرادیان الکتریکی است، اجزاء غیر یونی، چه آلی و چه غیر آلی را منتقل می کند. از آنجاکه کاتیون های بیشتری نسبت به آنیون ها در خاک های رسی دارای بار سطحی منفی وجود دارند، جهت جریان آب به سمت کاتد است. این جریان، جریان الکترواسمز^۳ نام داشته و به مشخصات به خصوصیات سیال مانند ثابت دی الکتریک، ویسکوزیته و همچنین خصوصیات سطحی خاک مثل پتانسیل زتا و گرادیان ولتاژ بستگی دارد. پتانسیل زتا خود تابع پارامترهای بسیاری از جمله ماهیت و خصوصیات شیمیایی ذرات خاک، pH و درجه حرارت و همچنین قدرت یونی سیال منفذی است (Cameselle, 2015). جابه جایی ذرات باردار، کلوئیدها یا میسل ها تحت تأثیر میدان الکتریکی پدیده الکتروفورز نامیده می شود (Lockhart, 1983). در شکل ۱ طرح شماتیک واکنش های الکتروشیمیایی پدیده الکتروکینتیک نشان داده شده است.

منفی به مثبت، خوردگی الکترودها در اثر واکنش های شیمیایی با آلاینده ها که منجر به کاهش راندمان حذف آلاینده ها می شود، شناخت انواع روش ها و فناوری های کاربردی به منظور غلبه بر این محدودیت ها و ارتقای راندمان پاک سازی الکتروکینتیک امری مهم و حائز اهمیت است (Blaser et al., 2000). این مقاله با بهره گیری از ابزار رسانه و در چارچوب ارتباطات محیط زیستی با روش توصیفی-تحلیلی از نوع اسنادی، مروری جامع بر روش های بهبوددهنده تصفیه الکتروکینتیک در خاک های بانفوذ پذیری کم شامل خاک ها و رسوبات رسی طبیعی و مصنوعی، آغشته به آلاینده های مختلف از جمله فلزات سنگین و ترکیبات آلی داشته و جدیدترین فناوری های شیمیایی و بیولوژیکی بهبود دهنده پاک سازی الکتروشیمیایی را که تاکنون توسط دیگر محققین کمتر مورد توجه قرار گرفته، مورد بررسی قرار داده و در نهایت پیشنهادها و زمینه های تحقیقاتی مورد نیاز (Gap) را برای ارتقاء بهتر و بیشتر پاک سازی الکتروکینتیک ارائه کرده است.

روش شناسی پژوهش

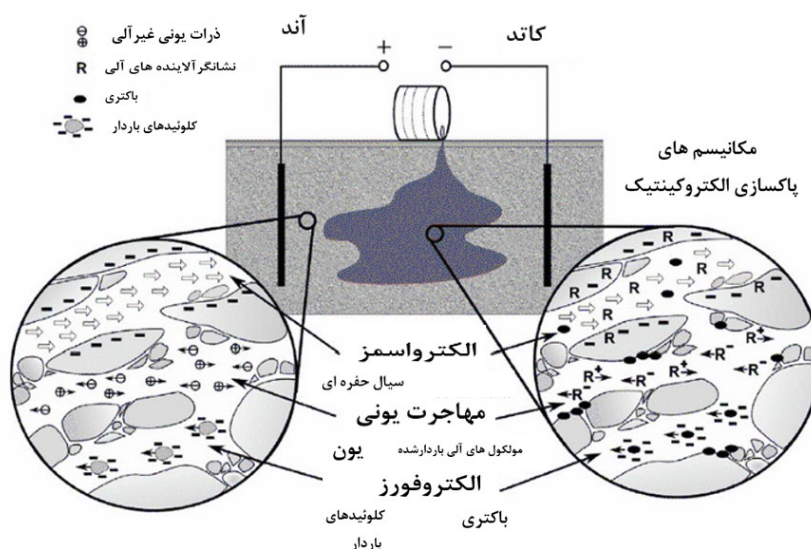
پژوهش حاضر از نظر هدف، کاربردی است و بر مبنای ماهیت و روش نیز می توان آن را در گروه تحقیقات توصیفی از نوع تحلیل اسنادی قرارداد که مبتنی بر شواهد برگرفته از مطالعه اسنادی است و عمدتاً شامل اطلاعات، یافته ها و نتایجی است که توسط نویسندگان و پژوهشگران قبلی در حوزه مورد بحث فراهم گردیده اند و محققین در این راستا تلاش کرده اند که به درک و تحلیل نوشته های دیگران بپردازند. این پژوهش، مروری جامع بر روش های بهبوددهنده تصفیه الکتروکینتیک در خاک های با نفوذ پذیری کم داشته و جدیدترین فناوری های شیمیایی و زیستی بهبوددهنده پاک سازی الکتروشیمیایی خاک را مورد بررسی قرار داده است.

یافته های تحقیق

مفاهیم بنیادین الکتروکینتیک پایه

مکانیسم های اصلی تصفیه الکتروکینتیک متکی بر اعمال چگالی جریان مستقیم DC تحت ولتاژ ثابت به داخل نمونه خاک از طریق دودسته الکترود آند و کاتد است، مطابق معادلات (۱) و (۲) در مخازن آند و کاتد واکنش های الکترولیز آب رخ داده که با تولید H^+ در آند و OH^- در کاتد شرایط اسیدی و بازی به ترتیب در این مخازن به وجود می آید (Acar

1. Electro-Osmosis
2. Electromigration
3. Electro-Osmosis Flow



شکل ۱. طرح شماتیک واکنش‌های الکتروشیمیایی پدیده الکتروکینتیک (Gill et al., 2014)

زتای خاک از منفی به مثبت منجر به وقوع پدیده الکترواسمز معکوس از کاتد به سمت آند شده و کارایی پاک‌سازی الکتروشیمیایی را کاهش می‌دهد. برای حذف کارآمد به روش الکتروکینتیک، ضروری است حتی‌الامکان از ایجاد رسوب و وقوع جریان الکترواسمز معکوس جلوگیری کرده و یا با استفاده از روش‌ها و فناوری‌های ترکیب‌شونده، به محلول شدن رسوب حاصل از واکنش فلزات و مواد شیمیایی در pH های مختلف کمک کرد از این‌رو در مطالعات بسیاری مشاهده شده است که راندمان مناسب در استفاده‌ی تنها از روش الکتروکینتیک برای پاک‌سازی آلاینده‌های موجود در خاک به دست نیامده است. به همین منظور استفاده از روش‌ها و فناوری‌هایی برای بهبود راندمان تصفیه ضروری به نظر می‌رسد (Blaser et al., 2000, Virkutyte et al., 2002, Sharma and Reddy, 2004). به‌طور کلی روش‌ها و فناوری‌های بهبوددهنده فرایند الکتروکینتیک، به ۳ گروه دسته‌بندی می‌شوند: ۱. روش‌های فیزیکی (Ren et al., 2014) و فیزیکی-شیمیایی (Lim et al., 2016) که آلاینده‌ها را در خاک حل و آنها را در فاز محلول نگه می‌دارد که این امر از طریق کنترل pH خاک و استفاده از استخراج‌کننده‌های شیمیایی و بیولوژیکی صورت می‌پذیرد (تکنیک انحلال آلاینده)؛ ۲. فناوری‌های شیمیایی که با الکتروکینتیک ترکیب‌شده و تجزیه آلاینده و تبدیل آن به ترکیبات با سمیت کمتر را بهبود می‌بخشند (فناوری‌های ترکیبی شیمیایی) (Yeung and Gu, 2011)؛ ۳. فناوری‌های بیولوژیکی که با الکتروکینتیک ترکیب‌شده و با استفاده از

در پاک‌سازی الکتروکینتیک، تنها آلاینده‌های متحرک یا به‌عبارت‌دیگر تنها آلاینده‌های محلول و جذب‌شده به ذرات کلونیدی معلق در مایع منفذی خاک قابلیت حذف و پاک‌سازی دارند (Yeung and Gu, 2011). با اعمال جریان الکتریکی مستقیم واکنش‌های الکترولیز آب در الکترودها صورت می‌پذیرد و یون‌های هیدروژن و هیدروکسید تولیدشده با سرعت‌های متفاوت به سمت الکترودها با بار مخالف حرکت کرده تا به یکدیگر برسند و در حین این جابه‌جایی و عبور از خاک، pH خاک را نیز تغییر می‌دهند. رسوب و انحلال ذرات آلودگی حین فرایند الکتروکینتیک می‌تواند کارایی حذف فرایند را عمیقاً تحت تأثیر قرار دهد. انحلال رسوبات از یون‌های هیدروژن تولیدشده در آند که در خاک‌آلوده حین حرکت به سمت کاتد محیط خاک را اسیدی می‌کند تأثیر پذیرفته و موجب انحلال هیدروکسید فلزات و کربنات‌ها می‌شوند. درحالی‌که در برخی از انواع خاک‌ها، از مهاجرت یون‌های هیدروژن (H^+) به دلیل بالا بودن ظرفیت بافری خاک، جلوگیری می‌شود. حضور یون‌های هیدروکسید (OH^-) در محفظه کاتد موجب افزایش pH (pH 10-12) در محلول الکترودها و خاک محدوده نزدیک به کاتد می‌شود. در محیط با pH بالا، فلزات سنگین رسوب می‌کنند و حرکت آلاینده‌ها متوقف می‌شود.

