# 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]، گئا اولیوری کنتی[٤]، محمد میری[۵*]**

۱و۲و۳. 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.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۳/۱۳
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۷/۲۸

## چکیده

**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 الکتروکنیتیک 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 الکتروکنتیک 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 الکتروکنتیک به همراه سورفاکتانت‌ها و بیوسورفاکتانت‌ها شده بود. چهار مطالعه از روش تجزیه زیستی به همراه فرایند الکتروکنتیک بهره برده بود. تلفیق فرایند الکتروکنتیک 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، الکتروکنتیک.

* **نویسندهٔ 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 نویسندهٔ اول:** 0000-0002-9424-6487

## ۱. مقدمه

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 به کاربردن جریان الکتریکی مستقیم انجام می‌شود. در این روش برای پاک‌سازی خاک‌های آلوده، دو الکترود 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 اولین‌بار 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 والکتروفورز شامل انتقال ذرات باردار تحت تأثیر میدان الکتریکی می‌باشد. برای افزایش کارایی این روش و حلالیت بیشتر آلاینده‌ها از شلاته‌کننده‌های مختلف مثل NTA و EDTA استفاده می‌شود (۹, ۱۰). مهم‌ترین واکنش انتقال الکترون که در طول فرایند الکتروکینتیک در الکترودها رخ می‌دهد، واکنش الکترولیز آب است. طی این واکنش، در قسمت آند، یون‌های هیدروژن تولید می‌شوند که موجب کاهش pHمی‌گردد، درحالی که افزایش غلظت یون هیدروکسید در کاتد، باعث افزایش pH و بازی شدن آن می‌شود (۱۱). فرایند انتقال الکترون، تأثیر زیادی بر انحلال‌پذیری، 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 به‌صورت 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 الکتروکنیتیک 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، گران‌قیمت 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 الکتروکنتیک 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 هیدروکرین های پلی آروماتیک (PAHs)[1] 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

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 اب 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 الکتروکنیتیک 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 الکتروکنتیک تهیه شد. کلیدواژه‌های مورداستفاده شامل PAHs و Polycyclic aromatic hydrocarbons برای آلاینده موردبررسی و Electrokientic reclamation، Electrokinetics، Electroreclamation، Electroosmotic flow، EK، Electrokinetic soil flushing و Electrobioremediation بود. در ادامه، از این کلیدواژه‌ها در پایگاه‌های جستجوی مقالات علمی شامل Scopus، Web of Science و PubMed استفاده گردید. در جستجوی انجام شده، محدودیت زمانی و زبان در نظر گرفته نشد تا تمام مقالات مرتبط با موضوع، جمع‌آوری گردد. پس از اتمام جستجو در هر پایگاه، مقالات به نرم‌افزار Endnote منتقل شد. در محیط نرم‌افزار پس از حذف مواردی که به‌صورت تکراری از پایگاه‌های مختلف وارد شده است، ابتدا براساس عنوان مقالات، مواردی که به‌طور مشخص با موضوع در ارتباط نبود حذف شد، سپس چکیده مقالات باقی‌مانده، مطالعه شدند و در این مرحله نیز مواردی که ارتباط به موضوع موردنظر نداشت حذف گردید. در مرحله بعد، فایل کامل همه مقالاتی که غربال‌گری مراحل قبل باقی‌مانده تهیه شدند و به‌طور دقیق مطالعه شدند.

