امکان سنجی رفع آلودگی خاک با استفاده از روش الکتروکینتیک

مقاله علمی – پژوهشی

واحد قیاسی*، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده عمران و معماری، دانشگاه ملایر، ایران
میلاد کمال آبادی فراهانی، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده عمران و معماری، دانشگاه ملایر، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: V.ghiasi@malayeru.ac

دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۲۱– پذیرش: ۱۴۰۳/۰۱/۲۵
صفحه ۵۲۸-۵۰۷

چکیده

یکی از بحث‌های پر اهمیت پیرامون آلودگی محیط زیست آلودگی خاک می‌باشد. خاکی که آلوده باشد می‌تواند حیات موجودات را در خطر قرار دهد. به همین علت رفع انواع آلودگی از خاک و حتی کم کردن انواع آلودگی موجود در خاک از اهمیت به سزایی برخوردار می‌باشد. یکی از راه‌های پاک سازی خاک‌های آلوده و بهسازی آن روش الکتروکینتیک می‌باشد؛ که اصل این روش بر انتقال یون آلوده موجود در خاک بوسیله‌ی میدان الکتریکی ایجاد شده و از بین بردن و خنثی کردن یون آلوده یا خارج کردن آن از خاک می‌باشد. این روش کاربردی توانایی حذف آلودگی‌های مختلف از جمله انواع مواد نفتی و فلزات سنگین را دارا می‌باشد. در برخی مواقع می‌توان از این روش در کنار روش‌های دیگر بهسازی خاک یا حتی ترکیب این روش با برخی روش‌های دیگر نتیجه ی به مراتب بهتری را شاهد بود. مطالعه حاضر به تحقیق و پژوهش‌های صورت گرفته پیرامون رفع آلودگی خاک‌ها بوسیله‌ی روش الکتروکینتیک خواهد پرداخت.

واژه‌های کلیدی: الکتروکینتیک، رفع آلودگی خاک، فلزات سنگین، اصلاح خاک، میدان الکتریکی، هیدرو کربن‌های نفتی

۱- مقدمه

آلودگی خاک امروزه به یکی از مسائل مهم محیط زیست تبدیل شده از این جهات که هم برای انسان و هم موجودات زنده میتواند خطرزا باشد و حیات آنها را در تهدید کند و هم آنطور که انسان می‌بایست از خاک استفاده ببرد آن را دچار مشکل کند. دلیرج و همکاران در سال ۱۳۹۹ طی تحقیقی که انجام دادند متذکر شدند خاک‌ها و آب‌های زیرزمینی توسط آلاینده‌های معدنی شامل فلزات سنگین، عناصر رادیواکتیو و نمک‌های معدنی آلوده می‌شوند؛ و به دلیل سمی بودن آن‌ها، برای محیط زیست و انسان‌ها خطرات قابل توجهی خواهند داشت. بر خلاف آلاینده‌های آلی، فلزات سنگین در خاک زیست تخریب پذیر نیستند و برای یک مدت طولانی در خاک باقی می‌مانند و یا به آبخوان‌ها منتقل می‌شوند. با پیشرفت‌های سریع در زمینه انرژی هسته‌ای، آلودگی خاک با عناصر رادیواکتیو نیزابتلا به سرطان را در سراسر دنیا در سال‌های اخیر افزایش داده است. علاوه بر این ، عناصر رادیواکتیو نسبت به سایر آلاینده‌های معدنی خطر بیشتری دارند؛ که به طور قابل ملاحظه‌ای احتمال آسیب به بدن انسان از طریق سرطان زایی افزایدش می یابد . بنابراین، نیاز مبرمی به پیشرفت تکنولوژی در زمینه حذف آلاینده‌های معدنی از خاک وجود دارد. در سال‌های اخیر فناوری‌های زیادی برای پاکسازی و اصلاح خاک‌های آلوده به فلزات سنگین، مانند خاکشویی، گیاه پالایی، دفع حرارتی و پاکسازی الکتروکینتیک توسعه یافتند. در میان این روش‌ها، فناوری الکتروکینتیک روشی نوظهور برای پاکسازی محل آلوده شده با آلاینده‌های آلی و معدنی بوده و مناسب‌ترین روش پاکسازی برای محیط‌های متخلخل با نفوذ پذیری پایین شناخته می‌شود. در روش الکتروکینتیک، از گرادیان ولتاژ الکتریکی مستقیم یا جریان مستقیم با شدت کم عبوری از دو الکترود جایگذاری شده در خاک آلوده استفاده می‌شود و آلاینده‌ها به سمت الکترودها حرکت می‌کنند .

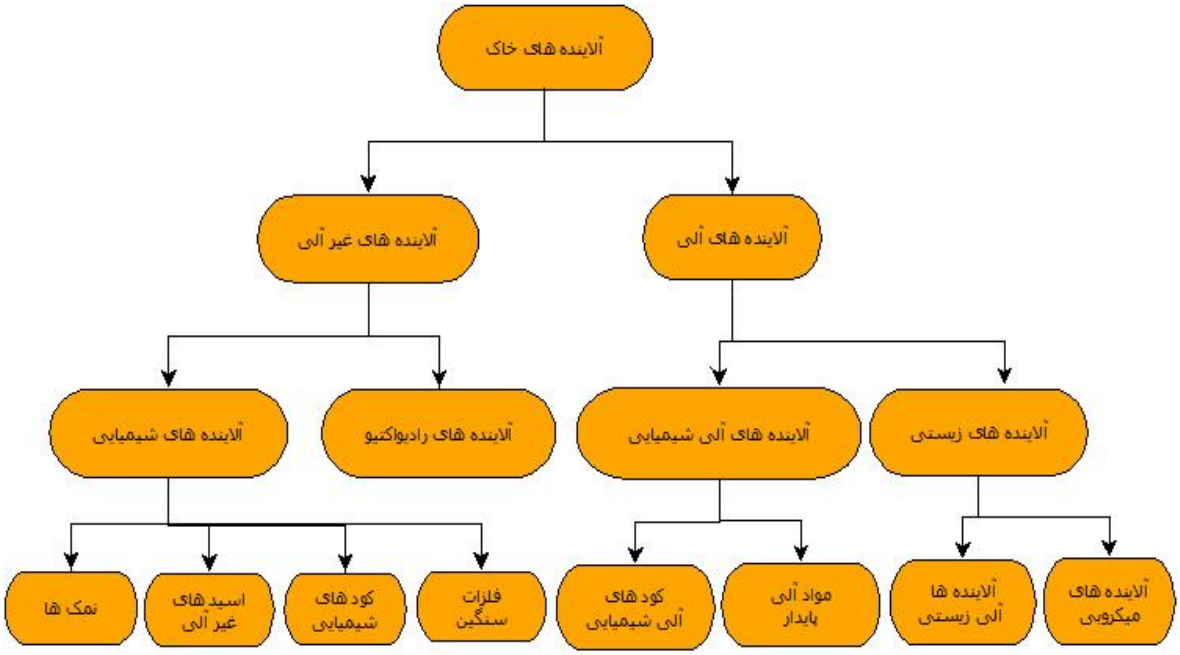
۲-پیشینه تحقیق

گلستانی‌فر در سال ۱۳۹۸ طی مطالعه‌ای بر روش‌های آلودگی خاک به مواد نفتی، به بررسی تاثیر روش الکتروکینتیک بر میزان حذف آلودگی و تغییرات PH خاک می‌پردازد. در شکل ۱ تقسیم بندی آلاینده‌های خاک براساس خصوصیات آلاینده‌ها شرح داده شده است.

قیاسی و همکاران در سالهای گذشته طی تحقیقات خود پیرامون سایر روش‌های پاکسازی خاک به نتایج زیر دست یافت. به طورکلی چهار دسته از فناوری‌های پاکسازی خاک‌های آلوده شناخته شده‌اند: روش‌های فیزیکی و شیمیایی، روش‌های بیولوژیکی، روش‌های تثبیت (همچنین ذخیره سازی وتثبیت)، روش‌های تخریب حرارتی که گاه ممکن است ترکیبی از این روش‌ها به کار رود (حافظ گلستانی فر، ۱۳۹۸).