حین پاک‌سازی الکتروکینتیک، فلزات سنگین به سمت کاتد حرکت می‌کنند تا به محدوده با pH بالا برسند و در این محدوده فلزات سنگین تجمع و سرانجام رسوب کرده و موجب انسداد منافذ خاک می‌شوند و فرایند الکتروکینتیک را مختل می‌کنند. همچنین تغییرات pH خاک با تغییر علامت پتانسیل

خاک مانع از تشکیل ترکیبات پیچیده یا رسوب آلاینده‌ها می‌شوند (Huang et al., 2012, Gan et al., 2009, Villen-Guzman et al., 2014, Asadollahfardi et al., 2017).

ترکیبات کیلایت کننده^۲ و عوامل کمپلکس ساز^۳

ترکیبات کیلایت کننده با تشکیل بیش از دو پیوند جداگانه بین لیگاندهای دوگانه و چندگانه و عوامل کمپلکس ساز با تشکیل کمپلکس‌های کئوردیناسیونی با به دام انداختن یون باردار در هسته مرکزی خود، با عملکرد اصلی انحلال، جذب ذرات آلاینده از سطح خاک و کاهش زتا پتانسیل سطح ذرات خاک برای پاک‌سازی فلزات سنگین توسط محققین استفاده شده است (Yeung and Gu, 2011; Manahan, 2013). کیلایت کننده‌های آلی شامل اسیدسیتریک^۴ و اسید استیک^۵ بوده و ترکیبات غیر آلی همچون اتیلن دی آمین تترا استیک اسید^۶ (EDTA)، دی اتیلن تری آمین پنتا استیک اسید^۷ (DTPA) می‌باشند (Reddy Virkutyte et al., 2002, and Cameselle, 2009, Yeung and Gu, 2011). یکی از مشکلات عوامل کیلایت کننده تولید ترکیبات و کمپلکس‌های کیلایت-فلز در پساب خروجی از کاتد می‌باشد. بنابراین تصفیه ثانویه مایع خروجی امری دشوار بوده که بایستی توسط روش‌های مختلف صورت پذیرد. به‌علاوه تعدادی از ترکیبات کیلایت کننده نظیر EDTA در حالت آزاد سمی و خطرناک می‌باشند بنابراین به‌منظور کاهش پتانسیل خطرات زیست‌محیطی EDTA از یک عامل کیلایت کننده قابل تجزیه بیولوژیکی به نام اتیلن دی آمین دیساکسینیک اسید (EDDS^۸) استفاده می‌شود که به‌آسانی توسط سیستم لجن فعال تصفیه می‌شود (Schowanek et al., 1997, Takahashi et al., 1997, Meers et al., 2005, Wang et al., 2012). برخی از مهم‌ترین عوامل کمپلکس ساز عبارت‌اند از: I^- و Cl^- و NH_3^- و OH^- که به‌عنوان اسید یا باز کنترل‌کننده pH به خاک اضافه می‌شوند (Yeung and Gu, 2011).

میکروارگانیسم‌ها، تجزیه آلاینده‌ها و تبدیل آنها به ترکیبات سازگارتر با محیط را بهبود می‌بخشند (فناوری‌های ترکیبی بیولوژیکی) (Gomes et al., Yeung and Gu, 2011, 2012).

الکتروکینتیک بهبود یافته با تکنیک‌های فیزیکی و

فیزیکی شیمیایی

کنترل pH خاک:

در نتیجه برقراری جریان مستقیم (DC) که وقوع واکنش‌های الکترولیز آب را به همراه دارد، یون H^+ به وجود آمده در آند تولید جبهه اسیدی کرده و به سمت کاتد مهاجرت می‌کند که در خاک‌های با ظرفیت بافری پایین می‌تواند استخراج فلزات را باراندمان معقول به دست دهد؛ اما در خاک‌های خنثی با ظرفیت بافری اسیدی یا بازی بالا، خنثی‌سازی یون OH^- تولید شده در کاتد نیازمند به‌کارگیری استراتژی‌های مختلف کنترل pH است که مهم‌ترین آنها عبارت‌اند از: (Yeung and Gu, 2011): شرایط الکترود، چرخش الکترولیت یا چرخش الکترولیت بهبود یافته (Zhu et al., 2016). الکتروکینتیک غیریکنواخت، غشاهای تبادل یونی یا دیواره‌ها (Yeung and Alshawabkeh et al., 1999, Gu, 2011, Kim et al., 2015, Shi et al., 2016) البته بایستی توجه کرد زمانی که pH خاک پایین‌تر از نقطه شارژ صفر^۱ (PZC) یعنی مقداری از pH که در آن مجموع بارهای الکتریکی صفر بوده که در مقادیر کمتر از آن سطوح ذرات خاک دارای بار مثبت و در مقادیر بیشتر از آن سطوح ذرات خاک دارای بار منفی می‌باشند، قرار بگیرد، به دلیل تأثیر مستقیم بر پتانسیل زتای سطح ذرات خاک، جهت جریان الکترود اسمز معکوس شده (از کاتد به سمت آند) که این امر از مهاجرت یون‌های کاتیونی آلاینده به سمت آند جلوگیری خواهد کرد (Moghadam et Yeung and Gu, 2011, al., 2016).

استفاده از استخراج‌کننده‌های شیمیایی و بیولوژیکی

واکنش‌گرهای شیمیایی و بیولوژیکی بر اساس خصوصیات فیزیکی و شیمیایی محلول‌ها و آلاینده‌ها و خاک، سعی در جلوگیری از نفوذ جبهه بازی تولید شده در کاتد به داخل خاک داشته و با افزایش واجذبش و کاهش سطح تماس آلاینده‌ها با

2. Chelants
3. Complexing Agents
4. Citric Acid
5. Acetic Acid
6. Ethylene Diamine Tetra Acetic Acid
7. Diethylene Triamine Penta Acetic Acid
8. Ethylenediamine-N,N'-Disuccinic Acid