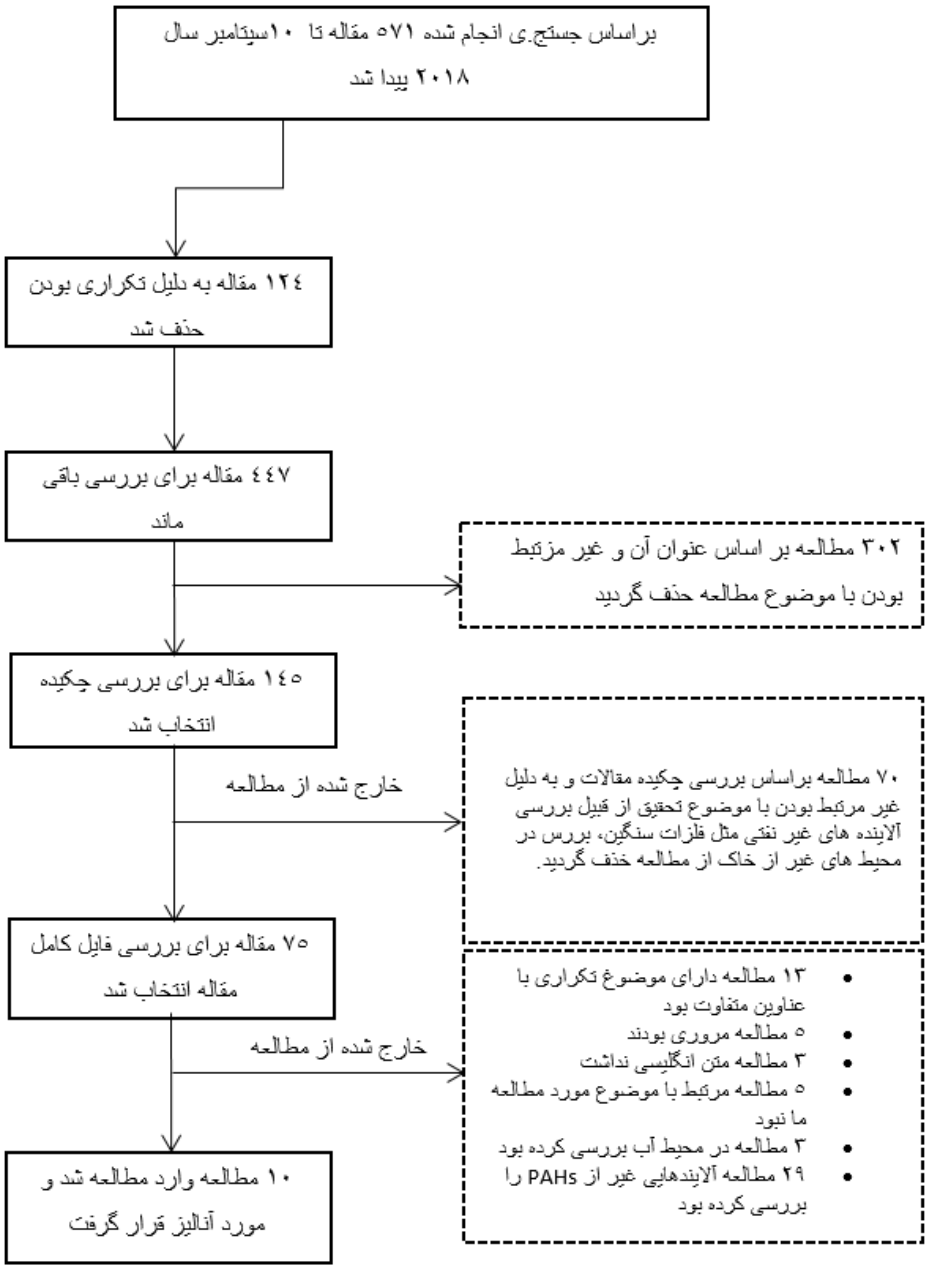
## ۳. یافته‌ها

نتایج مربوط به جستجو در پایگاه‌های علمی بیان شده، در جدول ۱ آمده است. بر اساس جدول ۱ بعد ترکیب کلیدواژه‌های مربوط به PAHs و روش الکتروکنتیک تعداد 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 |

