

بررسی کارایی روش الکتروکینتیک در حذف هیدروکربن‌های پلی‌آروماتیک از خاک‌های آلوده: یک مطالعه مروری سیستماتیک

سید مصطفی ابطحی^۱، محمدتقی علیپور^۲، حمود نقدبیشی^۳، گنا اولیوری کنتی^۴، محمد میری^{۵*}

۱ و ۲ و ۳. مربی، گروه ایمنی، بهداشت و محیط زیست، شرکت نفت و گاز شرق، مشهد، ایران.
۴. آزمایشگاه بهداشت محیط و غذا، گروه پزشکی، علوم جراحی و فناوری‌های پیشرفته، "جی، اف، اینگرسیا"، دانشگاه کاتانیا، کاتانیا، ایتالیا.

۵. استادیار، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی سبزوار، سبزوار، ایران.

چکیده

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۲/۱۳
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۷/۲۸

زمینه و هدف هیدروکربن‌های پلی‌آروماتیک^۱ بر سلامت انسان و محیط‌زیست در کوتاه‌مدت و بلندمدت تأثیرات منفی متعددی دارد. در این مطالعه به بررسی سیستماتیک مطالعات انجام شده در زمینه حذف PAHs از خاک‌های آلوده با استفاده از روش الکتروکینتیک و تعیین پارامترهای تأثیرگذار بر این فرایند پرداخته شده است. **مواد و روش‌ها** این تحقیق، یک مطالعه مروری نظام‌مند می‌باشد. برای این منظور، ابتدا کلیدواژه‌های مرتبط با آلاینده‌های نفتی و روش الکتروکینتیک تهیه شد. جستجو در پایگاه‌های علمی شامل Scopus، Web of Science و PubMed انجام گرفت. پس از اتمام جستجو در هر پایگاه مقالات به نرم‌افزار Endnote منتقل شد و غربالگری تا رسیدن به مقالاتی که کاملاً به موضوع ارتباط دارند انجام گردید. **یافته‌ها** به‌طور کلی ۵۷۱ مقاله تا تاریخ ۱۰ سپتامبر سال ۲۰۱۸ از پایگاه‌های ذکر شده پیدا گردید. سپس با حذف موارد تکراری و موارد غیرمرتبط با موضوع، ۱۰ مطالعه موردبررسی دقیق قرار گرفت. مطالعات بررسی شده مربوط به سال‌های ۲۰۰۰ تا سال ۲۰۱۷ بود. در سه مطالعه از روش الکتروکینتیک به همراه سورفکتانت‌ها و بیوسورفکتانت‌ها شده بود. چهار مطالعه از روش تجزیه زیستی به همراه فرایند الکتروکینتیک بهره برده بود. تلفیق فرایند الکتروکینتیک با سایر فرایندها می‌تواند کارایی این فرایند را در حذف PAHs از خاک تا حد بسیار بالایی در زمان‌های نسبتاً کوتاه (کمتر از ۱ ماه) افزایش دهد. **نتیجه‌گیری** با توجه تأثیرگذاری پارامترهای مختلف بر فرایند، انجام یک پایلوت آزمایشگاهی برای بهینه گرفتن فرایند قبل از اجرای این روش به صورت میدانی توصیه می‌گردد.

کلیدواژه‌ها:

خاک‌های آلوده، هیدروکربن‌های پلی‌آروماتیک، مرور سیستماتیک، الکتروکینتیک.

* نویسنده مسئول: محمد میری

نشانی: پردیس دانشگاه علوم پزشکی سبزوار، دانشکده بهداشت، گروه بهداشت محیط

تلفن: ۰۹۱۲۹۳۵۷۵۸۸

رایانامه: M_miri87@yahoo.com

شناسه ORCID: 0000-0002-7670-0279

شناسه ORCID نویسنده اول: 0000-0002-9424-6487

مجله علمی - پژوهشی دانشگاه علوم پزشکی سبزوار، دوره ۲۸، شماره ۱، فروردین و اردیبهشت ۱۴۰۰، ص ۵۵-۶۶

آدرس سایت: <http://jsums.medsab.ac.ir> رایانامه: journal@medsab.ac.ir

شاپای چاپی: ۱۶۰۶-۷۴۸۷

۱. مقدمه

ذرات باردار تحت تأثیر میدان الکتریکی می‌باشد. برای افزایش کارایی این روش و حلالیت بیشتر آلاینده‌ها از شلاته‌کننده‌های مختلف مثل EDTA و NTA استفاده می‌شود (۹، ۱۰). مهم‌ترین واکنش انتقال الکترون که در طول فرایند الکتروکینتیک در الکتروده رخ می‌دهد، واکنش الکترولیز آب است. طی این واکنش، در قسمت آند، یون‌های هیدروژن تولید می‌شوند که موجب کاهش pH می‌گردد، در حالی که افزایش غلظت یون هیدروکسید در کاتد، باعث افزایش pH و بازی شدن آن می‌شود (۱۱). فرایند انتقال الکترون، تأثیر زیادی بر انحلال پذیری، بار و حالت یونی آلاینده‌ها دارد. برای این که همه آلاینده‌ها در فاز خاک به صورت محلول قرار بگیرند pH باید پایین نگه‌داشته شود. باقی ماندن آلاینده‌های فلزی به صورت محلول، به موفقیت‌آمیز بودن تصفیه الکتروکینتیک کمک می‌کند (۱۲). از عوامل مؤثر بر کارایی فرایند الکتروکینتیک در تصفیه خاک‌های آلوده، جنس خاک، نوع آلاینده، شدت جریان و ولتاژ، عوامل شیمیایی افزایش‌دهنده راندمان، جنس الکترودها و pH را می‌توان نام برد (۱، ۱۲-۱۵). از مزایای فرایند الکتروکینتیک می‌توان به مؤثر بودن برای خاک‌های اشباع و غیراشباع، قابلیت پاک‌سازی انواع آلاینده‌ها مثل فلزات سنگین، رادیونوکلئیدها و آلاینده‌های آلی، قابلیت کاربرد در خاک‌های رسی و با قابلیت نفوذپذیری کم و خاک‌های با چند منشأ متفاوت اشاره کرد. از محدودیت‌های این روش می‌توان به ناکارایی در خاک‌های با رطوبت کمتر از ۱۰ درصد، امکان تشکیل مواد جانبی مثل گاز کلر، گران قیمت بودن و طولانی بودن پروسه تصفیه اشاره کرد (۱، ۱۶-۲۰).

مطالعات متعدد انجام شده در زمینه تصفیه فلزات سنگین از خاک، کارایی بسیار خوب روش الکتروکینتیک را نشان داده است. اما تا به امروز، کارایی این روش در زمینه حذف آلاینده‌های نفتی به شکل محدود و بیشتر روی برخی آلاینده‌های خاص مثل هیدروکربن‌های پلی آروماتیک (PAHs)^۱ انجام گرفته است. از مطالعات انجام شده در زمینه تصفیه آلاینده‌های آلی نفتی با استفاده از روش الکتروکینتیک می‌توان به مطالعه Mena و همکاران در سال ۲۰۱۵ و ۲۰۱۶ (۵، ۲۱)، مطالعه Ramirez و همکاران در سال ۲۰۱۵ (۶)، مطالعه Lee و همکاران در

در سال، میلیون‌ها تن باطله آلی و معدنی خطرناک در جهان تولید می‌شود و مکان‌های زیادی توسط فلزات سنگین، ترکیبات آلی و دیگر مواد خطرناک آلوده می‌شوند که تأثیر به‌سزایی بر کیفیت آب، خاک و اکوسیستم‌های وابسته به آنها دارد. آلودگی خاک می‌تواند به سایر قسمت‌های محیط‌زیست منتقل شود و به‌طور غیرمستقیم، سلامت انسان را از طریق آلودگی آب یا ورود به زنجیره غذایی از طریق گیاهان به مخاطره اندازد (۱-۴).