۲-۱-روش‌های فیزیکی و شیمیایی

هدف از روش‌های فیزیکی و شیمیایی پالایش تغییر محیط شیمیایی به نحوی است که از انتقال مواد سمی به دیگر عناصر سیستم خاکی جلوگیری شود. مثال هایی که اینجا ارائه می‌شود توسط انتقال به گیاهان، آب زیرزمینی یا موجودات زنده‌ی خاک است. چنین اقدامات پیشگیرانه‌ای ممکن است شامل کاهش پویایی و تحرک تغییر ساختمان شیمیایی یا هرعامل دیگری باشد (حافظ گلستانی‌فر، ۱۳۹۸).



شکل ۱. تقسیم بندی آلاینده‌های خاک براساس خصوصیات آلاینده‌ها

روش‌های فیزیکی و شیمیایی شامل موارد زیرند:

حفاری و خاک برداری

در این روش آلاینده‌ها را به مکان دیگری انتقال داده و خاک آلوده را برای پاکسازی آلاینده‌ها به مکانی امن خارج از آن محل انتقال داده می‌شود . در این روش لازم است مرز آلودگی، شناسایی منطقه ای مناسب جهت تخلیه (لند فیل) و مقادیر زیادی ماده‌ی جایگزین سالم (خاک سالم) تعیین شود. از جمله مشکلات این روش، افزایش احتمال آلودگی آب زیرزمینی در اثر آلودگی ستون خاک، تردد زیاد برای جابجایی خاک، سر و صدا، آلودگی هوا و آب‌های سطحی است (حافظ گلستانی‌فر، ۱۳۹۸).

دفن کردن

در این روش، خاک‌های آلوده در یک یا چند محل جمع آوری شده و به منظور اجتناب از پراکندگی، آلاینده‌ها در یک گودال عمیق (لندفیل) دفن می‌شوند. باید محلی را انتخاب کرد که از هر نظر خصوصیات دفن پسماند را داشته باشد و تا حد امکان در آینده باعث آلودگی آب‌های زیرزمینی یا هوا نگردد (حافظ گلستانی‌فر، ۱۳۹۸).

اکسیداسیون

اکسیداسیون یک فناوری پالایش مؤثر متداول برای خاک‌های آلوده به وسیله‌ی مواد آلی و شیمیایی سمی و سیانید هاست. عوامل اکسیدکننده‌ی استفاده شده در این فناوری شامل دامنه‌ی وسیعی از مواد است که متداول‌ترینشان پراکسید هیدروژن، ازن و پرمنگنات پتاسیم هستند. استفاده از فناوری اکسیداسیون جهت احیاء در محل در مناطق منبع آلودگی و برای تصفیه‌ی نهر با موفقیت همراه بوده که عمدتاً برای بنزن، اتیل بنزن، تولوئن و زایلن به همراه فنول ها و آلکین‌ها استفاده می‌شوند . (حافظ گلستانی‌فر، ۱۳۹۸).

تبادل یون و ترسیب

ترکیبات خاک با مقادیر زیاد ظرفیت تبادل کاتیونی قادر به پیوند مواد شیمیایی آلی با بار مثبت و فلزات به روشی که آن‌ها را به طور شیمیایی بی‌تحرک می‌سازد و از این رو باعث کاهش خطر وارده توسط آن‌ها به محیط خاک می‌گردد. افزودن نرم کننده‌های خاک از قبیل رزین‌های مصنوعی زئولیت یا خاک رس به افزایش ویژگی‌های ظرفیت تبادل کاتیونی خاک کمک می‌کند و از این رو پیوند آلاینده‌های با بار مثبت را به گروه‌های عاملی منفی خاک ارتقاء می‌دهد (حافظ گلستانی‌فر، ۱۳۹۸).

جذب روی کربن فعال گرانوله

این فناوری بستگی به گرایش بیشتر ترکیبات آلی به جذب بر سطح کربن فعال دارد. تمایل جذب بسته به نقطه‌ی جوش، وزن مولکولی ماده‌ی آلی افزایش می‌یابد. ازاین رو فناوری جذب روی کربن فعال گرانوله برای ترکیبات آلی فرار، هیدروکربن‌های با وزن‌های مولکولی زیاد، ترکیبات آلی فرار هالوژنه و اشکال هالوژنه‌ی آن‌ها به همراه بعضی مواد منفجر شونده و آفت‌کش‌ها مناسب‌ترین است. پالایش از طریق جذب روی کربن فعال روشی است که می‌تواند در فاز مایع در زمان تصفیه‌ی آب زیرزمینی یا در فاز گازی مانند تصفیه‌ی گازهای خروجی از روش‌های پالایش استخراج بخار خاک اجرا گردد. رس با داشتن بار الکتریکی زیاد در بسیاری موارد یک جاذب مناسب برای جذب آلاینده‌هاست (حافظ گلستانی فر، ۱۳۹۸).

استخراج بخار خاک

استخراج بخار خاک که فناوری معروفی برای پالایش خاک است فرآیند نسبتا ساده ای به منظور حذف آلاینده‌های آلی فرار و آن‌هایی که به آسانی تبخیر می‌شوند از ناحیه‌ی هواده دارد که آلاینده‌های مقاوم یا تجمع یافته در بالای سطح ایستایی آب هستند. فرآیندهای فنی این فناوری شامل تزریق هوای تمیز به ناحیه‌ی غیراشباع به منظور تأثیر بر جداسازی بخارات آلی از محلول خاک به وسیله‌ی تفکیک بین محلول خاک و هوای خاک است. بخارات هوای خاک سپس توسط چاه‌های استخراج خلا حذف می‌گردند. فناوری استخراج بخار خاک هنگامی کاربرد دارد که آلودگی‌های زیر سطح زمین از نوع بخار شدنی و لایه‌های خاک همگن و با نفوذ پذیری زیاد باشند. روش استخراج بخار خاک مزایایی دارد مانند نسبت به روش‌های دیگر اقتصادی است، سبب کمترین دست خوردگی در سایت می‌شود، برای تصفیه به زمان کمی نیاز دارد (در شرایط بهینه ٦ ماه تا ٢ سال)، برای تصفیه‌ی هر دو فاز حل شدنی و آزاد از آلودگی مفید است.

و معایب روش استخراج بخار خاک شامل؛ آلودگی‌هایی که در شروع کار دفع می‌شوند بسیار زیاد هستند اما این نسبت با گذشت زمان کاهش می‌یابد و این روش در خاک‌های لایه لایه با نفوذپذیری کم و درصد رطوبت زیاد مؤثر نیست (حافظ گلستانی فر، ۱۳۹۸).