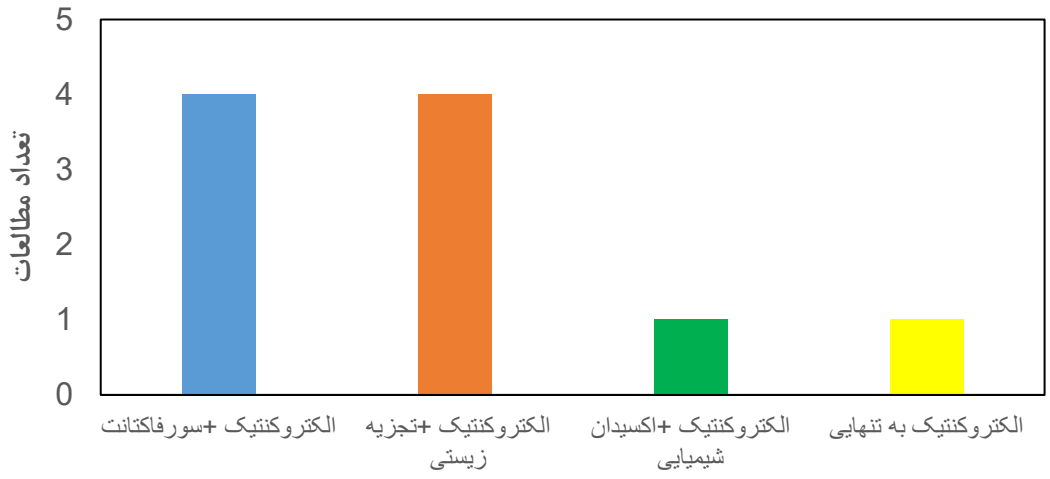
شکل ۱، دیاگرام مربوط به فرایند جستجو و فیلتر کردن مقالات پیدا شده در این مطالعه را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود در ابتدا ۵۷۱ مقاله تا تاریخ ۱۰ سپتامبر سال ۲۰۱۸ از پایگاه‌های ذکر شده پیدا گردید. سپس با حذف موارد تکراری، تعداد ۴۴۷ مقاله وارد مرحله بررسی عنوان مقالات و حذف موارد غیرمرتبط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




**شکل ۱. دیاگرام مربوط به بررسی سیستماتیک مقالات**

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 سال ۲۰۱۷ بود. در سه مطالعه، از روش الکتروکنتیک به همراه سورفاکتانت‌ها و بیوسورفاکتانت‌ها استفاده شده بود (۲۴-۲۶). چهار طالعه از روش تجزیه زیستی به همراه فرایند الکتروکنتیک بهره برده بودند (۲۷-۳۰). در یک مطالعه، از فرایند الکتروکنتیک همراه با شستشوی خاک با اکسیدان شیمیایی برای حذف PAHs از خاک استفاده گردیده بود (۳۱). در یک مطالعه، از هیچ‌گونه الکترولیتی استفاده نشده و از فرایند الکتروکنتیک در ترکیب با تجزیه زیستی برای بهبود فعالیت بیولوژیک میکروارگانسیم‌ها بهره گرفته شده بود (۲۸). در سه مطالعه، تنها از آب به‌عنوان الکترولیت در فرایند استفاده گردیده بود (۲۷, ۳۰, ۳۲). بررسی انجام‌شده نشان داد هرچند فرایند الکتروکنتیک

به‌تنهایی و بدون استفاده از الکترولیت‌هایی مثل سورفاکتانت‌ها کارایی بالایی در حذف آلاینده‌ها نفتی ندارد، اما از تلفیق این فرایند با سایر فرایندها یا استفاده از الکترولیت‌های مناسب می‌تواند کارایی این فرایند را تا حد بسیار بالایی در زمان‌های نسبتاً کوتاه (کمتر از ۱ ماه) افزایش دهد (جدول ۲).




**شکل ۲. تعداد مقالات بررسی‌شده براساس نوع فرایند مورداستفاده 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 مورداستفاده | آلاینده موردبررسی (غلظت) | مشخصات پایلوت طراحی‌شده | نوع الکترود | الکترولیت مورداستفاده | 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 پریستالیک برای انتقال آب از آند به کاتد و بعد به ستون تبادل یون و یک ستون کربن فعال. پایلوت کوچک شامل ۶ محفظه ۶×۳×۴ سانتی‌متر. مقیاس بزرگ با ابعاد ۵۰×۵۰×۳۰ 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 و ۰ تا ۱ آمپر و حداکثر ولتاژ ۶۰ | اسید استیک moldm$^{-3}$ ۰/۰۵ و پریدین دی‌کربکسیک اسید به مقدار ۶۰ سانتی‌مترمکعب در روز اضافه می‌شد | ۱۰ گرم خاک به‌ازای هر محفظه برای مقیاس کوچک. برای مقیاس بزرگ در مجموع ۴۶/۷ کیلوگرم | در مقیاس کوچک بعد ۲۳ روز کل PAHs به میزان ۹۴ درصد حذف شد. در مقیاس بزرگ 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 الکترولیت با یک ورق اکریلیک پوشیده شده بود از پروپیلین ژتوتکستایل برای پوشش منافذ بین خاک و الکترولیت استفاده شد. الکترودها با هم ۱۹ سانتی‌متر فاصله داشتند | ابعاد الکترود ۴/۸×۲۲ و جنس استیل ضدزنگ ۴۸ ولت بر متر جریان مستقیم ۴/۷ ولت جریان متناوب | ۶۵۰ میلی‌لیتر بافر ۰/۰۵ مولار K2HPO4/KH2PO4 که ۸/۵pH برای آند و pH ۶/۵ برای کاتد استفاده شد که بافر با پمپ پریستالتیک تزریق می‌شد. برای آند ۹۰ تا ۳۵۰ میلی‌لیتر در روز بود. برای کاتد ۴۵ میلی‌لیتر در روز بود | خاک رس آلوده برداشته‌شده از عمق ۱ تا ۱/۵ متری | پس از ۵۶ روز فرایند الکتروکنتیک به‌تنهایی منجر به حذف ۲۴ درصد PAHs شد. استفاده از پرسولفات + الکتروکنتیک منجر به ۳۵ درصد حذف شد. |