1. Point Of Zero Charge

مواد فعال سطحی^۱، مواد فعال سطحی بیولوژیکی^۲ و کمک حلال‌ها

شوینده‌ها یا مواد فعال‌کننده سطحی مولکول‌هایی دوگانه دوست هستند که دارای یکسر آب‌دوست و یکسر آب‌گریز می‌باشند (Von Lau et al., 2014) که از آنها برای به حرکت درآوردن آلاینده‌ها استفاده می‌شود. شوینده در لایه‌مرزی بین محلول و آلاینده عمل می‌کند. قسمت آب‌گریز به سمت آلاینده متمایل و به آن متصل می‌شود و قسمت آب‌دوست با آب پیوند هیدروژنی برقرار کرده و حلالیت فاز غیرآبی مایعات را به‌وسیله‌ی کاهش کشش سطحی یا بین سطحی مشترک هوا-آب و آب-آلاینده افزایش داده و از طریق دو مکانیسم انحلال آلاینده و یا ایجاد تحرک در آلاینده باعث جدا شدن آلاینده از سطح آلودگی، و درنتیجه حذف آلاینده می‌گردد (Kosaric, 2001, Chadwick, 1988, Holmberg et al., 2002, Urum and Pekdemir, 2004). سورفکتانت تا بر اساس ماهیت سرگروه بخش قطبی خود به ۴ دسته طبقه‌بندی می‌شوند: ۱. سورفکتانت‌های کاتیونی مثل CTAC^۳ ۲. سورفکتانت‌های آنیونی مانند انواع ترکیبات سولفونات نظیر سدیم دو دیزل سولفونات (SDS^۴)، ای بی تی اس^۵ ABTS (Huang et al., 2012) ۳. سورفکتانت‌های زوتریونی و سورفکتانت‌های غیر یونی (Ishiguro and Koopal, 2016). سورفکتانت‌های غیر یونی کمتر جذب خاک شده، غلظت میسل کمتری نسبت به نوع کاتیونی داشته و همچنین نسبت به نوع یونی مقرون‌به‌صرفه‌ترند (Mehrasebi Pazos et al., 2010, et al., 2013, Ammami et al., 2015). ازجمله سورفکتانت‌های غیر یونی می‌توان به توئین ۸۰^۶ و تریتن ایکس ۱۰۰^۷ اشاره کرد (Huang et al., 2012). کمک حلال‌ها با افزایش انحلال‌پذیری آلاینده‌ها در آب و کاهش سطح تماس بین آلاینده و آب باعث افزایش تحرک پذیری و واجذبش آلاینده‌های آلی می‌شوند (Pazos et al., 2010). ازجمله کمک حلال‌های مرسوم می‌توان به متانول، اتانول، پروپانول^۹ که گسترده‌ترین کاربرد را در فرایند الکتروکینتیک

داشته و ان-بوتیل آمین^{۱۰} اشاره کرد (Huang et al., 2012). بیوسورفکتانت‌ها مانند سیکلودکسترین‌ها^{۱۱} که به نقل از کو و همکاران (2000) یکی از بهترین حلال‌ها برای ترکیبات آلی هستند (Ko et al., 2000) از تجزیه میکروبی سلولزی به‌وسیله باکتری‌ها، مخمر و قارچ‌ها دست می‌آیند و با داشتن حفره‌ای با قطبیت کم، توانایی به دام انداختن آلاینده‌های آلی را در زنجیره‌های خود را دارند (Von Lau et al., 2014). ازجمله پرکاربردترین شوینده‌های زیستی می‌توان به ترکیباتی مانند: بتا سیکلودکسترین^{۱۲} (BCD)، هیدروکسیل پروپیل بتاسیکلو دکسترین^{۱۳} (HPCD)، متیل بتاسیکلو دکسترین^{۱۴} (MCD) و کربوکسی متیل بتا سیکلودکسترین^{۱۵} (CMCD) که در روش الکتروکینتیک به‌منظور شستشوی خاک‌های آلوده به آلکان‌ها، هیدروکربن‌های هالوژنه، ترکیبات بنزن، ترکیبات فنول، بی فنیل‌های پلی کلرینه، هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه‌ای (PAHs) و نیتروبنزن‌ها استفاده شده است، اشاره کرد (Gan et al., 2009, Khodadoust et al., 2006, Huang et al., 2012, Ishiguro and Koopal, 2016). از مطالعات انجام‌شده در زمینه بهبود الکتروکینتیک با استفاده از شوینده‌های بیولوژیکی و شیمیایی می‌توان پژوهش وانگ و همکاران (۲۰۱۰) در پاک‌سازی خاک مصنوعی آلوده به فنانترن و سرب با استفاده از بیوسورفکتانت گلایسین بتا سیکلودکسترین^{۱۶} و دستیابی به راندمان حذف حدود ۸۰ درصد برای این دو نوع آلاینده را نام برد (Wang et al., 2010). همچنین فونسکا و همکاران (2011) با استفاده از EDTA و توئین ۸۰ و بریج ۳۵^{۱۷} راندمان حذف این دو آلاینده را حدود ۵۰ درصد اعلام کردند (Fonseca et al., 2011). در ادامه آلکانترا و همکاران (2012) این دو آلاینده را با استفاده از ترکیب محلول اسیدسیتریک و EDTA و توئین ۸۰ و بریج ۳۵ و توئین ۲۰ ۱۸ یک‌بار از خاک مصنوعی و یک‌بار از خاک طبیعی باراندمان حذف به ترتیب ۹۰ و ۷۰ درصد پاک‌سازی کردند (Alcántara et al., 2012). یان و لو (2013) نفتالن، مس، سرب و روی را از خاک مصنوعی ماسه با استفاده

10. N-Butylamine

11. Cyclodextrin

12. Beta-Cyclodextrin

13. Hydroxypropyl-0-Cyclodextrin

14. Methyl-Beta-Cyclodextrin

15. Carboxy Methyl Cyclodextrin

16. Glycine-β-Cyclodextrin

17. Brij 35

18. Tween®20

1. Surface Active Agent ABVR: Surfactants

2. Biosurfactant

3. Cetyltrimethylammonium Chloride

4. Sodium Dodecyl Sulfate

5. 2,2'-Azino-Bis-(3-ethylbenzthiazoline-6-sulfonic acid

6. Zwitterionic

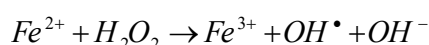
7. Tween® 80

8. Triton X-100

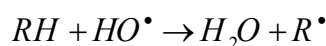
9. Methanol, Ethanol, Popanol

(Koprivanac and Kušić, 2007). فرایند فنتون شامل ۲ گام اصلی است ۱. اکسیداسیون آهن ۲ ظرفیتی Fe^{2+} به Fe^{3+} با کاتالیزر و تجزیه ی H_2O_2 همان گونه که در معادله ۳ مشاهده می شود. ۲. تجزیه آلاینده های آلی به وسیله ی رادیکال های هیدروکسید از طریق فرایند اکسیداسیون همان گونه که در معادله ۴ نشان داده شده است (Yeung and Gu, 2011).

۱. تجزیه هیدروژن پرواکسید H_2O_2 و تولید رادیکال هیدروکسیل در کنار تولید Fe^{3+} ناشی از اکسایش Fe^{2+} معادله (۳)



۲. تجزیه آلاینده ها توسط رادیکال هیدروکسید تولید شده معادله (۴)



۳. تولیدات ثانویه واکنش های شیمیایی معادله (۵)



تولیدات ثانویه واکنش های شیمیایی که در معادله (۵) نشان داده شده است می تواند به وسیله مکانیسم های رادیکالی تا تجزیه کامل ماده آلی ادامه یابد اگرچه معادله (۳) معمولاً به عنوان واکنش فنتون شناخته می شود. در این واکنش ها حضور آهن به عنوان کاتالیست تلقی می شود بنابراین فرایند فنتون به طور گسترده برای تخریب آلاینده های آلی مثل بنزن، فنول و کلرو فنول در فاضلاب یا آب آشامیدنی به کار می رود (Yeung and Gu, 2011). متداول ترین اکسیدکننده های مورد استفاده در این روش عبارت اند از: پتاسیم پرمنگنات (Cang et al., 2013, Ren et al., 2012, Ren et al., 2014, Chowdhury, 2016, al., 2014) اوزون، هیپوکلریت، پر سولفات (Ren et al., 2014) اسیدهای مانند اسید نیتریک و اسید هیدروکلریک، هیدروژن پر اکسید، هیپوکلریت کلرین، کلرین دی اکسید، پتاسیم پرمنگنات و واکنش گرهای فنتون (هیدروژن پر اکسید و آهن) (CangGomes et al., 2012, et al., 2013). استفاده از اسیدهای نامناسب ممکن است موجب ایجاد خطر برای سلامتی و همچنین ایجاد فرآورده های نامطلوب در خاک شود به طور مثال استفاده از اسید هیدروکلریک باعث افزایش میزان غلظت کلر در آب های زیرزمینی و موجب تولید بعضی از نمک های کلریدی نامحلول مانند کلرید سرب شده و در صورت رسیدن به مخزن آند باعث

از ترکیب EDTA پرسولفات فعال و آهن^۱ و همچنین ترکیب EDDS پرسولفات فعال و آهن^۲، تا میانگین ۴۰ درصد حذف کردند (Yan and Lo, 2013). هالاداکیس و همکاران (2014) با انجام تحقیق بر روی رسوبات دریایی آلوده به ۱۶ نوع PAHs^۳ و ۶ فلز سنگین متغیر با استفاده از ترکیبی از سورفکتانت توئین ۸۰ و کیلایت کننده ی اسیدسیتریک و پلاکسامر ۴۰۷^۴ و نانیدت پی ۴۰^۵ راندمان حذف بین ۵ تا ۸۸ درصد برای فلزات سنگین و ۴۸ درصد برای PAHs را به ارمان آوردند (Hahladakis et al., 2014). آماسی و همکاران (2015) به منظور بررسی سورفکتانت توئین ۲۰ و بیوسورفکتانت رامنولیبید از رسوبات لایروبی شده از یک بندر آلوده به مخلوط فلزات سنگین و PAHs استفاده نمودند (Ammami et al., 2015).