خاکشویی

خاکشویی یکی از روش‌های مؤثر پالایش خاک جهت حذف آلاینده‌های فلزی از خاک‌های آلوده است. در این فناوری خاک آلوده توسط آب و همزن مکانیکی تمیز می‌شود تا آلاینده‌های خطرناک حذف یا حجم آن‌ها کاهش یابد. بنابراین استفاده از پیوندهای انتخابی آلاینده‌ها به مواد ریز (آلی و خاک رس) را نسبت به مواد درشت خاک از قبیل شن و ماسه میسر می‌سازد. اضافه کردن افزودنی‌های شیمیایی یا سورفاکتانت‌ها به آب این فرآیند را ارتقاء می‌بخشد. بعد از جداسازی دو بخش خاک، مواد زیر حامل بخش اصلی آلاینده‌ها توسط دیگر روش‌های پالایش بیشتر تصفیه می‌شود تا از آلاینده‌های تفکیک شده عاری گردد. از محاسن این روش آن است که برای انواع مختلفی از ترکیبات قابل استفاده است. اما به دلیل استفاده‌ی زیاد از آب و به تبع آن حجم زیاد پساب و هزینه‌ی دورریزی، استفاده از این روش چندان متداول نیست. البته کارآیی روش خاکشویی به گذرپذیری، تخلخل همگنی، بافت و کانی شناسی خاک بستگی دارد. خاکشویی به دو شکل کلی در محل (درجا) و خارج از محل قابل اجراست. در خاکشویی درجا پاکسازی خاک با استفاده از تزریق یک شوینده‌ی آبی به درون خاک توسط گمانه‌های عمودی صورت می‌گیرد. این محلول شوینده می‌تواند به درون محدوده‌ی خاک غیراشباع (بالای سطح ایستابی) یا محدوده‌ی خاک اشباع تزریق گردد. محلول شوینده با عبور از محدوده‌ی آلوده به همراه آلودگی جدا شده از خاک وارد جریان آب زیرزمینی می‌گردد. جریان خروجی در پایین دست محل آلوده دوباره استخراج شده و برای دفع یا تزریق مجدد تصفیه می‌گردد. محلول تزریقی می تواند شامل سورفکتانت‌ها، کمک حلال‌ها یا آب زیرزمینی تصفیه شده باشد. در خاکشویی خارج از محل پس از غربال کردن ابتدایی خاک و جداسازی دانه‌های بزرگ‌تر و نخاله‌ها، باقی مانده‌ی خاک وارد یک مخزن شوینده می‌شود. مخزن محتوی آب و مواد شوینده با ایجاد حرکات چرخشی، امکان تماس آب و شوینده‌ها با خاک را فراهم می‌کند. پس از شسته شدن خاک، با ایجاد یک حوضچه‌ی ته نشینی ساده، محلول شوینده از خاک پاک جدا شده و برای استفاده‌ی مجدد به واحد تصفیه‌ی پساب هدایت می‌گردد و خاک پالایش شده نیز به محل برگردانده می‌شود. از مزایای روش خاکشویی این موارد را می‌توان نام برد؛ فرآیند در جهت حذف ماندگار فلزات از خاک‌های آلوده است و می‌تواند امکان بازیافت آن‌ها را فراهم کند، حجم خاک آلوده شده را به شدت کاهش می‌دهد، خاک شستشو شده می‌تواند دوباره به محل بازگردانده شود. لازمه‌ی موفقیت فرآیند خاکشویی را می‌توان در این موارد خلاصه کرد؛ دانستن ویژگی‌های کامل خاک، مطالعه‌ی نوع فلزات، دانستن ارتباط میان ماتریس خاک و فلزات. خاکشویی می‌تواند به طور مستقل یا در ترکیب با فناوری‌های پالایش دیگر استفاده شود (حافظ گلستانی فر، ۱۳۹۸).

۲-۲-روش‌های بیولوژیکی

از دیگر روش‌های پاکسازی که به کمک میکروارگانیسم‌ها انجام می‌شود روش تصفیه‌ی بیولوژیکی است. روش‌های مختلف پاکسازی بیولوژیکی در ادامه توضیح داده شده است.

۲-۲-۱- زیست پالایی (پاکسازی زیستی)

یکی از فناوری‌های مهم وبه روز دنیا جهت پاکسازی خاک آلوده، زیست پالایی است. دراین روش به کمک تکثیر و تلقیح میکروارگانیسم‌های مؤثردرتجزیه یک نوع ویژه‌ی آلاینده، خاک‌های آلوده را پاکسازی می‌کنند. درمقایسه با روش‌های فیزیکی و شیمیایی و حرارتی این روش کم هزینه‌تر بوده و به صورت طبیعی انجام می‌شود و مزایای قابل توجهی دارد. میکروارگانیسم‌ها نیاز به شرایط مناسبی برای رشد و زنده ماندن خود دارند که این عوامل شامل دما و اکسیژن و شوری و عناصرغذایی است.

با توجه به تنوع متابولیکی میکروارگانیسم‌ها و توان استفاده‌ی آن‌ها از آلاینده‌های محیطی، با یک انتخاب مناسب می‌توان از آن‌ها در جذب، کاهش و حذف کامل آلاینده‌های مختلف سود برد. زیست پالایی خاک‌های آلوده به نفت تحت تأثیر عوامل شیمیایی، فیزیکی و بیولوژیکی است. باکتری‌ها با تغذیه از هیدروکربن‌های موجود درخاک به عنوان منبع غذایی، باعث پاکسازی آلودگی‌های نفتی می‌شوند (حافظ گلستانی‌فر، ۱۳۹۸).

۲-۲-۲- القاء بیولوژیکی

مبنای این روش اضافه کردن مواد مغذی (نیتروژن، فسفر، اکسیژن، آب و ...) به خاک آلوده برای تحریک فعالیت میکروارگانیسم‌ها به محیط آلوده است (حافظ گلستانی‌فر، ۱۳۹۸).

۲-۲-۳- ازدیاد بیولوژیکی

اضافه کردن میکروارگانیسم‌های اگزوژن (جداسازی شده از محیط های دیگر) به خاک آلوده‌ای که میکروارگانیسم‌های آن قادر به تجزیه ی آلاینده‌های خاص نیستند. هیدروکربن‌ها منبع کربن مورد استفاده‌ی میکروارگانیسم‌ها هستند و دیگر مواد مغذی مثل نیتروژن و فسفر هم باید در خاک موجود باشند. همچنین مقدار رطوبت، دمای خاک و PH نیز باید تنظیم شوند (حافظ گلستانی‌فر، ۱۳۹۸).

۲-۲-٤- پالایش فاز جامد

در اینجا خاک آلوده در بالای زمین در بسترهای آماده، تصفیه می‌گردد. اما با وجود هزینه‌ی کم آن نسبت به تصفیه‌ی بستر دوغاب، چندان اثربخش نیست و به زمان و فضای بیشتری جهت آماده سازی بسترها نیاز دارد. به منظور انجام این روش پالایش سه روش اصلی به طور متداول استفاده می‌شوند؛ کشت خاک، توده‌های بیولوژیکی خاک، کمپوست (کودسازی) (حافظ گلستانی فر، ۱۳۹۸).

۲-۲-۵- لندفارمینگ یا کشت خاک

در این روش خاک حفاری شده به صورت لایه‌های نازک روی زمین قرار می‌گیرند و مرتباً شخم زده و زیر و رو می‌شوند تا با هوا مخلوط شده و فعالیت بیولوژیکی را در بستر ارتقاء بخشند. در صورت نیاز، مواد مغذی اضافه می‌گردند؛ زیرا کمبود و فقدان اکسیژن و مواد مغذی منجر به تأخیر در فرآیندهای تجزیه‌ی بیولوژیکی می‌گردد. عمق بسته به قابلیت‌های تجهیزات هوادهی ٤٥-۳۰ سانتی‌متر است . کنترل PH و مواد مغذی شامل افزودن دوره‌ای کود، آهک یا سولفور است و معمولاً به صورت مایع به خاک تزریق می‌شود.

از مزایای لند فارمینگ می‌توان به این موارد اشاره کرد؛

طراحی نسبتا آسان و اجرایی، مؤثر بودن بر اجزای آلی با تجزیه‌ی مولکولی کم، زمان کوتاه پاکسازی ٦ ماه تا ۲ سال (بسته به شرایط مطلوب).

از معایب لندفارمینگ می‌توان به این موارد اشاره کرد؛ برای غلظت بیش از ppm ۵۰۰۰۰ هیدروکربن‌های نفت اثر بخش نیست، نیازمند زمین زیادی جهت اصلاح خاک است، غبار و بخارات زیادی در طول عملیات به وجود می آیند که باعث نگرانی است (حافظ گلستانی فر، ۱۳۹۸).

۲-۲-٦- توده‌های بیولوژیکی خاک

این روش ترکیبی از روش کشت خاک و کمپوست است. خاک حفاری شده به شکل توده‌های با ارتفاع چندین متر انباشته می‌گردد. جهت ارتقاء فعالیت تجزیه توسط میکروارگانیسم‌ها، هوا از میان توده دمیده می‌شود. در صورت نیاز، مواد مغذی نیز اضافه می‌گردد. با کنترل مقدار مواد مغذی، اکسیژن، رطوبت، دما و PH، بازده این روش افزایش می‌یابد. توده‌ها با پلیاتلین پوشیده شده و در صورت نیاز میکرو ارگانیسم، آب و مواد مغذی اضافه می‌گردد (حافظ گلستانی‌فر، ۱۳۹۸).