| نویسنده | سال | نوع فرایند مورداستفاده | آلاینده موردبررسی (غلظت) | مشخصات پایلوت طراحی‌شده | نوع الکترود | الکترولیت مورداستفاده | نوع و مقدار خاک آلوده | راندمان حذف |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Niqui و همکاران | ۲۰۱۰ | الکتروکنتیک به همراه تجزیه زیستی | PAHs غلظت اولیه ۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم | پایلوت ساخته شده از جنس شیشه همراه با فیلترهای شمعی شکل حاوی الکترولیت که اجازه تعویض الکترولیت را می‌داد فاصله بین الکترودها ۱۶ سانتی‌متر بود | تیتانیم پوشیده شده با پلاتین ولتاژ ۱/۱ ولت بر سانتی‌متر | آب | ۳۰۰ گرم خاک رس کریوزوت با آلودگی قدیمی ۶۰ درصد رس، ۳۷ درصد سیلت | نتایج نشان داد که الکتروکینتیک میزان اجزیه زیستی را افزایش می‌دهد. بعد از ۱۸ روز غلظت PAHs از ۵۰ به ۲۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم کاهش یافت |
| WANG و همکاران | ۲۰۱۳ | الکتروکنتیک | PAHs با غلظت اولیه ۲۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم | محفظه خاک با ابعاد ۲۴×۱۲×۸ سانتی‌متر | از جنس فولاد ضدزنگ با ابعاد ۰/۵×۱۲ سانتی‌متر با ولتاژ ۱ و ۲ ولت بر سانتی‌متر با برق DC | آب | خاک رسی با رطوبت حدود ۲۰ درصد و pH ۸/۵ | بعد از ۲۳ روز با ولتاژ ۱ ولت بر سانتی‌متر PAH به میزان ۱۹ درصد حذف شد و این ولتاژ به‌عنوان ولتاژ بهینه توصیه شد. |
| Boulakradech و همکاران | ۲۰۱۵ | الکتروکنتیک به همراه سورفکتانت‌های آنیونی و غیریونی (SDS و Triton X100 و Tween 80) | آلیافاتیک هیدروکربن‌ها و PAHs غلظت اولیه ۲۰۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم | راکتور از جنس شیشه با قطر داخلی ۴ و طول ۲۰ سانتی‌متر. انتهای هر دو طرف با میکروفیلتر شیشه‌ای و سنگ‌های متخلخل بسته شد. الکترولیت باز چرخش می‌شد. | گرافیت با سطح ۳۴ سانتی‌مترمربع ولتاژ ۳۰ ولت | SDS ۰/۰۱ مولار به عنوان کاتالیت و T80 به همراه TX100 ۳ درصد به‌عنوان آنالیت | ۴۰۰ گرم خاک آلوده خاک آلوده‌شده با هگزادکان و آنتراسین | بعد ۱۰ روز بیشترین کارایی در حذف آلاینده‌ها را SDS داشت. استفاده SDS به‌عنوان کاتولیت و T80 به‌عنوان آنالیت بیشترین راندمان (۶۹ درصد) را داشت |
| Hahladakis و همکاران | ۲۰۱۶ | الکتروکنتیک به همراه سورفاکتانت‌ها | PAHs بعد از غلظت اولیه ۲۰۱۴۵ میکروگرم | راکتور استوانه‌ای از جنس پلگسی گلاس با قطر ۱۰ و طول ۳۰ سانتی‌متر و مخزن الکترولیت با قطر ۱۰ و طول ۵ سانتی‌متر و استفاده از فیلتر کاغذی بین الکترولیت و خاک. گردش الکترولیت با پمپ پریستالیک و میزان ۰/۵ میلی‌لیتر در دقیقه | گرافیت استوانه‌ای با قطر ۰/۷ و طول ۱۰ سانتی‌متر برق DC با ولتاژ ۰/۷ ولت بر سانتی‌متر | اسید استیک به‌عنوان کاتالیت و آب مقطر به عنوان آنالیت | ۴۱۰۰ گرم رسوبات آلوده به فلزات سنگین و مواد نفتی با رطوبت ۲۴ درصد | بعد از ۲۱ روز بیشترین حذف PAHs توسط اسیداستیک و آب مقطر به‌عنوان الکترولیت به میزان ۵۰ درصد بود. سورفتکتانت‌های غیریونی در فرایند الکتروکنتیک بیشترین حذف PAH را داشت. با استفاده از Nonidet P40 |