در سال‌های اخیر، روش‌های گوناگونی برای پاک‌سازی خاک‌های آلوده مورد بررسی قرار گرفته است که این روش‌ها شامل پاک‌سازی زیستی، شستشوی شیمیایی خاک، استخراج بخار خاک، الکتروکینتیک و غیره می‌باشد (۵). الکتروکینتیک روشی برای حذف آلاینده‌های آلی و معدنی از خاک است که تاکنون در مقیاس آزمایشگاهی و پایلوت مورد استفاده قرار گرفته است. این روش در خاک‌های آلوده با نفوذپذیری کم همراه با به‌کاربردن جریان الکتریکی مستقیم انجام می‌شود. در این روش برای پاک‌سازی خاک‌های آلوده، دو الکتروده درون توده خاک قرار داده می‌شود و جریان الکتریکی مستقیمی از بین آنها عبور داده می‌شود، در نتیجه عبور جریان بین کاتد و آند، یون‌ها به سمت الکترودها حرکت می‌کنند. یون‌های با بار مثبت به سمت کاتد و یون‌های با بار منفی به سمت آند حرکت می‌کنند؛ در نتیجه، آلاینده‌ها در الکترودها متمرکز می‌شوند و قابل برداشت خواهند بود (۱، ۶-۸).

روش الکتروکینتیک، یکی از کارآمدترین و بهترین روش‌های تصفیه خاک‌های آلوده محسوب می‌شود. از این روش می‌توان برای پاک‌سازی فلزات سنگین، ترکیبات آلی و رادیونوکلئیدها استفاده کرد. پدیده الکتروکینتیک را اولین بار در قرن ۱۹ Reuss و با ورود جریان مستقیم الکتریسیته به مخلوط رس-آب مشاهده کرد (۱). در فرایند الکتروکینتیک آلاینده‌ها از طریق سه مکانیسم مهاجرت الکتریکی، الکترواسمز و الکتروفورز حرکت می‌کنند. مهاجرت الکتریکی؛ شامل انتقال یون‌ها و کمپلکس‌های یونی به الکترودهای با بار مخالف است. الکترواسمز شامل حرکت آب موجود در حفرات خاک اشباع از آند به سمت کاتد و الکتروفورز شامل انتقال

1 Polycyclic aromatic hydrocarbons

سال ۲۰۱۶ (۲۲) و مطالعه Dong و همکاران در سال ۲۰۱۳ (۲۳) اشاره کرد. با توجه به تأثیرات زیان‌باری که آلاینده‌های PAHs بر انسان و محیط‌زیست در کوتاه‌مدت و بلندمدت می‌گذارد و با توجه به اینکه پاک‌سازی خاک‌های آلوده می‌تواند از آلوده شدن آب و محصولات کشاورزی و در ادامه به مخاطره افتادن سلامت انسان و سایر موجود زنده پیش‌گیری کند؛ در این مطالعه به بررسی دقیق مطالعات انجام شده تا کنون در قالب یک مرور سیستماتیک برای تصفیه آلاینده‌های PAHs از خاک با استفاده از روش الکتروکینتیک و تعیین پارامترهای تأثیرگذار بر تصفیه مواد PAHs پرداخته شده است.

۲. مواد و روش‌ها

این تحقیق، یک مطالعه مروری نظام‌مند می‌باشد. برای این منظور، ابتدا کلیدواژه‌های مرتبط با آلاینده‌های نفتی و روش الکتروکینتیک تهیه شد. کلیدواژه‌های مورد استفاده شامل PAHs و Polycyclic aromatic hydrocarbons برای آلاینده مورد بررسی و Electrokinetic reclamation، Electrokinetics، Electroreclamation، Electrokinetic soil، EK، Electroosmotic flow، flushing و Electrobioremediation بود. در ادامه، از این کلیدواژه‌ها در پایگاه‌های جستجوی مقالات علمی شامل

۳. یافته‌ها

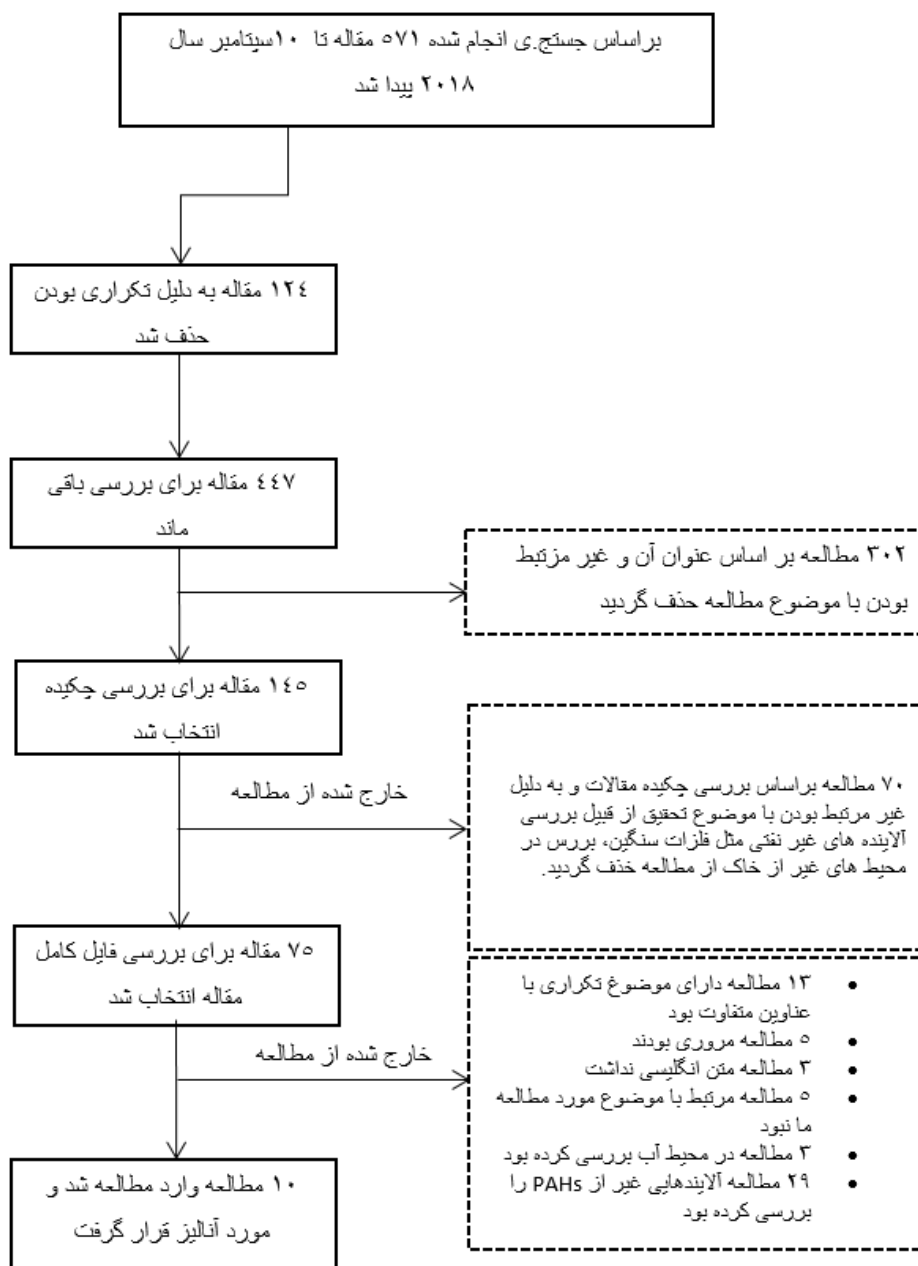
نتایج مربوط به جستجو در پایگاه‌های علمی بیان شده، در جدول ۱ آمده است. بر اساس جدول ۱ بعد ترکیب ۶۰ مقاله از پایگاه PubMed، ۲۲۷ مقاله از پایگاه Scopus و ۲۸۴ مقاله از پایگاه Web of science دریافت گردید. سپس این مقالات، به نرم‌افزار اندنوت منتقل شد و در آنجا موارد تکراری که ۱۲۴ مقاله بود حذف و مقالات باقی‌مانده برای ادامه فرایند بررسی، استفاده شد.