۲-۲-۷- کمپوست (کودسازی)

کمپوست از کلمه‌ی کمپوست به معنی مخلوط یا مرکب اقتباس شده و به عمل تجزیه‌ی مواد آلی نامتجانس که توسط میکروارگانیسم‌های مختلف در حضور رطوبت و گرما در محیط هوازی انجام می‌شود. کمپوست فرآیندی هوازی است که طی آن کود آلی توسط میکروارگانیسم‌ها تجزیه شده و تولید گرما دی اکسید کربن، بخارآب و هوموس می‌کنند. در روش کمپوست‌سازی، پسماندهای قابل تجزیه‌ی بیولوژیکی یا خاک آلوده، با مواد حجم دهنده از قبیل نی مخلوط می‌گردند تا گردش جریان هوا و آب مورد نیاز برای فعالیت‌های بیولوژیک میکروارگانیسم‌ها را تسهیل کنند. مواد مغذی نیز در صورت نیازاضافه می‌شوند. تجزیه‌ی بیولوژیکی پسماندها یا آلاینده‌ها برخی مواقع در تلنبار توده‌های کمپوست ساکن رخ می‌دهد؛ جایی که خاک به شکل توده‌هایی تلنبار می‌شود و به طور دوره‌ای با دمنده‌ها یا پمپ‌های وکیوم هوادهی می‌گردد (حافظ گلستانی فر، ۱۳۹۸).

۲-۲-۸- گیاه پالایی (پاکسازی زیستی با کمک گیاه)

گیاه پالایی، فنآوری ارزان و مؤثری جهت کنترل آلودگی بوده که قادر به حذف طیف وسیعی از آلاینده‌های آلی است و به دلیل دارا بودن مزیت‌هایی مثل کمترین به هم خوردگی خاک، حجم کم ضایعات، جذب اشعه‌ی خورشید، پایداری بسیار خوب، سادگی کاربرد، امکان استفاده در سطح وسیع و کمک به رشد گیاهان دیگر جهت رفع آلودگی‌ها، مورد توجه خاص قرار گرفته است. به گیاهان اجازه داده می شود در خاک آلوده به ترکیبات نفتی رشد و مواد نفتی را با مکانیزم‌های خاصی

تجزیه کنند. گیاه پالایی با استفاده از مهندسی گیاهان سبز شامل گونه‌های علفی و چوبی برای برداشت مواد آلاینده از آب و خاک یا کاهش خطرات آلاینده‌های محیط زیست نظیر فلزات سنگین، عناصر کمیاب، ترکیبات آلی و مواد رادیواکتیو به کار برده می‌شود. این فناوری بستگی به استفاده ی گیاهان جهت حذف، تجزیه یا تثبیت آلاینده‌ها در محل‌های آلوده‌ی نسبتا کم عمق دارد. پالایش گیاهی از طریق فعالیت‌های مختلف بیولوژیکی عمل می‌کند و بستگی به طبیعت و شیمی آلاینده‌ی خاک دارد. هدف این روش، تجمع فلزات سنگین در اندام‌های هوایی و برداشت گیاهان از منطقه‌ی مورد نظر است. در این روش، گیاهان در محیط‌های آلوده مستقر می‌شوند. ریشه‌های گیاهان مذکور پس از نفوذ به بستر خاک، آلاینده‌های فلزی را جذب کرده، آن‌ها را به بخش‌های هوایی منتقل و در آن جا ذخیره می‌کنند. در این روش گیاه با استفاده از مکانیسم‌های پاکسازی متنوعی در ناحیه‌ی ریشه‌ی گیاه یا درون خود گیاه نظیر تثبیت گیاهی، استخراج گیاهی، تبخیر گیاهی، تجزیه‌ی ریزوسفری، ریزوفیلتراسیون، تجزیه‌ی گیاه و کنترل هیدرولیکی، آلاینده‌ها را از آب و خاک حذف می‌کند. به طور کلی گیاهان مختلفی وجود دارند که می‌توانند عمل گیاه پالایی را در خاک‌های آلوده به ترکیبات نفتی را انجام دهند.

اما نتیجه‌ی بررسی‌های انجام شده در دنیا نشان می‌دهد که گونه‌های چمنی و لگومی به دلیل سیستم ریشه‌ای-افشان برای انجام گیاه پالایی خاک‌های آلوده به ترکیبات نفتی مناسبند (حافظ گلستانی‌فر، ۱۳۹۸).

۲-۳-روش‌های تثبیت / جامد سازی

فرآیند تثبیت معمولاً به فرآیندی اطلاق می‌گردد که ریسک و خطر پسماند و مواد آلاینده‌ی موجود با کاهش حلالیت، کاهش حرکت پذیری و تغییر فرم مواد به حالتی با سمیت کمتر تبدیل می‌شود و جامد سازی نیز به فرآیندی اطلاق می‌گردد که مواد و ذرات آلاینده در محیطی یکنواخت از یک ماده‌ی جامد با ساختار یکپارچه به صورت کاملا مناسب احاطه می‌شود. تثبیت و جامد سازی یک روش پالایش خاک است که در آن مواد آلاینده به دلیل واکنش با مواد افزودنی یا فرآیندهایی مختلف، ثابت و غیرمتحرک می‌شوند. فرآیندهای تثبیت و جامد سازی را می‌توان در محل سایت آلوده یا در خارج از آن انجام داد. در فرآیند تثبیت و جامد سازی در محل ، عملیات اختلاط واکنش‌گر و خاک آلوده بدون خارج کردن مواد آلاینده در محل سایت انجام می‌شود. در فرآیند تثبیت و جامد سازی خارج از محل، فرآیند اختلاط در بالاتر از سطح خاک انجام می‌گردد و خاک، تثبیت شده یا به سایت قبلی برگردانده شده و به صورت دفن در یک سلول دفع می‌گردد یا به تأسیسات دفع دیگری منتقل می‌شود (حافظ گلستانی‌فر، ۱۳۹۸).

۲-٤-روش‌های حرارتی

تبخیر و تخریب آلاینده‌ها توسط روش‌های حرارتی، بسیار مؤثر است که طی حرارت دادن خاک آلوده در کوره‌هایی در دماهای ۷۰۰-٤۰۰ درجه‌ی سانتیگراد حاصل می‌گردد. پس از آن جهت تصفیه‌ی بیشتر گاز خروجی کوره در دماهای بیشتر (۱۲۰۰-۸۰۰ درجه‌ی سانتیگراد) اکسیداسیون کامل مواد آلی فرار انجام می‌شود. در حالت کلی به معنای استفاده از حرارت به منظور جداسازی و تبدیل مواد آلی به فاز دیگری که راحت‌تر قابل جدا سازی باشد یا سوزاندن (که در این حالت و با این دما در آلاینده‌ها تغییرات ساختاری شیمیایی ایجاد کرده و پیوند بین اتم‌ها و مولکول‌های آن‌ها را از بین می‌برد) است.

روش‌های حرارتی شامل فناوری‌های مختلفی هستند که مهم‌ترین آن‌ها عبارتند از: سوزاندن، رهاسازی گرمایی و پیرولیز (حافظ گلستانی‌فر، ۱۳۹۸). در جدول ۱ مقایسه‌ی روش‌های مختلف حرارتی حذف آلاینده‌های خاک ارائه گردیده است.