| نویسنده | سال | نوع فرایند مورداستفاده | آلاینده موردبررسی (غلظت) | مشخصات پایلوت طراحی‌شده | نوع الکترود | الکترولیت مورداستفاده | نوع و مقدار خاک آلوده | راندمان حذف |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | | به‌عنوان الکترولیت 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 ۲۴×۱۲ ×۱۰ سانتی‌متر. | گرافیت با ابعاد ۱۵ سانتی‌متر طول و قطر ۰/۵ سانتی‌متر ولتاژ ۱ ولت بر سانتی‌متر | بدون الکترولیت | خاک رسی-شنی آلوده به PAH از یک منطقه صنعتی و خاک آزمایشگاهی | استفاده از الکتروکنتیک همراه با تجزیه زیستی منجر به افزایش ۱۵درصدی در میزان حذف PAHs نسبت به تجزیه زیستی به‌تنهایی شد. |
| **Secord و همکاران** | ۲۰۱۶ | الکتروکنتیک به همراه تجزیه زیستی | PAHs غلظت اولیه ۱۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم | راکتور با حجم ۱۵/۷ سانتی‌مترمکعب | فولاد ضدزنگ | باقر فسفات ۰/۱ مولار و pH برابر با ۷ | ۱۵ گرم خاک شنی طبیعی آلوده | نتایج نشان داده باکتری‌های غیربومی نیز می‌توانند تحت شرایط الکتروکنتیک PAH را تجزیه کنند |
| **Wang و همکاران** | ۲۰۱۶ | الکتروکنتیک به همراه تجزیه زیستی | PAHs با غلظت اولیه ۹۴/۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم | سلیند از جنس PVC و به استوانه‌ای شکل به طول ۷۵۰ و قطر ۳۰۰ میلی‌متر. چرخش الکترولیت با پمپ پریستالیک انجام می‌شد | گرافیت با قطر ۲۶۰ میلی‌متر ولتاژ ۱ ولت بر سانتی‌متر | آب | خاک منطقه صنعتی از نوع رسی-شنی | 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 به‌صورت سیکل ۵ روز کار و ۲ روز | مخلوط رامنولیپید ۱/۱ 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 | بعد از ۲۸ روز مخلوط ساپونین و اسیداستیک ۰/۲ مول در لیتر بهترین عملکرد را در حذف PAHs و PCBs داشت. راندمان حذف به‌ترتیب ۲۹ و ۳۹ درصد بود. |

## ٤. بحث و نتیجه‌گیری

در این مطالعه، به بررسی مروری نظام‌مند کارایی روش الکتروکنتیک در حذف PAHs از خاک‌های آلوده پرداخته شد. براساس کلیدواژه‌های مربوط به آلاینده‌های نفتی در خاک و روش الکتروکنتیک در بررسی نهایی ۱۰ مقاله

به‌طور 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:

### ۱.٤. 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 به‌وسیله فرایند تلفیقی تجزیه زیستی-الکتروکنتیک دارد. اکثر فلزات سنگین در pH کمتر از ۷ محلول هستند و در pH بالاتر از ۷ رسوب می‌کنند. به‌طور 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 اکتروکنتیک، 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 < ۲ یا > ۱۰) را تحمل کنند. بسیاری از محققان، تأثیرات pH بر تجزیه زیستی در روش الکتروکینتیک 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 ≤ 5) و در نتیجه واجذب این فلزات از خاک می‌گردد اما برای تجزیه زیستی، مناسب نیست.