جدول ۱. مقالات استخراج شده از پایگاه‌های مختلف علمی بر اساس کلیدواژه‌های تعریف شده

پایگاه‌های علمی	تعداد مقالات یافت شده برای گروه ۱	تعداد مقالات یافت شده برای گروه ۲	مجموع مقالات از ترکیب دو گروه 1# AND 2#
PubMed	۴۰۱۶	۱۳۲۱۲۴	۶۰
Scopus	۱۰۹۶۰	۶۸۱۴۵۵	۲۲۷
EMBASE	خارج از دسترس	خارج از دسترس	خارج از دسترس
Web of Science	۹۸۰۹	۵۷۴۰۷۲	۲۸۴
کل مقالات	-	-	۵۷۱
موارد تکراری	-	-	۱۲۴

انتخاب شد و در نهایت، پس از مطالعه چکیده این مقالات، تعداد ۷۵ مقاله برای بررسی فایل کامل مقاله، انتخاب شدند. پس از بررسی فایل کامل مقالات، ۱۰ مطالعه وارد مطالعه شد و برای بررسی کارایی حذف PAHs از خاک‌های آلوده به روش الکتروکینتیک، مورد بررسی دقیق قرار گرفت.

شکل ۱، دیاگرام مربوط به فرایند جستجو و فیلتر کردن مقالات پیدا شده در این مطالعه را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود در ابتدا ۵۷۱ مقاله تا تاریخ ۱۰ سپتامبر سال ۲۰۱۸ از پایگاه‌های ذکر شده پیدا گردید. سپس با حذف موارد تکراری، تعداد ۴۴۷ مقاله وارد مرحله بررسی عنوان مقالات و حذف موارد غیرمرتبط بر اساس عنوان مقاله شد. در ادامه، بر اساس عناوین مقالات ۱۴۵ مقاله برای بررسی چکیده آنها



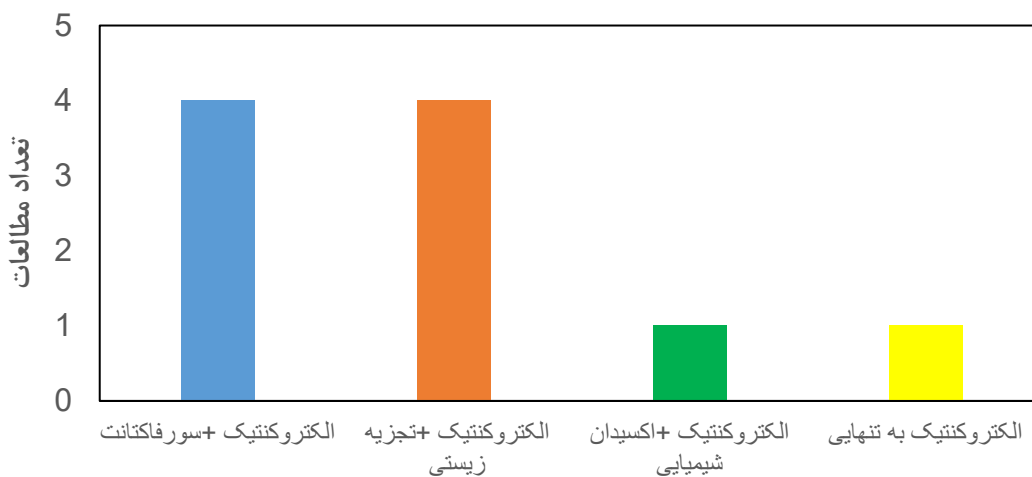
شکل ۱. دیاگرام مربوط به بررسی سیستماتیک مقالات

الکتروکنتیک همراه با شستشوی خاک با اکسیدان شیمیایی برای حذف PAHs از خاک استفاده گردیده بود (۳۱). در یک مطالعه، از هیچ‌گونه کنترولی استفاده نشده و از فرایند الکتروکنتیک در ترکیب با تجزیه زیستی برای بهبود فعالیت بیولوژیک میکروارگانیسم‌ها بهره گرفته شده بود (۲۸). در سه مطالعه، تنها از آب به‌عنوان کنترولی در فرایند استفاده گردیده بود (۲۷، ۳۰، ۳۲). بررسی انجام‌شده نشان داد هرچند فرایند الکتروکنتیک

خلاصه بررسی مطالعات انجام‌شده تا کنون در زمینه کارایی فرایند الکتروکنتیک در حذف آلاینده‌های نفتی از خاک در جدول ۲ آورده شده است. مطالعات بررسی شده، مربوط به سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۷ بود. در سه مطالعه، از روش الکتروکنتیک به همراه سورفاکتانت‌ها و بیوسورفاکتانت‌ها استفاده شده بود (۲۴-۲۶). چهار مطالعه از روش تجزیه زیستی به همراه فرایند الکتروکنتیک بهره برده بودند (۲۷-۳۰). در یک مطالعه، از فرایند

از الکتروولیت‌های مناسب می‌تواند کارایی این فرایند را تا حد بسیار بالایی در زمان‌های نسبتاً کوتاه (کمتر از ۱ ماه) افزایش دهد (جدول ۲).

به‌تنهایی و بدون استفاده از الکتروولیت‌هایی مثل سورفاکتانت‌ها کارایی بالایی در حذف آلاینده‌ها نفتی ندارد، اما از تلفیق این فرایند با سایر فرایندها یا استفاده



نوع فرایند

شکل ۲. تعداد مقالات بررسی شده براساس نوع فرایند مورد استفاده در حذف PAHs از خاک‌های آلوده

جدول ۲. خلاصه مقالات بررسی شده در ارتباط با استفاده از روش الکتروکنتیک در حذف آلاینده‌های نفتی