۳- معرفی روش الکتروکینتیک

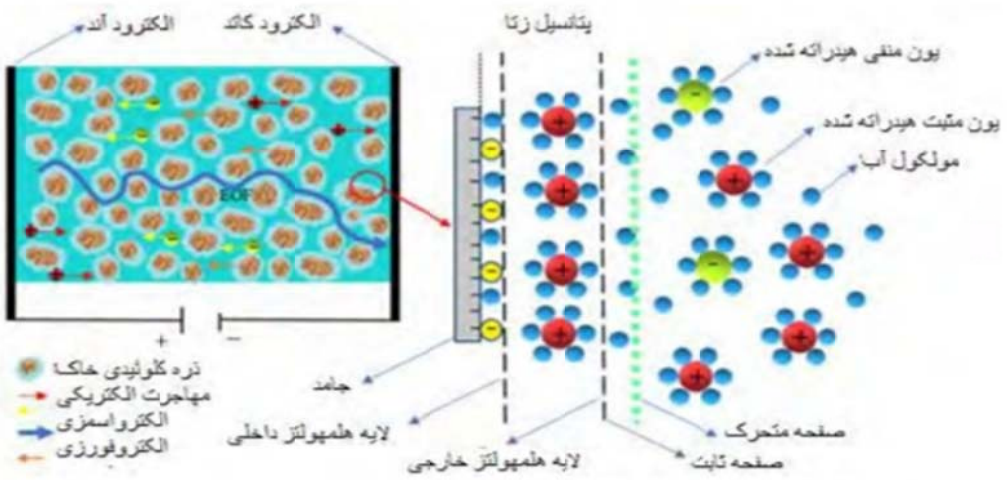
براتی فردین و همکاران در سال ۱۳۹۹ طی تحقیقات خود به نتایجی که در ادامه به آن اشاره می‌شود، دست یافتند.

۳-۱-اصول روش الکتروکینتیک

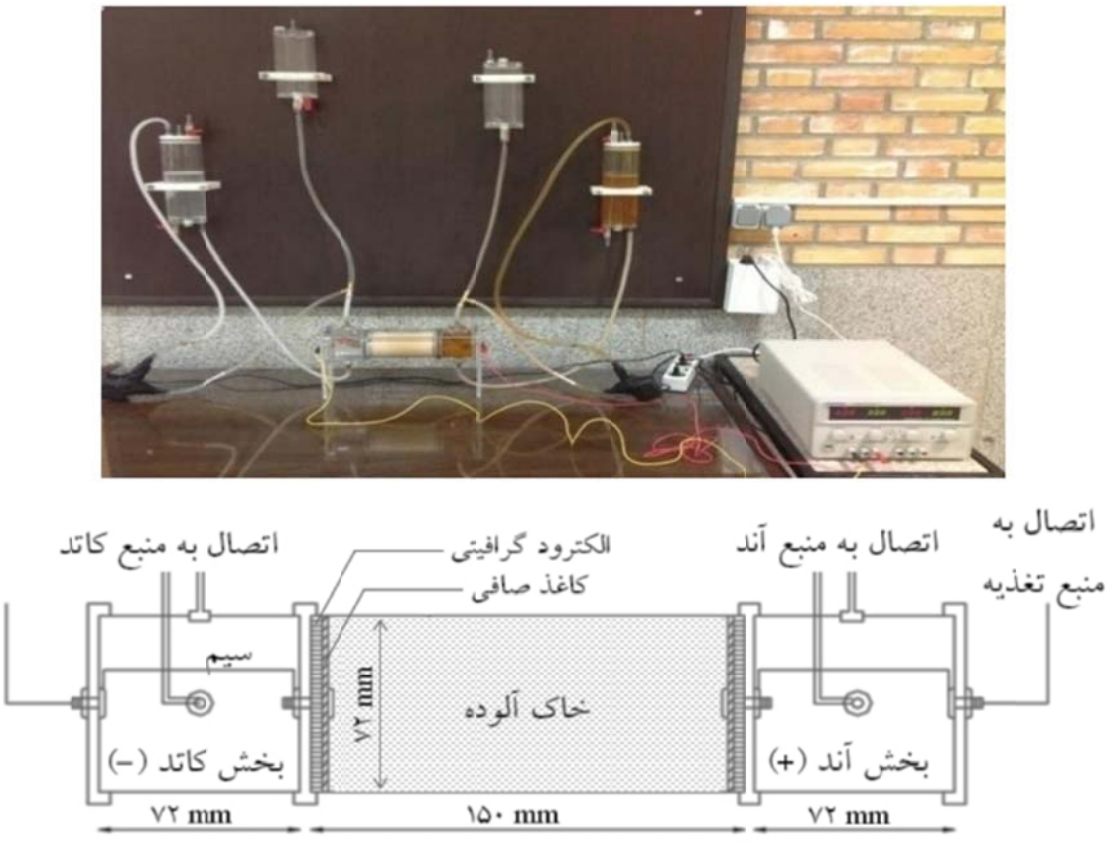
فرآیند الکتروکینتیک عبارت است از ایجاد یک جریان الکتریکی مستقیم DC در دو طرف خاک اشباع و نیمه اشباع توسط قرار دادن دو رشته الکترود در تماس با خاک آلوده به طوری که یک رشته آند (+) و یک رشته کاتد (-) باعث عبور جریان مستقیم با شدت کم میان الکترودها تحت گرادیان جریان مستقیم پایین در خاک می‌شود؛ که در مقایسه با یک گرادیان فشار هیدرولیکی، منجر به انتقال آب و آلودگی‌های مختلف تحت نیروهای کولمبی شده و در نتیجه سبب احیای خاک طی سازوکار مختلفِ این روش خواهد شد. آلاینده‌ها طی سازوکار مختلف در طول خاک آلوده منتقل و حذف می‌شوند (براتی فردین و همکاران، ۱۳۹۹). در شکل ۲ دیاگرام شماتیک مکانیزم انتقال جرم در فرآیند پاکسازی الکتروکینتیک و در شکل ۳ شمای دستگاه الکتروکینتیک مورد استفاده در پژوهش‌ها به همراه جزئیات سلول آن و همچنین در شکل ٤ کاربرد اصلاح الکتروکینتیک در خاک‌های آلوده شرح داده شده است.

جدول ۱. مقایسه‌ی روش‌های مختلف حرارتی حذف آلاینده‌های خاک (حافظ گلستانی‌فر، ۱۳۹۸)

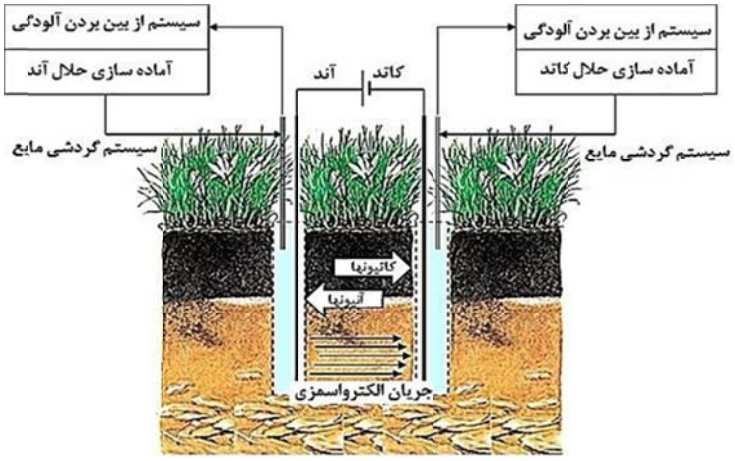
متغیرها	سوزاندن	رهاسازی گرمایی	پیرولیز
محدودیت‌های روشی و اقتصادی	سیستم‌های پالایش فلزات سنگین و کنترل کننده‌های مستقیم انتشار دی اکسین‌ها و فوران ها مورد نیاز است.	احتیاج به دستگاه خشک کننده و آبگیردار و در بسیاری از موارد نیاز به تصویه‌ی تکمیلی دارد.	برای از بین بردن ترکیبات غیر آلی کارا نیست و کارایی آن وابسته به میزان رطوبت خاک است.
تاثیرات اجتماعی	در بسیاری موارد موجب اعتراض مردم ساکن در منطقه می‌شود.	اگر مرحله ی بعدی فرآیند سوزاندن باشد موجب اعتراض مردم ساکن در منطقه می‌شود.	هیچ گونه تضادی با زندگی شهروندان ندارد و موجب اعتراض نمی‌شود.
خطرات احتمالی برای محیط زیست	پتانسیل انتشار مواد خطرناک دی اکسین‌ها و فوران‌ها و نیز تولیدات جانبی سوخت را دارد.	خطر زیاد انتشار مواد فعال و فرار وجود دارد. همچنین در صورت ادامه توسط روش سوزاندن احتمال تشکیل دی اکسین‌ها و فوران ها را دارد	پتانسیل خروج ترکیبات خطرناک دی اکسین‌ها و فوران‌ها و گازهای تولید شده‌ی جانبی از سوزاندن وجود دارد.