در برخی مطالعات، از الکترولیت برای حذف این مشکل استفاده شده است. این تکنیک می‌تواند برای روش الکتروکنتیک به همراه تجزه زیستی، مؤثر باشد. با این حال، کاربرد میدانی آن به دلیل نیاز به پمپاژ مداوم، نیاز به هزینه بسیار بالا دارد. بنابراین، گردش محلول الکترولیت (آنولیت و کاتولیت) در محفظه الکترود، یک تکنیک مشکل برای کاربرد در مقیاس میدانی است. در روش الکتروکنتیک به‌همراه تجزیه زیستی، کنترل pH خاک برای تصفیه موفقیت‌آمیز، 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 الکترولیت تثبیت کند.

### ۲.٤. گرادیان ولتاژ و جنس الکترود

به‌طور کلی، استفاده از جریان الکتریسیته 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 به‌منظور بررسی تأثیر جریان الکتریکی بر زنده بودن باکتری‌ها برای مقاصد ضدعفونی 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 غیرفعال‌سازی میکروارگانیسم‌ها می‌گردد. در دهه گذشته، محققان تأثیر جریان الکتریکی بر تفیه به روش الکتروکینتیک به همراه تجزیه زیستی را بررسی کرده‌اند.

استفاده از روش الکتروکینتیک برای حذف پنتادکان از یک خاک کائولینیت نشان داد بهینه‌ترین ولتاژ برای حذف آلاینده موردبررسی در تراکم جریان الکتریکی میان ۰/۶۳ میلی‌آمپر بر سانتی‌مترمربع 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 الکتروکینتیک نه‌تنها 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

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 الکترود بر تفیه به روش الکتروکینتیک انجام شده است. برای مثال، نتایج یک مطالعه تجربی (۲۱) نشان داد که واکنش‌های الکتروشیمیایی بین مواد الکترود و محصولات محیطی خاک بر فعالیت‌های جامعه میکروبی تأثیر می‌گذارد. اگر چه این مطالعه، اهمیت مواد الکترود 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 الکترود در راندمان تصفیه در روش الکتروکنتیک با استفاده از مواد مختلف برای آند و کاتد از جمله فولاد، مس و کربن با ترکیب مختلف درکاتد وآند، 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 الکترود (بهره‌وری) ایجاد کند. بنابراین، نیاز مبرم به تحقیق بیشتر برای بررسی تأثیر مواد الکترود در فرایند الکتروکنتیک وجود دارد.

### ۳.٤. 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 مقایس 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 الکتروکنتیک 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 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 نه‌تنها افزایش دما را کنترل می‌کند بلکه موجب افزایش راندمان در فرایند الکتروکنتیک می‌شود (۱۲).

### ٤.٤. 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 الکترو اسمزی 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 الکترواسموزی 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 الکترواسموزی بود.

### ٥.٤. دسترسی به منبع انرژی برای فرایند الکتروکنتیک

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 الکتریکینیک است که از لحاظ اقتصادی به‌ویژه برای مکان‌هایی که دور از

دسترس هستند و هیچ خط انتقال انرژی برای آنها وجود ندارد قابل‌قبول است (۱۲، ۱۹). اگرچه، سلول‌های خورشیدی می‌تواند یک گزینه عالی برای تأمین انرژی در فرایند الکتروکینتیک باشند، مطالعات محدودی در زمینه استفاده از ان 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 الکتروکینتیک بدون نیاز به تغییر (قابل‌استفاده بدون نیاز به ترانسفورماتور DC ) قابل استفاده است.

در مطالعه‌ای از پانل‌های خورشیدی برای تولید انرژی لازم برای تصفیه آلاینده فنانترین 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.

### ٦.٤. 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 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.

## 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 ontaminated 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-Petrucciani N, Duflot 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 Abtahi[1], Mohammad Taghi Alipour[2], Mahmoud Naqdbishi[3], Gea Oliveri Conti[4], 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 bio-degradation 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.