نویسنده	سال	نوع فرایند مورد استفاده	آلاینده مورد بررسی (غلظت)	مشخصات پایلوت طراحی شده	نوع الکتروود	الکتروولیت مورد استفاده	نوع و مقدار خاک آلوده	راندمان حذف
Maini و همکاران	۲۰۰۰	الکتروکنتیک مقیاس کوچک و بزرگ	آلودگی قدیمی به ۷۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم PAHs و ۵۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم BTEX	استفاده از پمپ پرستالیک برای انتقال آب از آند به کاتد و بعد به ستون تبادل یون و یک ستون کربن فعال. پایلوت کوچک شامل ۶×۳×۶ متر. سانتی‌متر. مقیاس بزرگ با ابعاد ۳۰×۵۰×۵۰ سانتی‌متر. اند با طول ۱۷/۵ سانتی‌متر و قطر ۵/۵ سانتی‌متر	کربن برای آند و استیل ضدزنگ برای کاتد جدا شده از خاک با غشای نیمه‌تراوا	اسید استیک moldm ³ ۰/۰۵ و پریدین دی‌کربنیک اسید به مقدار ۶۰ سانتی‌متر مکعب در روز اضافه می‌شد	۱۰ گرم خاک به‌ازای هر محفظه برای مقیاس کوچک. در مقیاس بزرگ در مجموع ۴۶/۷ کیلوگرم	در مقیاس کوچک بعد ۲۳ روز کل PAHs به میزان ۹۴ درصد حذف شد. در مقیاس بزرگ در کل PAHs بعد از ۲۲ روز از ۷۲۰ به ۱۰ میلی‌گرم در کیلوگرم کاهش یافت.
Isosaari و همکاران	۲۰۰۷	الکتروکنتیک به همراه اکسیداسیون شیمیایی	PAHs	ابعاد محل قرار داد خاک ۱۵×۱۵×۱۵ سانتی‌متر بود. ارتفاع خاک حدود ۱۱ سانتی‌متر. بین خاک و الکتروولیت با یک ورق اکریلیک پوشیده شده بود از پروپیلین ژئوتکستایل برای پوشش منافذ بین خاک و الکتروولیت استفاده شد. الکترودها با هم ۱۹ سانتی‌متر فاصله داشتند	ابعاد الکتروود ۴/۸×۲۲ و جنس استیل ضدزنگ ۴۸ ولت بر متر جریان مستقیم ۴/۷ ولت جریان متناوب	۶۵۰ میلی‌لیتر بافر ۰/۰۵ مولار K ₂ HPO ₄ /KH ₂ PO ₄ که pH ۸/۵ برای آند و pH ۶/۵ برای کاتد استفاده شد که بافر با پمپ پرستالتیک تزریق می‌شد. برای آند ۳۵۰ تا ۹۰ میلی‌لیتر در روز بود. برای کاتد ۴۵ میلی‌لیتر در روز بود	رس خاک آلوده برداشته شده از عمق ۱ تا ۱/۵ متری به حذف ۲۴ درصد PAHs استفاده از پرسولفات + الکتروکنتیک منجر به ۳۵ درصد حذف شد.	

نویسنده	سال	نوع فرایند مورد استفاده	آلاینده مورد بررسی (غلظت)	مشخصات پایلوت طراحی شده	نوع الکتروود	الکتروولت مورد استفاده	نوع و مقدار خاک آلوده	راندمان حذف
Niqui و همکاران	۲۰۱۰	الکتروکننتیک به همراه تجزیه زیستی	PAHs غلظت اولیه ۵۰ میلی گرم بر کیلوگرم	پایلوت ساخته شده از جنس شیشه همراه با فیلترهای شمعی شکل حاوی الکتروولت که اجازه تعویض الکتروولت را می داد فاصله بین الکتروودها ۱۶ سانتی متر بود	تیتانیم پوشیده شده با پلاتین ولتاژ ۱/۱ ولت بر سانتی متر	آب	۳۰۰ گرم خاک رس کریوزوت با آلودگی میزبان اجزیه قدیمی ۶۰ درصد رس، ۳۷ درصد سیلت	نتایج نشان داد که الکتروکننتیک میزبان اجزیه زیستی را افزایش می دهد. بعد از ۱۸ روز غلظت PAHs از ۵۰ به ۲۳ میلی گرم بر کیلوگرم کاهش یافت
WANG و همکاران	۲۰۱۳	الکتروکننتیک	PAHs غلظت اولیه ۲۲۰ میلی گرم بر کیلوگرم	محفظه خاک با ابعاد ۸×۱۲×۲۴ سانتی متر	از جنس فولاد ضدزنگ با ابعاد ۰/۵×۱۲ سانتی متر با ولتاژ ۱ و ۲ ولت بر سانتی متر با برق DC	آب	خاک رسی با رطوبت حدود ۲۰ درصد و pH ۸/۵ به میزان ۱۹ درصد حذف شد و این ولتاژ به عنوان ولتاژ بهینه توصیه شد.	بعد از ۲۳ روز با رطوبت حدود ۲۰ درصد و pH ۸/۵ به میزان ۱۹ درصد حذف شد
Boulakradec و he همکاران	۲۰۱۵	الکتروکننتیک به همراه سورفکتانت های آنیونی و غیر یونی (SDS و Triton X100 و Tween 80)	آلیفاتیک هیدروکربن ها PAHs و غلظت اولیه ۲۰۰۰ میلی گرم بر کیلوگرم	راکتور از جنس شیشه با قطر داخلی ۴ و طول ۲۰ سانتی متر. انتهای هر دو طرف با میکروفیلتر شیشه ای و سنگ های متخلخل بسته شد. الکتروولت باز چرخش می شد.	گرافیت با سطح ۳۴ سانتی متر مربع ولتاژ ۳۰ ولت	SDS ۰/۰۱ مولار به عنوان کاتالیت و TX100 ۳ به همراه آنالیت	۴۰۰ گرم خاک آلوده در حذف آلاینده ها را SDS داشت. استفاده SDS به عنوان کاتولیت و T80 به عنوان آنالیت	بعد از ۱۰ روز بیشترین کارایی در حذف آلاینده ها را SDS داشت. استفاده SDS به عنوان کاتولیت و T80 به عنوان آنالیت بیشترین راندمان (۶۹ درصد) را داشت
Hahladakis و همکاران	۲۰۱۶	الکتروکننتیک به همراه سورفکتانت ها	PAHs بعد از غلظت اولیه ۲۰۱۴۵ میکروگرم	راکتور استوانه ای از جنس پلگسی گلاس با قطر ۱۰ و طول ۳۰ سانتی متر و مخزن الکتروولت با قطر ۱۰ و طول ۵ سانتی متر و استفاده از فیلتر کاغذی بین الکتروولت و خاک. گردش الکتروولت با پمپ پرستالیک و میزان ۰/۵ میلی لیتر در دقیقه	گرافیت استوانه ای با قطر ۰/۷ و طول ۱۰ سانتی متر ولتاژ ۰/۷ ولت بر سانتی متر	اسید استیک به عنوان کاتالیت و آب مقطر به عنوان آنالیت	۴۱۰۰ گرم رسوبات آلوده فلزات سنگین و مواد نفتی با رطوبت ۲۴ درصد	بعد از ۲۱ روز بیشترین حذف PAHs توسط اسید استیک و آب مقطر به عنوان الکتروولت به میزان ۵۰ درصد بود. سورفکتانت های غیر یونی در فرایند الکتروکننتیک بیشترین حذف PAH را داشت. با استفاده از Nonidet P40