شکل ۲. دیاگرام شماتیک مکانیزم انتقال جرم در فرآیند پاکسازی الکتروکینتیک (دلیرج و همکاران، ۱۳۹۹)



شکل ۳. شمای دستگاه الکتروکینتیک مورد استفاده در پژوهش‌ها به همراه جزئیات سلول آن (بهاروندی و همکاران، ۱۳۹۱)



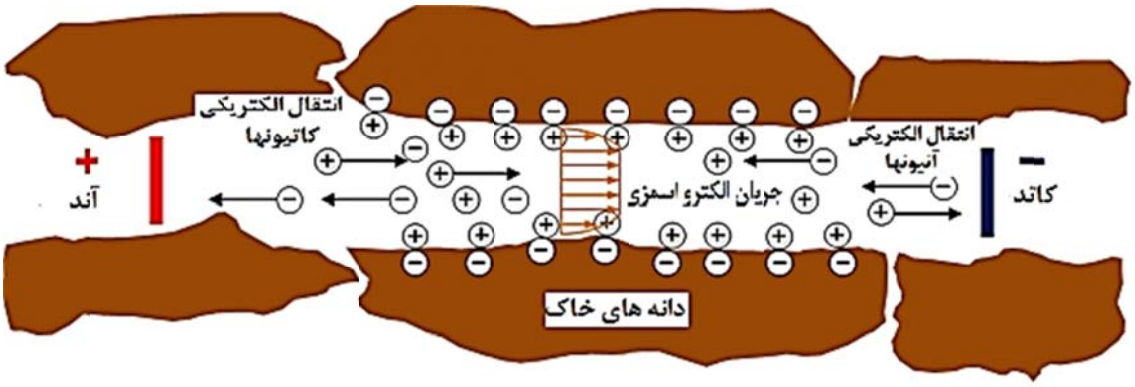
شکل ٤. کاربرد اصلاح الکتروکینتیک در خاک‌های آلوده (جمالی مقدم و همکاران، ۱۳۹٤)

براتی فردین و همکاران در سال ۱۳۹۹ این سازوکار را اینگونه شرح دادند:

مهاجرت الکتریکی: حرکت گونه‌های یونی حل شده موجود در مایع میان منفذی به سمت الکترودهای با بار مخالف

الکترواسمز: حرکت آب یا مایع از میان منافذ خاک که حاوی گونه‌های حل شده یونی و غیر یونی (ترکیبات آلی) نسبت به جرم خاک الکتروفورز: انتقال ذرات باردار شده و آلاینده‌های تجمیع شده با اندازه کلوئیدی در مایع میان منفذی سازوکار

روش الکتروکینتیک برای پاکسازی طیف وسیعی از آلاینده‌ها بسته به نوع آلاینده متفاوت است. ماهیت غیر یونی و جذب بالای ترکیبات آلی به خاک سبب شده که سازوکار الکترواسمز، سازوکار اصلی و غالب به صورت تنها و یا در تلفیق با دیگر عوامل بهبود دهنده برای پاکسازی این ترکیبات از خاک باشد. سایر سازوکارها در حین انجام فرآیند الکتروکینتیک شامل تشکیل رسوب (به دلیل PH بالا در نزدیکی کاتد)، انتشار (انتقال گونه‌های یونی با توجه به تاثیر انتقال جرم در نتیجه گرادیان غلظت)، جذب سطحی (جذب ترکیبات هیدروکربنی روی خاک‌های ریز دانه) و واکنش‌های الکترولیزاست. الکترولیز آب سبب تولید یون‌های H^+ و OH^- به ترتیب در آند و کاتد و ایجاد محیط اسیدی و قلیایی در نتیجه واکنش‌های اکسایش و کاهش در محل قرارگیری الکترودها طبق روابط ۱ و ۲ زیر خواهد شد (براتی فردین و همکاران، ۱۳۹۹):



شکل ۵. مکانیزم انتقال در اصلاح الکتریکی (جمالی مقدم و همکاران، ۱۳۹٤)

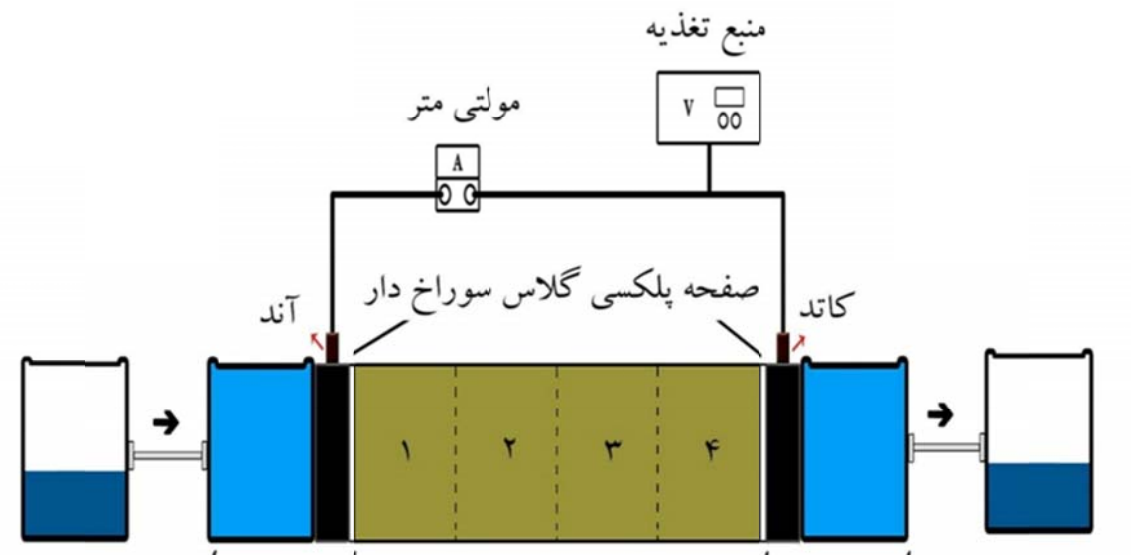
۳-۲-ساختار سیستم الکتروکینتیک

لاجوردی و شریعتمداری در سال ۱۳۹٤ طی تحقیقات خود به نتایج زیر دست یافتند. دستگاه الکتروکینتیک مورد استفاده شامل راکتور استوانه‌ای، الکترودها، مخازن، اتصالات و لوله‌ها است که در ادامه به اختصار شرح داده شده‌اند.

۳-۳-راکتور مورد استفاده

این راکتور از جنس پلاستیک شفاف (پلاکسی گلاس) و به صورت استوانه‌ای به قطر ۷۰ میلی‌متر و طول ۱۵۰ میلی‌متر است. در این راکتور که در میانه سلول قرار دارد، نمونه خاک قرار گرفته و در دو طرف آن دو محفظه به طول ۵۰ میلی‌متر به منظور ایجاد مخازن آند و کاتد تعبیه شده است. بین مخازن و راکتور میانی دو ورق پلاستیکی سوراخ‌دار شفاف قرار دارد که محل قرار گیری الکترودها نیز می‌باشد به منظور تنظیم سطح در شکل ٦ شماتیک راکتور الکتروکینتیک شرح داده شده.

آب برای جلوگیری از ایجاد گرادیان هیدرولیکی و همسان نمودن فشار هوا در مخازن کاتد و آند، این مخازن از طریق لوله‌های ارتباطی به مخازن استوانه‌ای کوچک و پمپ‌های هوا متصل می‌گردند. همچنین وجود خطوط مدرج روی مخازن استوانه‌ای امکان اندازه‌گیری حجم جریان الکترواسمز را فراهم می‌سازد (لاجوردی و شریعتمداری، ۱۳۹٤).



شکل ٦. شماتیک راکتور الکتروکینتیک (خطایی و همکاران، ۱۳۹۸)

لاجوردی و شریعتمداری در سال ۱۳۹٤ طی تحقیقات خود به نتایج زیر دست یافتند.