بهبود الکتروکینتیک با استفاده از مکانیسم اکسایش و کاهش (ریداکس)

بهبود تصفیه الکتروکینتیک بر اساس مکانیسم اکسایش و کاهش با استفاده از اضافه کردن اکسیدکننده ها و عوامل کاهش دهنده شیمیایی و میکروبیولوژی به منظور بهبود تجزیه و استخراج محدوده گسترده ای از انواع آلاینده های آلی و غیر آلی به صورت درجا صورت می گیرد (Yeung and Gu, 2011). بیشترین مطالعات انجام شده بر روی فناوری اکسیداسیون در مهندسی محیط زیست بر روی فرایند فنتون بوده است که سال ۱۹۳۰ در پی کشف واکنش رادیکال هیدروکسیل به روشی پر کاربرد برای پاک سازی آلاینده های آلی و غیر آلی از فاضلاب و خاک مبدل گردید (Ren et al., 2014). با استفاده از پدیده فنتون با ایجاد شرایط اسیدی در مخزن آند در کنار حرکت آلاینده های آلی و غیر آلی توسط مکانیسم های مهاجرت یونی و جریان الکترواسمز آلاینده های آلی به وسیله ی رادیکال هیدروکسیل آزاد فرایند فنتون تجزیه شده که این امر توسط یک کاتالیزور $Fe(II)$ یا محلول کیلایت کننده دارای $Fe(II)$ راندمان تولید رادیکال هیدروکسید افزایش می یابد (Huang et al., 2012). همه فرایندهایی که شامل واکنش های کاتالستی بین هیدروژن پر اکسید H_2O_2 و آهن دو ظرفیتی Fe^{2+} است را می توان در غالب فرایند فنتون قرارداد

1. Fe EDTA-Activated Per Sulfate
2. Fe EDDS-Activated Per Sulfate
3. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons
4. Poloxamer 407
5. Nonidet P40

دی‌اکسید و آب به‌خصوص برای آلاینده‌های آلی فراهم می‌شود (Yeung and Gu, 2011, Wick et al., 2007), Mena et al., 2015, Gomes et al., 2012). مکانیسم‌های اصلی در ترکیب الکتروکینتیک و تجزیه زیستی برای میکروارگانیسم‌ها الکترواسمز و الکتروفورز، برای آلاینده‌ها مهاجرت یونی و الکترواسمز و برای مواد مغذی مهاجرت یونی می‌باشد (Da Rocha et al., Wick et al., 2004). اعمال یک جریان مستقیم از ۰.۳ تا ۱ میلی‌آمپر در هر سانتی‌متر از خاک‌آلوده هیچ‌گونه اثر عمده‌ای بر میکروارگانیسم‌ها ندارد اما اثرات منفی ثانویه اغلب ناشی از تغییرات pH در مجاورت الکترودهاست این تغییرات pH می‌تواند باعث تغییر در ویژگی‌های برخی آلاینده‌ها شود به‌عنوان مثال پنتاکلوروفنول (PCP)^۵ در pH=2 چربی‌دوستی بیشتری داشته و می‌تواند سمیت سیستم را در نزدیکی آند افزایش دهد. به‌علاوه واکنش‌های ثانویه الکترودی می‌توانند گاز کلرین (Cl_2) و پر اکسید هیدروژن (H_2O_2) تولید کند که موجب اختلال در اجتماع باکتریایی مجاور الکترودها شود (Nikzad and Yousefi Kebriya, 2014).

دیواره‌های تراوایی نفوذپذیر بیولوژیکی

دیواره‌های تراوایی نفوذپذیر نوعی از فناوری‌های جدید برای کنترل آلودگی و پاک‌سازی آلاینده‌های موجود در فاز مایع است که از طریق انواع واکنش‌های فیزیکی و شیمیایی و بیولوژیکی به وجود آمده بین پرکننده PRB^۶ و آب آلوده این هدف را محقق می‌سازند (Liu and Gao, 2017). مواد واکنش‌دهنده و پرکننده دیواره‌ها انواع مخلوط‌های جاذب سازگار با محیط‌زیست از قبیل کربن فعال و فسفات (Roehl et al., 2005) سیپولیت (Fu et al., 2015)، ضایعات کشاورزی، ذرات خاکستر بادی، زئولیت سنتز شده از خاکستر بادی و نانو ذرات آهن و منگنز می‌باشند (Fan et al., 2018). استفاده از دیواره‌های تراوایی بیولوژیکی به‌منظور ایجاد ناحیه‌های واکنش را برای احتمال برخورد بیشتر آلاینده با میکروارگانیسم‌ها در سال‌های اخیر موردتوجه بوده است. در شکل ۲ به‌صورت شماتیک ترکیب الکتروکینتیک و دیواره‌های تراوایی بیولوژیکی نشان داده‌شده است (Mena et al., 2016).

تولید گاز کلر در اثر واکنش الکترولیز می‌شود (Pazos et al., 2010). به‌عنوان نمونه از مطالعات کاربردی استفاده اکسیدان‌ها می‌توان به مطالعات تسای و همکاران (2010) در پاک‌سازی خاک‌آلوده به گازوئیل اشاره کرد (Tsai et al., 2010). کانگ و همکاران (2013) با اضافه کردن اکسیدان‌های مختلف به خاک‌آلوده به پیرن متوجه شدند که پتاسیم پرمنگنات نقش به‌سزا و مؤثری در تجزیه آلاینده پیرن دارد (Cang et al., 2013). کامسل و ردی (2013) با انجام آزمایش بر روی خاک کائولن آلوده به فنانترن و نیکل با غلظت ۵۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم با استفاده از کاتالیزر آهن و هیدروژن پر اکسید ۱۰ درصد راندمان حذف فنانترن را در دو آزمایش جداگانه حدود ۳۰ درصد گزارش نمودند (Cameselle and Reddy, 2013). فان و همکاران (2014) در پاک‌سازی خاک طبیعی یک مرکز دفن آلوده به PCBs با اضافه کردن سورفکتانت ایگپال ۷۲۰^۱ در آند و اکسیدکننده پر سولفات در کاتد مقدار بهینه‌ی این دو بهبود دهنده را به‌منظور حذف PCBs^۲ برای سورفکتانت ۲ درصد و برای اکسیدکننده ۲۰ درصد به دست آورده و همچنین بیشترین میزان حذف PCBs را ۳۸ درصد اعلام کردند. فان و همکاران (2016) همچنین با ارزیابی روش‌های مختلف فعال‌سازی پر سولفات، استفاده از پر اکسید و قرار دادن pH در محدوده pH قلیایی را مؤثرترین روش برای پاک‌سازی PCBs دانستند.