نویسنده	سال	نوع فرایند مورد استفاده	آلاینده مورد بررسی (غلظت)	مشخصات پایلوت طراحی شده	نوع الکتروود	الکتروولت مورد استفاده	نوع و مقدار خاک آلوده	راندمان حذف
به‌عنوان الکتروولت مقدار ۶۴۹۵ میکروگرم از PAH حذف شد								
Li و همکاران	۲۰۱۶	الکتروکنتیک به همراه تجزیه زیستی	PAHs غلظت اولیه ۱۸۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم	محفظه خاک از جنس پیرکس با طول ۱۲×۲۴ سانتی‌متر. ۱۰× طول و قطر ۰/۵ سانتی‌متر ولتاژ ۱ ولت بر سانتی‌متر	گرافیت با ابعاد ۱۵ سانتی‌متر طول و قطر ۰/۵ سانتی‌متر ولتاژ ۱ ولت بر سانتی‌متر	بدون الکتروولت	خاک رسی- شنی آلوده به PAH از یک منطقه صنعتی و خاک آزمایشگاهی PAHs نسبت به تجزیه زیستی به تنهایی شد.	استفاده از الکتروکنتیک همراه با تجزیه زیستی منجر به افزایش ۱۵ درصدی در میزان حذف PAHs نسبت به تجزیه زیستی به تنهایی شد.
Secord و همکاران	۲۰۱۶	الکتروکنتیک به همراه تجزیه زیستی	PAHs غلظت اولیه ۱۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم	راکتور با حجم ۱۵/۷ سانتی‌متر مکعب	فولاد ضدزنگ	باقر فسفات ۰/۱ مولار و pH برابر با ۷	۱۵ گرم خاک شنی طبیعی آلوده غیربومی نیز می‌توانند تحت شرایط الکتروکنتیک PAH را تجزیه کنند	نتایج نشان داده باکتری‌های غیربومی نیز می‌توانند تحت شرایط الکتروکنتیک PAH را تجزیه کنند
Wang و همکاران	۲۰۱۶	الکتروکنتیک به همراه تجزیه زیستی	PAHs غلظت اولیه ۹۴/۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم	سلیند از جنس PVC و به استوانه‌ای شکل به طول ۷۵۰ و قطر ۳۰۰ میلی‌متر. چرخش الکتروولت با پمپ پرستالیک انجام می‌شد	گرافیت با قطر ۲۶۰ میلی‌متر ولتاژ ۱ ولت بر سانتی‌متر	آب	خاک منطقه صنعتی از نوع رسی-شنی PAHها بین ۵۰ تا ۵۶ درصد بود. در حالی که در حالت عادی بدون استفاده از الکتروکنتیک این مقدار ۲۵ تا ۳۰ درصد بود	بعد از ۲۰۰ روز میزان حذف PAHها بین ۵۰ تا ۵۶ درصد بود. در حالی که در حالت عادی بدون استفاده از الکتروکنتیک این مقدار ۲۵ تا ۳۰ درصد بود
Tian و همکاران	۲۰۱۷	الکتروکنتیک به همراه بیو سورفاکتانت‌ها	آلاینده‌های آلی PAHs و PCBs	جنس polytetrafluoroethylene (PTFE) شامل یک سیلندر به قطر ۹/۴ سانتی‌متر و طول ۱۴ سانتی‌متر	دو صفحه گرافیتی ولتاژ ۱ ولت بر سانتی‌متر به صورت سیکل ۵ روز کار و ۲ روز	مخلوط رامنولیپید ۳۸۰ گرم در لیتر و اسیداستیک در آب مقطر به‌عنوان کاتولیت و آنالیت. مخلوط ساپونین و اسید استیک ۰/۲ مول در لیتر و مخلوط ساپونین و اسیداستیک ۰/۱ مول در لیتر	۳۸۰ گرم رسوب از نمونه واقعی و ۰/۲ مول در لیتر بهترین عملکرد را در حذف PAHs و PCBs داشت. حذف به ترتیب ۲۹ و ۳۹ درصد بود.	بعد از ۲۸ روز مخلوط ساپونین و اسیداستیک ۰/۲ مول در لیتر بهترین عملکرد را در حذف PAHs و PCBs داشت. حذف به ترتیب ۲۹ و ۳۹ درصد بود.

۴. بحث و نتیجه‌گیری

شد. براساس کلیدواژه‌های مربوط به آلاینده‌های نفتی در خاک و روش الکتروکنتیک در بررسی نهایی ۱۰ مقاله

در این مطالعه، به بررسی مروری نظام‌مند کارایی روش الکتروکنتیک در حذف PAHs از خاک‌های آلوده پرداخته

روش الکتروکنتیک به همراه تجزیه زیستی، کنترل pH خاک برای تصفیه موفقیت آمیز، بسیار مهم است. در تکنیک جدید، از یک آند و کاتد در یک محفظه آب مشابه استفاده می‌شود. فرضیه این است که قرار گرفتن یک آند و یک کاتد در یک محفظه آب کنار یکدیگر، منجر به ایجاد یون‌های هیدروژن در آند و خنثی کردن یون‌های هیدروکسیلی تولید شده در کاتد و در نتیجه، تولید آب می‌شود؛ بنابراین این تکنیک می‌تواند pH خاک را بدون نیاز به پمپاژ الکتروولت تثبیت کند.

۲.۴. گرادیان ولتاژ و جنس الکترو

به طور کلی، استفاده از جریان الکتروسیسته در یک محیط خاص می‌تواند تأثیرات مستقیم یا غیرمستقیمی بر میکروارگانیسم‌های موجود داشته باشد. یک مثال از تأثیر مستقیم، پارگی در غشای سلولی به دلیل گرادیان ولتاژ بیش از ۰/۴ ولت در دیواره سلولی است (۳۳). تأثیرات غیرمستقیم عبارتند از: تولید محصولات جانبی که برای میکروارگانیسم‌ها مضر هستند مانند محصولات خوردگی تولید شده توسط الکترودهای فلزی که از طریق واکنش‌های الکترولیز حل می‌شوند (۲۶). بخش عمده‌ای از تحقیقات به منظور بررسی تأثیر جریان الکتریکی بر زنده بودن باکتری‌ها برای مقاصد ضد عفونی و در صنایع غذایی انجام شده است (۲۱). برای مثال، استفاده از جریان دائمی پالس DC برای کشتن مخمر و باکتری مورد بررسی قرار گرفته است (۱۹) و نتایج نشان داد است که جریان DC، و نه درجه حرارت یا محصولات الکترولیز، باعث مرگ یا غیرفعال سازی میکروارگانیسم‌ها می‌گردد. در دهه گذشته، محققان تأثیر جریان الکتریکی بر تفتیه به روش الکتروکنتیک به همراه تجزیه زیستی را بررسی کرده‌اند. استفاده از روش الکتروکنتیک برای حذف پنتادکان از یک خاک کائولینیت نشان داد بهترین ولتاژ برای حذف آلاینده مورد بررسی در تراکم جریان الکتریکی میان ۰/۶۳ میلی‌آمپر بر سانتی‌متر مربع در مقایسه با مقادیر بالاتر و پایین‌تر گرادیان ولتاژ بود (۲۵). مطالعه دیگری نشان داد که استفاده از میدان الکتریکی بهینه برای حذف آلاینده‌ها به روش الکتروکنتیک نه تنها در حذف آلاینده‌ها بلکه همچنین در حفظ بیشتر میکروارگانیسم‌ها مؤثر بوده است (۲۶). نتایج این مطالعه نشان داده ۳۷ درصد کل هیدروکربن‌های نفتی از ناحیه نزدیک به آند با میدان الکتریکی ۲ ولت بر سانتی‌متر حذف شده است. در

به طور دقیق، کارایی این روش در حذف PAHs بر اساس روش‌های تلفیقی متفاوت به همراه الکتروکنتیک، تجزیه و تحلیل شد. با توجه به بررسی انجام شده، مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر فرایند الکتروکنتیک به شرح زیر می‌باشد:

۱.۴. تغییرات pH در بافت خاک

تغییر شدید در pH خاک (اسیدی در نزدیکی آند و قلیایی در نزدیکی کاتد) نقش مهمی در نتیجه حذف مواد آلی و سایر آلاینده‌های خاک از طریق روش الکتروکنتیک و تخریب آلاینده‌ها به وسیله فرایند تلفیقی تجزیه زیستی-الکتروکنتیک دارد. اکثر فلزات سنگین در pH کمتر از ۷ محلول هستند و در pH بالاتر از ۷ رسوب می‌کنند. به طور معمول، pH خاک در روش الکتروکنتیک در نزدیکی آند در محدوده ۲-۳/۵ و در نزدیکی کاتد بین ۸-۱۱ است (۳۰). به عبارت دیگر، در روش الکتروکنتیک، یک pH بهینه وجود دارد که در آن، توانایی باکتری در تخریب یک آلودگی خاص بهینه است. اکثر باکتری‌ها می‌توانند در محدوده pH بین ۶ تا ۸ زندگی کنند. سویه‌های خاصی از باکتری‌ها قادر هستند pH‌های شدید ($pH < 2$ یا $pH < 10$) را تحمل کنند. بسیاری از محققان، تأثیرات pH بر تجزیه زیستی در روش الکتروکنتیک را با استفاده از روش‌های معمول بررسی کرده‌اند. تکنیک‌های جدیدی که برای غلبه بر تأثیر منفی تغییرات pH پیشنهاد شده‌اند، هزینه‌های بالایی دارند یا برای روش تجزیه زیستی همراه با الکتروکنتیک در سطح کاربردی مناسب نیستند. جابه‌جایی آند نسبت به کاتد، یکی از روش‌های مؤثری است که می‌تواند تا حدودی این مشکل را حل کند؛ هرچند این تکنیک فقط برای تصفیه فلزات سنگین به روش الکتروکنتیک مناسب است؛ زیرا تغییر مکرر آند، باعث کاهش pH در کل بافت خاک ($pH \leq 5$) و در نتیجه واجذب این فلزات از خاک می‌گردد اما برای تجزیه زیستی، مناسب نیست.

در برخی مطالعات، از الکتروولت برای حذف این مشکل استفاده شده است. این تکنیک می‌تواند برای روش الکتروکنتیک به همراه تجزیه زیستی، مؤثر باشد. با این حال، کاربرد میدانی آن به دلیل نیاز به پمپاژ مداوم، نیاز به هزینه بسیار بالا دارد. بنابراین، گردش محلول الکتروولت (آنولیت و کاتولیت) در محفظه الکتروود، یک تکنیک مشکل برای کاربرد در مقیاس میدانی است. در

فعالیت‌های میکروبی داشته است. از سوی دیگر، استفاده مداوم از فرایند الکتروکینتیک با استفاده از ولتاژ بالا برای مدت‌زمان طولانی می‌تواند درجه حرارت داخل خاک تحت تصفیه را افزایش دهد. درجه حرارت بالا تأثیر مثبتی بر زنده ماندن میکروارگانیسم‌ها دارد. برای جلوگیری از تأثیرات نامطلوب دمای بالا (۱۱)، از جریان متناوب استفاده شده است. استفاده از وقفه‌های جاری نه تنها افزایش دما را کنترل می‌کند بلکه موجب افزایش راندمان در فرایند الکتروکینتیک می‌شود (۱۲).

۴.۴. در دسترس بودن آلاینده‌ها برای میکروارگانیسم‌ها

دو ایده مختلف درباره دسترسی میکروارگانیسم‌ها به آلاینده‌ها برای تجزیه آن وجود دارد. بعضی محققان معتقدند که باکتری‌ها می‌توانند آلاینده‌ها را از بین ببرند، حتی اگر به ماتریس خاک متصل باشند (۵۳). محققان دیگر، واجذب آلاینده‌ها را از خاک به‌عنوان یک پیش‌شرط می‌دانند (آلاینده‌ها باید از ماتریس خاک قبل از مصرف و تجزیه توسط باکتری‌ها جدا شوند) (۱۴، ۱۵). جریان الکترواسمزی، یک جریان بین دو لایه ایجاد می‌کند؛ بنابراین می‌تواند واجذب آلاینده‌ها را افزایش دهد (۱۶). به‌تازگی، نویسندگان اثربخشی جریان الکترواسمزی را در مقایسه با جریان هیدرولیکی در تحریک تخلیه آلی آلاینده‌ها بررسی کرده‌اند (۱۷). نتایج نشان داد که غلظت آلودگی در پساب پس از آزمایش‌های تخلیه با استفاده از جریان الکترواسمزی سه تا چهار برابر بیشتر از غلظت در آزمون جریان هیدرولیکی است. همچنین مصرف انرژی در طول تست‌های هیدرولیکی سه برابر بیشتر از مصرف انرژی در طول آزمون‌های الکترواسمزی بود.

۴.۵. دسترسی به منبع انرژی برای فرایند الکتروکینتیک

مصرف انرژی، مهم‌ترین جزء از هزینه‌های کل در فرایند الکتروکینتیک است. مصرف انرژی بالا هزینه کلی فرایند تصفیه را افزایش می‌دهد و می‌تواند مانع عمده‌ای برای محدود کردن کاربردهای گسترده این فناوری شود. با این وجود، هزینه انرژی به میزان ۳۰ درصد کل هزینه فرایند تصفیه خاک به روش الکتروکینتیک است (۱۸). پروژه‌های تحقیقاتی بسیار اندک، هزینه انرژی بالا را رفع کرده‌اند (۱۹). انرژی خورشیدی، منبع انرژی تجدیدپذیر بدون هیچ‌گونه تأثیر منفی بر محیط‌زیست، یک گزینه جدید برای تأمین انرژی موردنیاز برای فرایند الکتروکینتیک است که از لحاظ اقتصادی به‌ویژه برای مکان‌هایی که دور از

یک مطالعه دیگر، مشاهده شد که میکروارگانیسم‌ها پس از اینکه تحت یک میدان الکتریکی حرکت داده می‌شوند می‌توانند مواد آلی را تجزیه کنند (۱۶).

مطالعات بسیار کمی در مورد تأثیر مواد الکتروود بر تفیبه به روش الکتروکینتیک انجام شده است. برای مثال، نتایج یک مطالعه تجربی (۲۱) نشان داد که واکنش‌های الکتروشیمیایی بین مواد الکتروود و محصولات محیطی خاک بر فعالیت‌های جامعه میکروبی تأثیر می‌گذارد. اگر چه این مطالعه، اهمیت مواد الکتروود را در این فرایند مشخص می‌کند، واکنش‌های شیمیایی ممکن و محصولات فرعی شناسایی نشده است. این مطالعه همچنین نتیجه گرفته است که تأثیر ترکیبی شدت جریان و مدت‌زمان اعمال شده، عامل مهمی است که بر ارگان‌های زنده تأثیر می‌گذارد. در مطالعه‌ای دیگر، تأثیر مواد الکتروود در راندمان تصفیه در روش الکتروکینتیک با استفاده از مواد مختلف برای آند و کاتد از جمله فولاد، مس و کربن با ترکیب مختلف در کاتد و آند، بررسی شد (۱۲). نتایج نشان می‌دهد که استفاده از یک ماده خاص به‌عنوان آند و ماده‌ای دیگر به‌عنوان کاتد یا بالعکس می‌تواند تفاوت‌های قابل‌توجهی در عملکرد الکتروود (بهره‌وری) ایجاد کند. بنابراین، نیاز مبرم به تحقیق بیشتر برای بررسی تأثیر مواد الکتروود در فرایند الکتروکینتیک وجود دارد.