۳-٤-مشخصات الکترودها

در بیشتر آزمایش‌ها از صفحات استیل ضد زنگ مشبک به عنوان کاتد و آند استفاده می‌شود. الکترود جنس استیل می‌تواند تا حدودی از اکسایش ایجاد شده در محیط اسیدی جلوگیری کند و قابل کاربرد در مقیاس بزرگ نیز می‌باشد. این الکترودها به وسیله پیچ‌های اتصال مخصوص و سیم‌های مخصوصی به منبع تغذیه متصل می‌شوند. شایان ذکر است که به منظور جلوگیری از اختلاط مخازن آند و کاتد با قسمت میانی که نمونه خاک در آن قرار می‌گیرد از یک لایه فیلتر استفاده می‌شود (لاجوردی و شریعتمداری، ۱۳۹٤).

۳-٦-اندازه‌گیری غلظت آلاینده‌ها

به منظور اندازه‌گیری غلظت فلزات مانند فلز روی و نیکل در مخازن آند و کاتد و نمونه خاک از دستگاه نشر اتمی ICP مدل Optima 8000 استفاده می‌شود. برای تعیین غلظت مواد نفتی موجود در نمونه‌های خاک نیز از آزمایش سوکسله (ASTM-D5369) انجام می‌شود به این صورت که اساس کار این آزمایش بر تبخیر و میعان استوار است. در اثر ایجاد حرارت مایع درون فلاکس (تولوئن) تبخیر شده و پس از میعان به صورت قطره قطره روی نمونه خاک ریخته و باعث جدایی مواد نفتی از خاک می‌شود. با توزین مجدد نمونه می‌توان میزان مواد نفتی را بدست آورد (لاجوردی و شریعتمداری، ۱۳۹٤).

۳-۷-روش اجرا

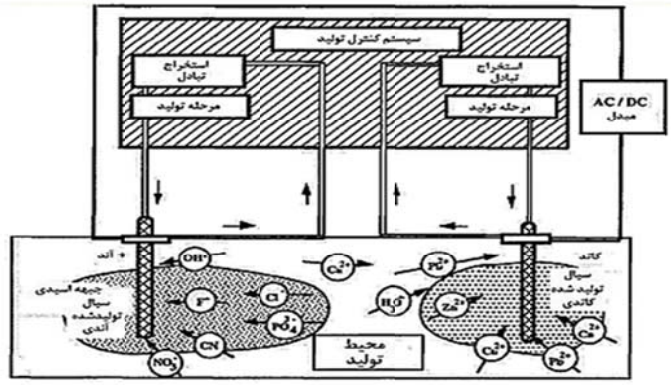
نتیجه فرآیند الکتروکینتیک در خاک حرکت آب، یون‌ها و ذرات باردار در اثر اعمال میدان الکتریکی می‌باشد. به عبارت دیگر اصلاح الکتریکی خاک‌ها شامل عبوردادن جریان مستقیم از میان خاک در بین الکترودهایی که به نحوه مناسبی جایگذاری و توزیع شده‌اند می‌باشد. این تکنیک که همگام با تکنیک الکترواسمزی مطرح می‌شود به راحتی می‌تواند در

۳-۵-نحوه تعیین میدان الکتریکی

در اکثر پژوهش‌ها به منظور ایجاد میدان الکتریکی از منبع تغذیه مدل ADAK PS -303- استفاده می‌شود. این دستگاه قابلیت تامین جریان مستقیم و ولتاژ ثابت ۰ تا ۳۰ ولت را دارد. بر اساس نتایج اغلب مطالعات گذشته مناسب‌ترین اختلاف پتانسیل ، ۰,۳۳ تا ۱ ولت در هر سانتی متر طول نمونه خاک می‌باشد (لاجوردی و شریعتمداری، ۱۳۹٤).

مدل‌های میدانی نیز انجام شود. الکترواسمزی در واقع حرکت سیال درون یک مصالح متخلخل ناشی از اعمال یک پتانسیل الکتریکی می‌باشد. نمودار شماتیک انتقال الکترواسمزی سیال در مقطع یک نمونه خاکی در شکل پایین ارایه شده است (لاجوردی و شریعتمداری، ۱۳۹٤). در شکل ۷ نمودار شماتیک انتقال الکترواسمزی سیال در مقطع یک نمونه خاکی آمده است. جمالی مقدم و همکاران در سال ۱۳۹٤ طی تحقیقات خود یافتند. همانطور که ذکر گردید در فرآیند الکتروکینتیک دو رشته الکترود (آند وکاتد) درون نمونه قرار می‌گیرد که با عبور جریان مستقیم با شدت کم یک میدان الکتریکی ایجاد می‌شود که در آن آب، یون‌ها، مواد آلی قطبی شده و ذرات باردار توسط دو مکانیسم اصلی انتقال یون‌ها و ذرات باردار و همچنین انتقال آب میان حفره‌ای به سمت الکترود با بار مخالف حرکت می‌کنند. بطور مثال در یک مقیاس میدانی یک سری از آندها و کاتدها درون زمین قرار داده شده و جریانی در میان آن‌ها برقرار می‌شود. جریان سیالات هدف ممکن است در الکترودها بصورت چرخه‌ای ایجاد شوند تا بتوان به یک مقدار اسیدیته مشخص رسید که در آن بتوان نوع بخصوصی از آلودگی را حذف نمود. این سیال‌ها می‌تواند هم به صورت یک محیط رسانا استفاده شود و هم به صورت وسیله ای جهت استخراج و جایگزینی باشند. در شکل ۸ دیاگرام شماتیکی ترکیب یک الکترود و هندسه استفاده شده در محل اجرای تکنیک اصلاح با الکتروکینتیک آمده است.

شکل ۷. نمودار شماتیک انتقال الکترواسمزی سیال در مقطع یک نمونه خاکی (لاجوردی و شریعتمداری، ۱۳۹٤)



شکل ۸. دیاگرام شماتیکی ترکیب یک الکترود و هندسه استفاده شده در محل اجرای تکنیک اصلاح با الکتروکینتیک (جمالی مقدم و همکاران، ۱۳۹٤)

۳-۸-پتانسیل زتا

به منظور بررسی خصوصیات الکتروکینتیکی هر خاکی می‌بایست در ابتدا رفتار پتانسیل الکتریکی خاک مورد نظر را بطور کامل شناخت پتانسیل الکتریکی ذرات کلوئیدی به وسیله پارامتری به نام پتانسیل زتا نشان داده می‌شود. پتانسیل زتا به عنوان یک پتانسیل الکتریکی در پیرامون ذرات و همچنین سلول‌ها وجود دارد که تحقیقات زیادی در مورد این پتانسیل الکتریکی اطراف غشاء انجام شده است. جریان الکترواسمزی به ثابت دی الکتریک و ویسکوزیته سیال حفره‌ای و بار سطحی