الکتروکینتیک و تجزیه زیستی

الکتروکینتیک بهبودیافته با پاک‌سازی زیستی یا بایوالکتروکینتیک^۳ با افزایش زیست دسترسی آلاینده‌های قابل تماس و مواد مغذی، از نظر کاتابولیکی^۴ برای میکروارگانیسم‌های فعال، موجب بهبود زیست پالایی می‌گردد. این امر با کاهش موانع فاصله‌ای و افزایش تماس بین مواد و آلاینده‌های در حال واجدیش از شبکه متخلخل خاک صورت می‌گیرد (Da Rocha et al., Wick et al., 2004). پذیرنده‌های الکترون یا منبع کربن و مواد مغذی مثل نیترات و فسفات به‌وسیله فرایندها و توابع انتقال‌دهنده جریان الکتروکینتیک به یکدیگر رسانده شده و از این طریق امکان تجزیه آلاینده‌ها و تبدیل آنها به ترکیبات ساده‌تر نظیر کربن

1. Igepal CA-720

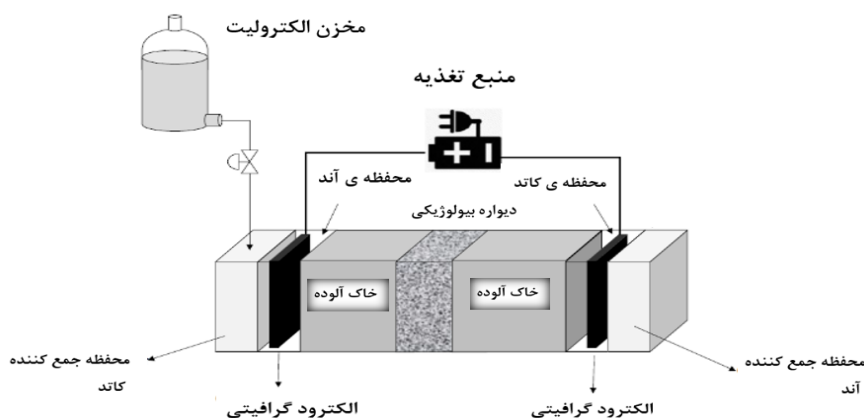
2. Polychlorinated Biphenyl

3. Electro Kinetic Enhanced Bioremediation or Electro-Bioremediation

4. Catabolic

5. Pentachlorophenol

6. Permeable Reactive Barrier



شکل ۲. شماتیک الکتروکینتیک ترکیبی با دیواره های تراوایی بیولوژیکی (Mena et al., 2016)

مقاومت و کاهش جریان عبوری شده و راندمان پاک سازی الکتروکینتیک را کاهش می دهند. جدول ۱ نرخ خوردگی برای ۳ نوع مواد آندی معمول مورد استفاده ارائه شده است.

جدول ۱. میزان نرخ خوردگی مواد متداول مصرفی برای الکتروود

جنس آند	جرم اتمی (AMU)	واکنش اکسیداسیون	تعداد الکترون	نرخ خوردگی $\text{Kg.A}^{-1}\text{year}^{-1}$
آهن	۵۵.۸۵	$\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2e^{-}$	۲	۹
آلومینیوم	۲۶.۹۸	$\text{Al} \rightarrow \text{Al}^{3+} + 3e^{-}$	۳	۴.۵
کربن	۱۲.۰۱	$\text{C} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + 4\text{H}^{+} + 2e^{-}$	۴	۰.۵-۲

منبع: (Saeedi and Komreyi, 2013)

همان طور که در جدول ۱ مشاهده می شود نرخ خوردگی کربن به دلیل پایین بودن جرم مولکولی آن و همچنین نیازمندی ۴ الکترون به منظور اکسید شدن نسبت به بقیه مواد کمتر می باشد. EKGs به دلیل ساختار تشکیل یافته از پلیمرهای رسانا نظیر ژئوتکستایل های بافته شده به شکل شبکه ای که لایه نازکی از فلز رسانا و یا عناصر کربن سیاه بر روی آن گسترده شده است، ضمن جلوگیری از وقوع خوردگی در الکتروود آند با افزایش رسانایی منجر به بهبود و افزایش راندمان پاک سازی الکتروکینتیک می شود (Saeedi and Komreyi, 2013). در عمل ژئوسنتتیک های معمولی به صورت منفعل^۲ ایفای نقش می کنند (Shariatmadari and Jalali, 2014). با این حال نقش جدید ژئوسنتتیک ها به عنوان مواد فعال^۳ ایجاد تغییرات فیزیکی و شیمیایی در خاک به ویژه خاک های ریزدانه رسی به منظور حمل و انتقال گونه های شیمیایی (Moghadam et al., 2016) و به دنبال آن بهبود توابع روش الکتروکینتیک یعنی الکترواسمز و الکتروفورز

منا و همکاران (۲۰۱۵) ترکیب الکتروکینتیک و دیواره های تراوایی بیولوژیکی را به منظور پاک سازی رسی کائولین مصنوعی آغشته به گازوئیل به کار گرفته و در آزمایش خود از سورفکتانت آنیونی سدیم دو دیسل سولفات به عنوان محلول استخراج کننده استفاده کردند در پایان نتایج آنها از پاک سازی ۳۰ درصدی گازوئیل پس از ۲ هفته حکایت داشت (Mena et al., 2015). منا و همکاران (۲۰۱۶) در ادامه ی پژوهش خود این بار در نظر گرفتن ۳ گروه آزمایش به مدت ۲ هفته با در نظر گرفتن گرادیان الکتریکی اعمالی به عنوان متغیر اصلی مطالعه با ایجاد تغییراتی در روند های آزمایشگاهی خود از جمله استفاده از انحراف قطبی روزانه الکترودها شرایط مناسب تری از نظر دما و pH برای موفقیت آمیزتر بودن فرایند زیست تخریب پذیری مواد آلی فراهم کردند که نتایج آنها حکایت افزایش راندمان حذف تا ۳۶ درصد در گرادیان ولتاژ ۱.۵ ولت بر سانتی متر داشت.

الکتروکینتیک ژئوسنتتیک

پژوهشگران در سال ۱۹۹۶ برای اولین بار مفهوم الکتروکینتیک ژئوسنتتیک یا مواد رسانای ژئوسنتتیک را بیان کرده و به طبع آن به معرفی EKG^۱ پرداختند (Saeedi and Komreyi, 2013). ژئوسنتتیک ها منسوجات و پوشش های ساخته شده از الیاف های پلیمری بی اثر می باشند که خاصیت اصلی آنها فسادناپذیری در برابر عوامل درون خاک است تغییرات pH در اثر واکنش های الکترولیز رخ داده در آند و کاتد در خلال پاک سازی الکتروکینتیک منجر به ایجاد تغییرات در ساختار الکترودها و خوردگی آنها می شود این خوردگی سبب افزایش

2. Passive
3. Active

1. Electrokinetic Geosynthetic

به منظور هدایت آلاینده‌ها از طریق خاک به سمت الکترودها و سپس جذب آنها است (Jones et al., 2008). الکتروکینتیک ژئو سنتتیک‌ها می‌توانند به صورت منفرد یا ترکیبی از انواع ژئوسنتتیک‌ها با کاربری‌های مختلف ساخته شوند و یا به صورت دوجبه‌ای و سه‌جبه‌ای شکل داده شوند (Shariatmadari and Jalali, 2014). یکی از روش‌های مفید به منظور پاک‌سازی‌های درجاست (Tang et al., 2017). تانگ و همکاران (2017) به پاک‌سازی درجای خاک آلوده به فلزات سنگین در یک شالیزار برنج با استفاده از زهکشی آب حفره‌ای خاک پرداختند. آنها در خلال ۴ آزمایش مستقل اثرات رطوبت خاک (کاملاً اشباع و یا نیمه اشباع) و گرا دیان ولتاژ را روی میزان آب حفره‌ای زهکشی شده و راندمان حذف کادمیوم (Cd)، مصرف انرژی و مشخصات شیمیایی خاک بررسی کردند. نتایج حاصل نشان داد که بیشترین درصد حذف کادمیوم از خاک اشباع‌شده به مدت ۲۴ ساعت بعد از ۷ روز سپری شدن از زمان آزمایش برابر ۴۲ درصد و کمترین میزان انرژی مصرفی ۳/۴۸ کیلووات ساعت و گرا دیان ولتاژ بهینه برابر ۱ ولت بر سانتی‌متر بوده است که در این آزمایش فرایند مهاجرت یونی مکانیسم اصلی انتقال آلاینده کادمیوم بوده است (Tang et al., 2017).