۴.۳.۴. دما

محققان بسیاری، افزایش دما در طول فرایندهای الکتروکینتیک را گزارش کرده‌اند. برای مثال، یک مطالعه نشان داد که درجه حرارت خاک بین ۵ تا ۲۰ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد و بیشترین افزایش در خاک در نزدیکی آند (۱۷) گزارش شده است. افزایش دما تا ۹۰ درجه سانتی‌گراد در حین استفاده از فرایند الکتروکینتیک در مقایسه میدانی برای حذف تریکلرواتیلن (۱۸) گزارش شد. اگرچه، این مطالعات به‌خوبی نشان می‌دهد که فرایندهای الکتروکینتیک می‌تواند حرارت تولید کند و درجه حرارت خاک را در منطقه تصفیه افزایش دهد، با این حال، اثر دما بر فرایند الکتروکینتیک به همراه تجزیه زیستی به‌طور کامل بررسی نشده است. تعداد محدودی از مطالعات درباره تأثیر افزایش دما طی فرایند الکتروکینتیک به همراه تجزیه زیستی بحث کرده‌اند. برای مثال، دسترسی میکروارگانیسم‌ها به مواد مغذی و اکسیژن در خاک بررسی شده است (۵۰) و گزارش گردید که افزایش دما در ارتباط با میدان الکتریکی، تأثیر مثبت بر

زمینه حذف هیدروکربن‌های پلی‌آروماتیک از خاک به روش الکتروکنتیک مورد بررسی قرار گرفت انجام یک پایلوت آزمایشگاهی برای بهینه گرفتن کلیه پارامترهای تأثیرگذار بر فرایند قبل از اجرای این روش به صورت میدانی توصیه می‌گردد.

تقدیر و تشکر

این مطالعه با حمایت شرکت نفت گاز شرق و شرکت نفت مناطق مرکز انجام گرفته است. نویسندگان این مطالعه بر خود لازم می‌دانند از کلیه عوامل و دست‌اندرکاران شرکت نفت و گاز شرق و شرکت نفت مناطق مرکز که ما را در انجام این پروژه یاری کرده‌اند تقدیر و تشکر نمایند.

دسترس هستند و هیچ خط انتقال انرژی برای آنها وجود ندارد قابل قبول است (۱۲، ۱۹). اگرچه، سلول‌های خورشیدی می‌تواند یک گزینه عالی برای تأمین انرژی در فرایند الکتروکنتیک باشند، مطالعات محدودی در زمینه استفاده از آن برای فرایند الکتروکنتیک به همراه تجزیه زیستی انجام شده است و همچنین تأثیر شب و نبود انرژی در این زمان بر میکروارگانیسم‌ها بررسی نشده است. استفاده از سلول‌های خورشیدی به‌عنوان منبع انرژی می‌تواند هزینه‌های انتقال برق و تلفات برق را در خطوط انتقال کاهش دهد. علاوه بر این، انرژی تولید شده توسط سلول‌های خورشیدی، سازگار با محیط‌زیست است. همچنین، پانل‌های خورشیدی میدان الکتریکی DC تولید می‌کنند که در فرایند الکتروکنتیک بدون نیاز به تغییر (قابل استفاده بدون نیاز به ترانسفورماتور DC) قابل استفاده است.

در مطالعه‌ای از پانل‌های خورشیدی برای تولید انرژی لازم برای تصفیه آلاینده فنانتین توسط فرایند الکتروکنتیک استفاده گردید. نتایج نشان داد که پانل‌های خورشیدی می‌توانند به‌طور موفقیت‌آمیز انرژی موردنیاز برای فرایند تصفیه هیدروکربن‌های نفتی توسط روش الکتروکنتیک را تولید کنند (۱۲). همچنین مشاهده شد که در بعضی موارد، قدرت تولید شده توسط پانل‌های خورشیدی در زمستان (زمین برف پوشیده شده) بالاتر از تابستان است (اثر البدو). علاوه بر این، ولتاژ صفر در شب می‌تواند دمای خاک را در استفاده از این روش در مقیاس میدانی کاهش دهد و از این نظر یک مزیت محسوب می‌شود.

۶.۴. نتیجه کلی

نتایج این تحقیق نشان داد که فرایند الکتروکنتیک به همراه تجزیه زیستی و بدون استفاده از هیچ‌گونه الکترولیت و با کمترین هزینه می‌تواند آلاینده‌های نفتی را از خاک‌های آلوده حذف کند. با توجه به شرایط جغرافیایی ایران و داشتن تعداد روزهای زیاد آفتابی برای تأمین انرژی الکتریکی موردنیاز این فرایند، می‌توان از پانل‌های خورشیدی استفاده کرد. در نظر گرفتن پارامترهای تأثیرگذار بر فرایند الکتروکنتیک در حذف آلاینده‌ها در ساخت و بهره‌برداری این نوع سیستم تصفیه می‌تواند کارایی فرایند را به شکل چشم‌گیری افزایش دهد. هر چند در این مطالعه، کلیه تحقیقات انجام شده در