محدودیت‌های پاک‌سازی خاک‌های آلوده به روش
الکتروکنتیک

۱. نتایج آزمایش‌های انجام‌شده نشان می‌دهد که این روش برای خاک‌های آلوده با درصد رطوبت کمتر از ۱۰ درصد کارایی مناسب را ندارد از طرفی اضافه کردن آب به نوبه خود منجر به نزدیک شدن آلودگی به سطح آب‌های زیرزمینی و در نهایت افزایش سختی آب‌های زیرزمینی و کاهش حلالیت آن می‌شود (Saeedi and Saeedi and Komreyi, 2013, Saberi, 2015).

۲. خاک‌ها از نظر ساختار به شدت پیچیده و متغیر می‌باشند به‌طور مثال خاک رس یخچالی به دلیل دارا بودن مقادیر زیاد کربنات و مواد آلی از ظرفیت بافری بالایی برخوردار بوده و سبب حفظ شرایط قلیایی در خاک علی‌رغم اعمال پتانسیل الکتریکی می‌شود. pH بالای این خاک موجب رسوب و توقف انتقال فلزات کاتیونی شده بنابراین ایجاد و رسیدن به شرایط اسیدی مطلوب کاری دشوار می‌باشد همچنین استفاده از مواد شستشو دهنده به‌منظور بهبود راندمان پاک‌سازی الکتروکیتیک و غلبه بر این محدودیت‌ها هنگامی است که بتواند تمام منطقه

درنهایت با بهره‌گیری از ابزار رسانه، با توجه به تحلیل انجام‌شده به‌طور کلی می‌توان نتایج کلیدی زیر را گزارش نمود:

۱. در مجموع روش پاک‌سازی الکتروکینتیک با قابلیت پاک‌سازی قشر وسیعی از آلاینده‌های آلی و غیر آلی، فلزات

این امر با کاهش موانع فاصله‌ای و افزایش تماس بین مواد و آلاینده‌های در حال واجذبش از شبکه متخلخل خاک صورت می‌گیرد. همچنین استفاده از انواع مخلوط‌های جاذب سازگار با محیط زیست از قبیل کرین فعال و فسفات به‌عنوان مواد واکنش دهنده و پرکننده دیواره‌های تراوایی بیولوژیکی امکان دستیابی به یک فناوری پاک‌سازی سبز را به ارمان می‌آورد.

۵. همان گونه که بیان شد خصوصیات سایت مورد پالایش نظیر سائز ناحیه مورد پاک‌سازی و عمق آلودگی خاک، درصد رطوبت و جنس خاک، حضور هم‌زمان چندین آلاینده در خاک و زمان انجام مکانیسم‌های پاک‌سازی الکتروشیمیایی از عوامل تأثیرگذار در هزینه‌های پاک‌سازی خاک آلوده به‌وسیله روش الکتروکینتیک به‌صورت درجا و در محل بوده که منجر به بروز محدودیت‌های اقتصادی در استفاده از این روش در صنعت و استفاده همه‌جانبه از آن شده است.

۶. ساخت و آزمایش ترکیبات استخراج‌کننده شیمیایی و بیولوژیکی جدید و ارزیابی عملکرد آنها در بهبود راندمان استخراج انواع آلاینده‌های آلی و فلزی، استفاده از اکسیدکننده شیمیایی اوزون در ترکیب با روش الکتروکینتیک در خاک‌های آلوده به ترکیب هم‌زمان آلاینده‌های آلی و فلزات سنگین، به‌کارگیری ترکیب الکتروکینتیک و اکسیدان هایپوکلریت به‌منظور پاک‌سازی خاک‌های آلوده به آلاینده‌های آلی، کاربرد الکتروکینتیک بهبودیافته در خاک‌های مصنوعی یخچالی که تاکنون کمتر مورد توجه محققان بوده است و همچنین تحلیل زیست‌پالایی الکتروکینتیک در شرایط زیست‌محیطی واقعی‌تری مانند سامانه‌های فیزیکی ناهمگن آلوده به ترکیبی از آلاینده‌های آلی مقاوم و آلاینده‌های غیر آلی فلزی و شناخت دقیق‌تری از سازوکارهای اثرگذار بر ترکیب الکتروکینتیک و زیست‌پالایی در کاربردهای میدانی و صنعتی، می‌تواند زمینه تحقیقات محققان آینده باشد.

سنگین از انواع خاک‌ها و رسوبات اشباع، ناهمگن و با نفوذ پذیری کم یک روش تصفیه پرکاربرد در مقیاس آزمایشگاهی و در پاک‌سازی‌های میدانی است اما با این حال با توجه به پیچیدگی‌ها و عوامل مؤثر بر کارایی تصفیه الکتروکینتیک نظیر تأثیر تغییرات pH در حالت شیمیایی آلاینده‌ها و احتمال بی‌حرکت شدن و رسوب آلاینده‌ها در اثر تولید یون‌های OH⁻ ناشی از واکنش‌های الکترولیز آب، خوردگی الکترودها در اثر واکنش‌های شیمیایی با آلاینده‌ها، شناخت انواع روش‌ها و فناوری‌های کاربردی به‌منظور غلبه بر این محدودیت‌ها و ارتقای راندمان پاک‌سازی الکتروکینتیک امری مهم و حائز اهمیت است.

۲. استخراج‌کننده‌های شیمیایی و بیولوژیکی نظیر عوامل کیالیت‌کننده، مواد فعال سطحی شیمیایی و زیستی، اسیدها و اکسیدان‌ها از طریق مکانیسم‌های انحلال و به حرکت درآوردن آلاینده قادر به تنظیم pH و جلوگیری از تشکیل رسوب و بهبود راندمان پاک‌سازی خاک آلوده خواهند بود. باین حال تولید آلاینده‌های ثانویه نظیر کمپلکس‌های کیالیت-فلز در پساب خروجی از کاتد هنگام استفاده از عوامل کیالیت‌کننده و همچنین استفاده از اسیدهای نامناسب مانند اسید هیدروکلریک ممکن است منجر به تولید نمک‌های کلریدی نامحلول مانند کلرید سرب شده که در صورت رسیدن به مخزن آند باعث تولید گاز کلر در اثر واکنش الکترولیز و در نهایت آلودگی آب‌های زیرزمینی می‌شود.

۳. ترکیب پدیده الکتروکینتیک با مواد پلیمری رسانا نظیر ژئوسنتتیک‌های خنثی ضمن جلوگیری از وقوع خوردگی در الکترودها و آند با افزایش رسانایی و ارتباط مناسب الکترودها با خاک منجر به بهبود و افزایش راندمان پاک‌سازی الکتروکینتیک می‌شود.

۴. الکتروکینتیک بهبودیافته با پاک‌سازی زیستی یا با الکتروکینتیک با افزایش زیست‌دسترس‌پذیری آلاینده‌های قابل تماس و مواد مغذی، از نظر کاتابولیسی برای میکروارگانیسم‌های فعال، موجب بهبود زیست‌پالایی می‌گردد.

References

- Acar, Y. B. & Alshawabkeh, A. N. (1993). "Principles of electrokinetic remediation. Environmental science & technology". 27, 2638-2647.
- Alcántara, M., Gómez, J., Pazos, M. & Sanromán, M. (2012). "Electrokinetic

remediation of lead and phenanthrene polluted soils". *Geoderma*, 173, 128-133.

- Alshawabkeh, A. N., Yeung, A. T. & Bricka, M. R. (1999). "Practical aspects of in-situ electrokinetic extraction". *Journal of Environmental Engineering*, 125, 27-35.

- Ammami, M., Portet-Koltalo, F., Benamar, A., Duclairoir-Poc, C., Wang, H. & Le Derf, F. (2015). "Application of biosurfactants and periodic voltage gradient for enhanced electrokinetic remediation of metals and PAHs in dredged marine sediments". *Chemosphere*, 125, 1-8.
- Asadollahfardi, G., Nasrollahi, M., Rezaee, M. & Darban, A.K. (2017). "Nickel removal from low permeable kaolin soil under unenhanced and EDTA-enhanced electrokinetic process". *Advances in Environmental Research*, 6, 147-158.
- Bahemmat, M., Farahbakhsh, M. & Kianirad, M. (2016). "Humic substances-enhanced electroremediation of heavy metals contaminated soil". *Journal of hazardous materials*, 312, 307-318.
- Bashiri, E. (2017). "Investigating the application of green technology in separation processes". *National Conference on Science and Engineering, Separation*, Fourth [In Persian].
- Blaser, P., Zimmermann, S., Luster, J. & Shotyk, W. (2000). "Critical examination of trace element enrichments and depletions in soils: As, Cr, Cu, Ni, Pb, and Zn in Swiss forest soils". *Science of the Total Environment*, 249, 257-280.
- Cameselle, C. & Reddy, K. R. (2013). "Effects of periodic electric potential and electrolyte recirculation on electrochemical remediation of contaminant mixtures in clayey soils". *Water, Air, & Soil Pollution*, 224, 1636.
- Cameselle, C. (2015). "Enhancement of electro-osmotic flow during the electrokinetic treatment of a contaminated soil". *Electrochimica Acta*, 181, 31-38.
- Cang, L., Fan, G.-P., Zhou, D.-M. & Wang, Q.-Y. (2013). "Enhanced-electrokinetic remediation of copper-pyrene co-contaminated soil with different oxidants and pH control". *Chemosphere*, 90, 2326-2331.
- Carroll, C. E. & McCombs, M. (2003). "Agenda-setting effects of business news on the public's images and opinions about major corporations". *Corporate reputation review*, 6, 36-46.
- Chadwick, S. S. (1988). "Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry". *Reference Services Review*, 16, 31-34.
- Cheng, M., Zeng, G., Huang, D., Lai, C., Xu, P., Zhang, C., Liu, Y., Wan, J., Gong, X. & Zhu, Y. (2016). "Degradation of atrazine by a novel Fenton-like process and assessment the influence on the treated soil". *Journal of hazardous materials*, 312, 184-191.
- Chirakkara, R. A., Reddy, K. R. & Cameselle, C. (2015). "Electrokinetic amendment in phytoremediation of mixed contaminated soil". *Electrochimica Acta*, 181, 179-191.
- Chowdhury, A. I. (2016). "Hydraulic and Electrokinetic Delivery of Remedants for In-situ Remediation".
- Da Rocha, U. N., Tótolá, M. R., Pessoa, D. M. M., Júnior, J. T. A., Neves, J. C. L. & Borges, A. C. (2009). "Mobilisation of bacteria in a fine-grained residual soil by electrophoresis". *Journal of hazardous materials*, 161, 485-491.
- Dabiri, F. & Vahednavan, A. (2011). "Media and Development of Environmental Laws". *Media Studies* [In Persian].
- Delnavaz, M., Sarmadi, M. S., Yazdani, M. & Sadeghi, A. H. (2017). "Studying the Efficiency of Deep Aerators Performance as a Replacement for Surface Aerators in Aerated Lagoons Process, a Step through Human Force Training in Water and Wastewater Industry". *Environmental Education & Sustainable Development*, 5, 105-119. [In Persian]
- Fan, C., Gao, Y., Zhang, Y., Dong, W. & Lai, M. (2018). "Remediation of lead and cadmium from simulated groundwater in loess region in northwestern China using permeable reactive barrier filled with environmentally friendly mixed adsorbents". *Environmental Science and Pollution Research*, 25, 1486-1496.
- 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.
- Fan, G., Cang, L., Gomes, H. I. & Zhou, D. (2016). "Electrokinetic delivery of persulfate to remediate PCBs polluted soils: Effect of different activation methods". *Chemosphere*, 144, 138-147.
- Fonseca, B., Pazos, M., Figueiredo, H., Tavares, T. & Sanromán, M. (2011). "Desorption kinetics of phenanthrene and lead from historically contaminated soil". *Chemical engineering journal*, 167, 84-90.
- Fu, R., Yang, Y., Xu, Z., Zhang, X., Guo, X. & Bi, D. (2015). "The removal of chromium (VI) and lead (II) from groundwater using sepiolite-supported nanoscale zero-valent iron (S-NZVI)". *Chemosphere*, 138, 726-734.
- Gan, S., Lau, E. & Ng, H. (2009). "Remediation of soils contaminated with polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs)". *Journal of Hazardous Materials*, 172, 532-549.
- Gill, R., Harbottle, M. J., Smith, J. & Thornton, S. (2014). "Electrokinetic-enhanced bioremediation of organic contaminants: A review of processes and environmental applications". *Chemosphere*, 107, 31-42.
- Gomes, H. I., Dias-Ferreira, C. & Ribeiro, A. B. (2012). "Electrokinetic remediation of organochlorines in soil: enhancement techniques and integration with other remediation technologies". *Chemosphere*, 87, 1077-1090.
- Hahladakis, J. N., Lekkas, N., Smponias, A. & Gidarakos, E. (2014). "Sequential application of chelating agents and innovative surfactants for the enhanced electroremediation of real sediments from toxic metals and PAHs". *Chemosphere*, 105, 44-52.
- Hodges, D., Fourie, A., Thomas, D. & Reynolds, D. (2012). "Overcoming permanganate stalling during electromigration". *Journal of environmental engineering*, 139, 677-684.
- Holmberg, K., Shah, D. O. & Schwuger, M. J. (2002). "Handbook of applied surface and colloid chemistry". *John Wiley & Sons*.
- Huang, D., Xu, Q., Cheng, J., Lu, X. & Zhang, H. (2012). "Electrokinetic remediation and its combined technologies for removal of organic pollutants from contaminated soils". *Int. J. Electrochem. Sci*, 7, 4528-4544.
- Ishiguro, M. & Koopal, L. K. (2016). "Surfactant adsorption to soil components and soils". *Advances in colloid and interface science*, 231, 59-102.
- Izadi, M. (2009). "Rethoric in mass media, Hekmat & Marefat". *Hekmat & Marefat*, 4, 15-1. ^۱ [In Persian]
- Jamshidi, Z., Golchin, A. & Pari-Zanganeh, A. (2013). "The effect of different levels of chromium and exposure time on growth parameters of earthworms". *Feyz*, 16, 625-626. [In Persian]
- Jones, C., Lamont-Black, J., Glendinning, S., Bergado, D., Eng, T., Fourie, A., Liming, H., Pugh, C., Romantshuk, M. & Simpanen, S. (2008). "Recent research and applications in the use of electrokinetic geosynthetics". *4th European Geosynthetics Conference*, Edinburgh, UK, 1-30.
- Khalid, S., Shahid, M., Niazi, N. K., Murtaza, B., Bibi, I & Dumat, C. (2017). "A comparison of technologies for remediation of heavy metal contaminated soils". *Journal of Geochemical Exploration*, 182, 247-268.
- Khodadoust, A. P., Reddy, K. R. & Narla, O. (2006). "Cyclodextrin-enhanced electrokinetic remediation of soils contaminated with 2, 4-dinitrotoluene". *Journal of Environmental Engineering*, 132, 1043-1050.
- Kim, G.-N., Kim, S.-S., Park, U.-R. & Moon, J.-K. (2015). "Decontamination of soil contaminated with cesium using electrokinetic-electrodialytic method".