References

- [1]. Virkutyte J, Sillanpää M, Latostenmaa P. Electrokinetic soil remediation—critical overview. *Science of the Total Environment*. 2002;289(1):97-121.
- [2]. Lopez-Vizcaino R, Navarro V, Leon MJ, Risco C, Rodrigo MA, Saez C, et al. Scale-up on electrokinetic remediation: Engineering and technological parameters. *Journal of hazardous materials*. 2016;315:135-43.
- [3]. Lin W, Guo C, Zhang H, Liang X, Wei Y, Lu G, et al. Electrokinetic-Enhanced Remediation of Phenanthrene-Contaminated Soil Combined with Sphingomonas sp. GY2B and Biosurfactant. *Applied biochemistry and biotechnology*. 2016;178(7):1325-38.
- [4]. dos Santos EV, Medeiros MO, dos Anjos ASD, MartinezHuitle CA, da Silva DR. Application of Electrochemical Technologies to Treat Polluted Soil by Diesel. In: Palmas S, Mascia M, Vacca A, editors. 10th Esee: European Symposium on Electrochemical Engineering. *Chemical Engineering Transactions*. 2014: 157-62.
- [5]. Mena E, Ruiz C, Villaseñor J, Rodrigo MA, Cañizares P. Biological permeable reactive barriers coupled with electrokinetic soil flushing for the treatment of diesel-polluted clay soil. *Journal of hazardous materials*. 2015;283:131-9.
- [6]. Ramírez EM, Camacho JV, Rodrigo MA, Cañizares P. Combination of bioremediation and electrokinetics for the in-situ treatment of diesel polluted soil: a comparison of strategies. *Science of the Total Environment*. 2015;533:307-16.
- [7]. Tsai TT, Sah J, Kao CM. Application of iron electrode corrosion enhanced electrokinetic-Fenton oxidation to remediate diesel contaminated soils: A laboratory feasibility study. *Journal of Hydrology*. 2010;380(1-2):4-13.
- [8]. Kim J, Lee K. Effects of electric field directions on surfactant enhanced electrokinetic remediation of diesel-contaminated sand column. *Journal of Environmental Science and Health - Part A Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*. 1999;34(4):863-77.
- [9]. Kim S, Han S. Application of an enhanced electrokinetic ion injection system to bioremediation. *Water, Air, & Soil Pollution*. 2003;146(1):365-77.
- [10]. Reddy KR, Darko-Kagya K, Al-Hamdan AZ. Electrokinetic remediation of pentachlorophenol contaminated clay soil. *Water, Air, & Soil Pollution*. 2011;221(1-4):35-44.
- [11]. Suzuki T, Moribe M, Okabe Y, Niinae M. A mechanistic study of arsenate removal from artificially contaminated clay soils by electrokinetic remediation. *Journal of hazardous materials*. 2013;254:310-7.
- [12]. López-Vizcaíno R, Yustres A, León M, Saez C, Cañizares P, Rodrigo M, et al. Multiphysics Implementation of Electrokinetic Remediation Models for Natural Soils and Porewaters. *Electrochimica Acta*. 2017;225:93-104.
- [13]. Risco C, López-Vizcaíno R, Sáez C, Yustres A, Cañizares P, Navarro V, et al. Remediation of soils polluted with 2, 4-D by electrokinetic soil flushing with facing rows of electrodes: a case study in a pilot plant. *Chemical Engineering Journal*. 2016;285:128-36.
- [14]. Ammami M, Portet-Koltalo F, Benamar A, Duclairoir-Poc C, Wang H, Le Derf F. Application of biosurfactants and periodic voltage gradient for enhanced electrokinetic remediation of metals and PAHs in dredged marine sediments. *Chemosphere*. 2015;125:1-8.
- [15]. Iannelli R, Masi M, Ceccarini A, Ostuni M, Lageman R, Muntoni A, et al. Electrokinetic remediation of metal-polluted marine sediments: experimental investigation for plant design. *Electrochimica Acta*. 2015;181:146-59.
- [16]. Saichek RE, Reddy KR. Electrokinetically enhanced remediation of hydrophobic organic compounds in soils: a review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. 2005;35(2):115-92.
- [17]. Leštan D, Luo C-l, Li X-d. The use of chelating agents in the remediation of metal-contaminated soils: a review. *Environmental Pollution*. 2008;153(1):3-13.
- [18]. Acar YB, Gale RJ, Alshawabkeh AN, Marks RE, Puppala S, Bricka M, et al. Electrokinetic remediation: basics and technology status. *Journal of hazardous materials*. 1995;40(2):117-37.
- [19]. Gomes HI, Dias-Ferreira C, Ribeiro AB. Electrokinetic remediation of organochlorines in soil: enhancement techniques and integration with other remediation technologies. *Chemosphere*. 2012;87(10):1077-90.
- [20]. Page MM, Page CL. Electroremediation of contaminated soils. *Journal of Environmental Engineering*. 2002;128(3):208-19.
- [21]. Mena E, Villaseñor J, Rodrigo MA, Cañizares P. Electrokinetic remediation of soil polluted with insoluble organics using biological permeable reactive barriers: Effect of periodic polarity reversal and voltage gradient. *Chemical Engineering Journal*. 2016;299:30-6.
- [22]. Lee J-Y, Kwon T-S, Park J-Y, Choi S, Kim EJ, Lee HU, et al. Electrokinetic (EK) removal of soil co-contaminated with petroleum oils and heavy metals in three-dimensional (3D) small-scale reactor. *Process Safety and Environmental Protection*. 2016;99:186-93.
- [23]. Dong Z-Y, Huang W-H, Xing D-F, Zhang H-F. Remediation of soil co-contaminated with petroleum and heavy metals by the integration of electrokinetics and biostimulation. *Journal of hazardous materials*. 2013;260:399-408.
- [24]. Boulakradeche MO, Akretche DE, Cameselle C, Hamidi N. Enhanced Electrokinetic Remediation of Hydrophobic Organics contaminated Soils by the Combinations of Non-Ionic and Ionic Surfactants. *Electrochimica Acta*. 2015;174:1057-66.
- [25]. Hahladakis JN, Latsos A, Gidarakos E. Performance of electroremediation in real contaminated sediments using a big cell, periodic voltage and innovative surfactants. *Journal of hazardous materials*. 2016;320:376-85.
- [26]. Tian Y, Boulangé-Lecomte C, Benamar A, Giusti-Petruciani N, Duflo A, Olivier S, et al. Application of a crustacean bioassay to evaluate a multi-contaminated (metal, PAH, PCB) harbor sediment before and after electrokinetic remediation using eco-friendly enhancing agents. *Science of the Total Environment*. 2017;607-608:944-53.
- [27]. Niqui-Arroyo JL, Ortega-Calvo JJ. Effect of electrokinetics on the bioaccessibility of polycyclic aromatic hydrocarbons in polluted soils. *Journal of environmental quality*. 2010;39(6):1993-8.
- [28]. Li FM, Guo SH, Hartog N, Yuan Y, Yang XL. Isolation and characterization of heavy polycyclic aromatic hydrocarbon-degrading bacteria adapted to electrokinetic conditions. *Biodegradation*. 2016;27(1):1-13.
- [29]. Secord EL, Kottara A, Van Cappellen P, Lima AT. Inoculating Bacteria into Polycyclic Aromatic Hydrocarbon-Contaminated Oil Sands Soil by Means of Electrokinetics. *Water, Air, and Soil Pollution*. 2016;227(8).
- [30]. Wang CP, Zhang ZY, Xu W, Sun HW. Electrokinetic-Assisted Bioremediation of Field Soil with Historic Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Contamination. *Environmental Engineering Science*. 2016;33(1):44-52.
- [31]. Isosaari P, Piskonen R, Ojala P, Voipio S, Eilola K, Lehmus E, et al. Integration of electrokinetics and chemical oxidation for the remediation of creosote-contaminated clay. *Journal of hazardous materials*. 2007;144(1-2):538-48.
- [32]. Wang J, Li F, Li X, Wang X, Li X, Su Z, et al. Effects of electrokinetic operation mode on removal of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), and the indigenous fungal community in PAH-contaminated soil. *Journal of Environmental Science and Health - Part A Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*. 2013;48(13):1677-84.

Investigation the performance of electrokinetic method on removal of poly-aromatic hydrocarbons from contaminated soils: A systematic review

Seyed Mostafa Abtahi¹, Mohammad Taghi Alipour², Mahmoud Naqdbishi³, Gea Oliveri Conti⁴, Mohammad Miri^{5*}

1,2,3. Instructor, Health, Safety and Environment Group, Shargh Oil and Gas Company, Mashhad, Iran.

4. Environmental and Food Hygiene Laboratory, Department of Medical, Surgical Sciences and Advanced Technologies "G.F. Ingrassia", University of Catania, Catania, Italy.

5. Assistant Professor, Department of Environmental Health Engineering, Faculty of Health, Sabzevar University of Medical Sciences, Sabzevar, Iran.

Abstract

Introduction: Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) have several adverse effects on human health and environment in the short and long term. In this study, a systematic review of the studies carried out to date on the removal of PAHs from contaminated soils by electrokinetic method and determining the parameters affecting this process has been investigated.

Materials and Methods: This research is a systematic review study. For this purpose, the keywords related to PAHs pollutants and electrokinetic methods were first prepared. Search in scientific databases including Scopus, Web of Science and PubMed was done. After completion of the search, the findings of search was transferred to the Endnote software and screening was done to reach articles that are fully related to the subject.

Results: A total of 571 articles were found until September 10, 2018 from the mentioned data basis. Then, 10 studies were carefully reviewed after removing duplicates and non-compliant items. The included studies were from 2000 to 2017. In 3 studies, electrochemical methods with surfactants and biosurfactants were used. Four studies utilized biodegradation techniques along with electro-kinetics. Combination of the electrokinetic with other processes can increase the efficiency of this process in removing PAHs from soil in a short period (less than 1 month).

Conclusion: Considering the influence of different parameters on the process, it is recommended to conduct a pilot test to optimize the process before the implementation of this method.

Received: 2019/06/03

Accepted: 2019/10/20

Keywords: Contaminated soils, Polyaromatic hydrocarbons, Systematic review, Electroconect.