- Electrochimica Acta*, 181, 233-237.
- Ko, S.-O., Schlautman, M. A. & Carraway, E. R. (2000). "Cyclodextrin-enhanced electrokinetic removal of phenanthrene from a model clay soil". *Environmental science & technology*, 34, 1535-1541.
- Koprivanac, N. & Kušić, H. (2007). "AOP as an effective tool for the minimization of hazardous organic pollutants in colored wastewater; chemical and photochemical processes". *Hazardous Materials and Wastewater: Treatment, Removal and Analysis*. Nova Science Publishers, Inc.
- Kosaric, N. (2001). "Biosurfactants and their application for soil bioremediation". *Food Technology and Biotechnology*, 39, 295-304.
- Lim, M. W., Lau, E. V. & Poh, P. E. (2016). "A comprehensive guide of remediation technologies for oil contaminated soil — Present works and future directions". *Marine Pollution Bulletin*, 109, 14-45.
- Liu, R. & Gao, Y. (2017). "Review of PRB Filler". *Industrial Safety and Environmental Protection*, 6, 002.
- Lockhart, N. (1983). "Electroosmotic dewatering of clays, III. Influence of clay type, exchangeable cations, and electrode materials". *Colloids and Surfaces*, 6, 253-269.
- Manahan, S. E. (2013). "Fundamentals of environmental and toxicological chemistry: sustainable science". *CRC press*.
- Meers, E., Ruttens, A., Hopgood, M., Samson, D. & Tack, F. (2005). "Comparison of EDTA and EDDS as potential soil amendments for enhanced phytoextraction of heavy metals". *Chemosphere*, 58, 1011-1022.
- Mehrsebi, M. R., Baziar, M., Naddafi, K., Mohammadianfazli, M. & Assadi, A. (2013). "Efficiency of Brij 35 and Tween 80 surfactants for treatment of gasoline contaminated soil". *Iranian Journal of Health and Environment*, 6, 211-220.
- Mena, E., Ruiz, C., Villaseñor, J., Rodrigo, M. A. & Cañizares, P. (2015). "Biological permeable reactive barriers coupled with electrokinetic soil flushing for the treatment of diesel-polluted clay soil". *Journal of hazardous materials*, 283, 131-139.
- Mena, E., Villaseñor, J., Rodrigo, M. A. & Cañizares, P. (2016). "Electrokinetic remediation of soil polluted with insoluble organics using biological permeable reactive barriers: Effect of periodic polarity reversal and voltage gradient". *Chemical Engineering Journal*, 299, 30-36.
- Moghadam, M. J., Moayedi, H., Sadeghi, M. M. & Hajiannia, A. (2016). "A review of combinations of electrokinetic applications". *Environmental geochemistry and health*, 38, 1217-1227.
- Nikzad, M. & Yousefi Kebriya, D. (2014). "Electrokinetic bioremediation of organic pollutants: basic processes and environmental applications". *4th National Conference on Health, Environment & Sustainable Development*, Islamic Azad University of Bandar Abbas Branch. [In Persian]
- Pazos, M., Rosales, E., Alcántara, T., Gómez, J. & Sanromán, M. (2010). "Decontamination of soils containing PAHs by electroremediation: a review". *Journal of hazardous materials*, 177, 1-11.
- Pham, T. D. (2014). "Ultrasonic and Electrokinetic Remediation of Low Permeability Soil Contaminated with Persistent Organic Pollutants". *Acta Universitatis Lappeenrantaensis*.
- Reddy, K. R. & Cameselle, C. (2009). "Electrochemical remediation technologies for polluted soils, sediments and groundwater". John Wiley & Sons.
- Ren, L., Lu, H., He, L. & Zhang, Y. (2014). "Enhanced electrokinetic technologies with oxidization–reduction for organically-contaminated soil remediation". *Chemical Engineering Journal*, 247, 111-124.
- Roehl, K. E., Meggyes, T., Simon, F.-G & Stewart, D. (2005). "Long-term

- performance of permeable reactive barriers". *Gulf Professional Publishing*.
- Saeedi, M. & Komreyi, V. (2013). "Application of geosynthetic electrochemical method to remove heavy metals from clay soils". Tehran. [In Persian]
- Saeedi, M. & Saberi, N. (2015). "Understanding of their effective factors in the process of cleaning soil contaminated with heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons in improved electrochemical method". Tehran: Iran University of Science and Technology. [In Persian]
- Schowaneck, D., Feijtel, T. C., Perkins, C. M., Hartman, F. A., Federle, T. W. & Larson, R. J. (1997). "Biodegradation of [S, S], [R, R] and mixed stereoisomers of ethylene diamine disuccinic acid (EDDS), a transition metal chelator". *Chemosphere*, 34, 2375-2391.
- Shariatmadari, N. & Jalali, K. (2014). "Saturated Fine Grained Soil Improved by Electrokinetic Injection Of Nano Particles By Using Electrokinetic Geosynthetics As Electrode". *Iran University of Science and Technology* [In Persian].
- Sharma, H. D. & Reddy, K. R. (2004). "Geoenvironmental engineering: site remediation, waste containment, and emerging waste management technologies". John Wiley & Sons, Inc.
- Shi, Z., Dou, T., Zhang, H., Huang, H. & Zeng, N. (2016). "Electrokinetic Remediation of Uranium Contaminated Soil by Ion Exchange Membranes". *cell*, 15, 5.
- Shin, S.-Y., Park, S.-M. & Baek, K. (2016). "Electrokinetic removal of As from soil washing residue". *Water, Air, & Soil Pollution*, 227, 223.
- Sun, J., Pan, L., Tsang, D. C., Zhan, Y., Zhu, L. & Li, X. (2018). "Organic contamination and remediation in the agricultural soils of China: A critical review". *Science of the Total Environment*, 615, 724-740.
- Takahashi, R., Fujimoto, N., Suzuki, M. & Endo, T. (1997). "Biodegradabilities of ethylenediamine-N, N'-disuccinic acid (EDDS) and other chelating agents". *Bioscience, biotechnology, and biochemistry*, 61, 1957-1959.
- Tang, X., Li, Q., Wang, Z., Hu, Y., Hu, Y. & Li, R. (2017). "In situ electrokinetic isolation of cadmium from paddy soil through pore water drainage: Effects of voltage gradient and soil moisture". *Chemical Engineering Journal*.
- Tsai, T.-T., Sah, J. & Kao, C.-M. (2010). "Application of iron electrode corrosion enhanced electrokinetic-Fenton oxidation to remediate diesel contaminated soils: a laboratory feasibility study". *Journal of hydrology*, 380, 4-13.
- Urum, K. & Pekdemir, T. (2004). "Evaluation of biosurfactants for crude oil contaminated soil washing". *Chemosphere*, 57, 1139-1150.
- Villen-Guzman, M., Paz-Garcia, J. M., Rodriguez-Maroto, J. M., Gomez-Lahoz, C. & Garcia-Herruzo, F. (2014). "Acid enhanced electrokinetic remediation of a contaminated soil using constant current density: strong vs. weak acid". *Separation Science and Technology*, 49, 1461-1468.
- Virkutyte, J., Sillanpää, M. & Latostenmaa, P. (2002). "Electrokinetic soil remediation—critical overview". *Science of the Total Environment*, 289, 97-121.
- Von Lau, E., Gan, S., Ng, H. K. & Poh, P. E. (2014). "Extraction agents for the removal of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) from soil in soil washing technologies". *Environmental pollution*, 184, 640-649.
- Wang, A., Luo, C., Yang, R., Chen, Y., Shen, Z. & Li, X. (2012). "Metal leaching along soil profiles after the EDDS application—A field study". *Environmental pollution*, 164, 204-210.
- Wang, G., Zhou, Y., Wang, X., Chai, X., Huang, L. & Deng, N. (2010). "Simultaneous removal of phenanthrene

- and lead from artificially contaminated soils with glycine- β -cyclodextrin". *Journal of hazardous materials*, 184, 690-695.
- Wick, L. Y., Mattle, P. A., Wattiau, P. & Harms, H. (2004). "Electrokinetic transport of PAH-degrading bacteria in model aquifers and soil". *Environmental science & technology*, 38, 4596-4602.
- Wick, L. Y., Shi, L. & Harms, H. (2007). "Electro-bioremediation of hydrophobic organic soil-contaminants: A review of fundamental interactions". *Electrochimica Acta*, 52, 3441-3448.
- Xu, P., Zeng, G. M., Huang, D. L., Feng, C. L., Hu, S., Zhao, M. H., Lai, C., Wei, Z., Huang, C. & Xie, G. X. (2012). "Use of iron oxide nanomaterials in wastewater treatment: a review". *Science of the Total Environment*, 424, 1-10.
- Yan, D. Y. & Lo, I. M. (2013). "Removal effectiveness and mechanisms of naphthalene and heavy metals from artificially contaminated soil by iron chelate-activated persulfate". *Environmental pollution*, 178, 15-22.
- Yeung, A. T. & Gu, Y.-Y. (2011). "A review on techniques to enhance electrochemical remediation of contaminated soils". *Journal of hazardous materials*, 195, 11-29.
- Zhu, S., Zhou, M. & Zhang, S. (2016). "Enhanced electrokinetic remediation of fluorine-contaminated soil by applying an ammonia continuous circulation system". *Korean Journal of Chemical Engineering*, 33, 547-552.