قالب جامد که با پتانسیل زتا ارائه می‌شود، بستگی دارد. از طرفی پتانسیل زتا به پارامترهای زیادی مانند نوع کانی رسی و نوع یون، PH، مقاومت یونی و دما وابسته است. سلول‌ها در محلول به علت وجود خاصیت‌های یونی، همچنین ترکیبات سازنده غشاء (مانند پروتئین‌ها، چربی‌ها و قندها) و پخش بار در سطح غشاء آن‌ها دارای یک بار الکتریکی در سطح غشاء می‌باشند. گسترش بار در اطراف غشاء باعث تأثیر بر روی یون‌های مجاور شده که نتیجه آن افزایش غلظت تعداد یون‌ها (یون‌های با بار الکتریکی مخالف) در فاصله نزدیک غشاء می‌شود. بنابراین غشاء در محلول توسط یک لایه از یون‌های با بار مخالف محصور شده که به این لایه به وجود آمده لایه ثابت می‌گویند. در قسمت بیرونی لایه ثابت، تعداد زیادی از یون‌ها با بارهای مختلف وجود دارد که باعث تشکیل یک لایه ابری شکل می‌شود . بنابراین دو لایه الکتریکی در ناحیه‌ای که سطح غشاء در مجاورت محیط مایع اطراف آن وجود دارد، تشکیل می‌شود. این دو لایه توسط دو قسمت شرح داده می‌شود؛ قسمت درونی که شامل یون‌هایی است که به صورت قوی با سطح خارجی غشاء اتصال پیدا کرده است و قسمت بیرونی یا ناحیه پراکنده که یون‌ها در آن قسمت در حالت تعادل یونی به سر می‌برند. پتانسیل زتای (الکتریکی) اکثر خاک‌ها منفی است، زیرا سطوح خاک معمولاً حامل بار منفی می‌باشد نتیجه آن که، جریان الکترواسمزی معمولاً به سمت کاتد می‌باشد. با این حال، مقاومت یونی و PH سیال که به طور ممتد در حین اصلاح الکتریکی تغییر می‌کند، مقدار پتانسیل زتا را تحت تاثیر قرار می‌دهد. افزایش اسیدیته باعث می‌شود که پتانسیل زتا کمتر منفی شده و حتی باعث بدست آمدن مقادیر مثبت در PH پایین گردد. مشاهده گردید در صورتی که PH الکترولیت کمتر از مقدار خنثی آن شود و تا مقادیر PH قلیایی افزایش یابد، نرخ های جریان کاهش می‌یابد. افزایش مشاهده شده نرخ جریان سیال در ابتدا شروع بهسازی در برخی آزمایش‌ها به علت مقدار منفی بالای پتانسیل زتا در نزدیک کاتد به علت افزایش غلظت یون OH^- توضیح داده می‌شود. متناظرا، مقادیر کوچک و حتی مثبت پتانسیل زتا به منظور توصیف مشاهداتی مانند کاهش نهایی جریان سیال با زمان و در برخی نمونه‌ها جهت برعکس به سمت آند، به کار برده شده است.

در حقیقت، جریان اولیه در جهت آند مشاهده گردیده است و احتمالا در نتیجه PH پایین شرایط اولیه می‌باشد. بایستی اشاره کرد که اسمز شیمیایی می‌تواند یک توصیف جایگزین برای تغییرات در نرخ‌های جریان در نتیجه تغییرات در PH باشد. همچنین هرچه مقاومت یونی حلال حفره ای افزایش می‌یابد، پتانسیل زتا تمایل به مثبت‌تر شدن دارد. برای کائولینیت، کاهش در نرخ جریان الکترواسمزی با افزایش غلظت یونی مشاهده شده است. حتی طبیعت یون‌های موجود شرایط را پیچیده‌تر می‌کند، افزایش غلظت یون‌های فلزی هیدرولیسابل مانند مس Cu^{2+} و کادمیوم Cd^{2+} و کبالت Co^{2+} باعث می‌شود که پتانسیل زتا با بیشترین اثر در مقادیر میانه PH، مثبت‌ترگردد. با وجود غلظت‌های بالای کافی یون‌ها، معکوس شدن جریان ممکن است به وقوع بپیوندد و قطبیت معکوس در پتانسیل زتا نشان داده شده است (جمالی مقدم و همکاران، ۱۳۹٤).

در جدول شماره ۲ به بررسی روش‌های الکتروکینتیک در پاکسازی خاک پرداخته شده است.

جدول ۲. بررسی روش‌های الکتروکینتیک در پاکسازی خاک

ردیف	نام نویسنده و سال	پارامتر های مورد مطالعه	روش انجام پژوهش	نتیجه‌گیری	ملاحظات
۱	اوحدی و همکاران ۱۳۹۹	تاثیر شدت بخشی با محلول کلسیم کلرید بر سازوکار الکترولیز و الکترواسمزی خاک رسی در فرآیند الکتروکینتیک	آزمایشگاهی	به نظر می رسد در نمونه‌های شدت بخشی شده با کلسیم کلرید، به دلیل انتقال یون کلسیم در نمونه و تبادل کاتیونی آن با کاتیون‌های یک ظرفیتی لایه دوگانه، و متعاقب آن با کاهش ضخامت لایه دوگانه رسی، در افزایش دبی الکترواسمزی تسهیل شده است.	بهبود عملکرد در حضور کلسیم کلرید را می‌توان به انتقال کاتیونی ناشی از حضور یون کلسیم نسبت داد. این فرایند می‌تواند سبب افزایش تحکیم اسمزی در مجاورت کاتد شود.

۲	بهاروندی و همکاران ۱۳۹۱	حذف فلز سنگین سرب از یک خاک رسی آلوده توسط پدیده الکتروکینتیک	آزمایشگاهی	در حالت کلی می‌توان نتیجه گرفت که روش الکتروکینتیک قادر است فلز سنگین سرب را تا حدود ۸۰ درصد در محیط خاک حذف کند.	روش الکتروکینتیک تنها روشی است که در خاک‌های رسی که نفوذ پذیری پایینی دارند قادر به حذف فلزات سنگین و سمی می‌باشد.
۳	کیایی و همکاران ۱۳۹٤	بررسی بازدهی روش الکتروکینتیک در حذف جیوه از خاک رس آلوده	آزمایشگاهی	از آن جایی که ترکیبات جیوه در بیشتر خاک ها دارای حلالیت کمی می باشند ، استفاده از محلول KIدر پاکسازی جیوه از خاک سبب تولید کمپلکس محلول و افزایش حذف جیوه از خاک می‌گردد.	کاهش غلظت جیوه در خاک بیانگر کارآیی بالای فرآیند الکتروکینتیک در حذف آلاینده می‌باشد.
٤	جمالی مقدم و همکاران ۱۳۹٤	مروری بر روش الکتروکینتیک جهت رفع آلودگی زمین های آلوده	تحلیلی	افزایش غلظت یون های فلزی هیدرولیسابل مانند مس Cu^{2+} و کادمیوم Cd^{2+} و کبالت Co^{2+}باعث می شود که پتانسیل زتا با بیشترین اثر در مقادیر میانه PH ، مثبت‌ترگردد. با وجود غلظت های بالای کافی یون ها ، معکوس شدن جریان ممکن است به وقوع بپیوندد و قطبیت معکوس در پتانسیل زتا نشان داده شده است.	پتانسیل الکتریکی ذرات کلوئیدی به وسیله پارامتری به نام پتانسیل زتا نشان داده می‌شود. پتانسیل زتا به عنوان یک پتانسیل الکتریکی در پیرامون ذرات و همچنین سلول‌ها وجود دارد که تحقیقات زیادی در مورد این پتانسیل الکتریکی اطراف غشاء انجام شده است.
٥	لاجوردی و شریعتمداری ۱۳۹٤	رفع آلودگی خاک آلوده به مواد نفتی، روی و نیکل با روش الکتروکینتیک	آزمایشگاهی	در فلزات سنگین به دلیل قطبی بودنشان فرآیند مهاجرت الکتریکی یون‌ها غالب است در صورتی که در حذف مواد نفتی فرآیند الکترواسمز غالب است.	روش الکتروکینتیک در حذف فلزات سنگین نسبت به حذف مواد نفتی بازدهی بیشتری دارد.
٦	تابع بردبار و همکاران ۱۳۹٤	استفاده از روش الکتروکینتیک در پاکسازی یک خاک رسی آلوده بهMTBE	آزمایشگاهی	در نهایت مشخص گردید که استفاده از EDTA به عنوان الکترولیت به منظور پاکسازی MTBE (به عنوان نماینده آلاینده آلی غیر قطبی) از خاک رس کائولینیت گزینه ایده آلی نمی‌باشد و تحقیقات بیشتری به منظور ارتقاء بازده پاکسازی با استفاده از شوینده‌ها و الکترولیت‌های مناسب مورد نیاز است.	با افزایش اختلاف پتانسیل الکتریکی اعمال شده ، راندمان پاکسازی MTBE تا ۱۲ ٪ در مدت زمان ثابت ۷ روز افزایش می‌یابد.

۷	هاشمی و همکاران ۱۳۹٤	حذف پایرن از خاک آلوده با استفاده از فرآیند الکتروکینتیک در تلفیق با سورفکتانت	آزمایشگاهی	در نتیجه آمار به دست آمده از این تحقیق نشان داد که فرآیند الکتروکینتیک در تلفیق با مخلوط سورفاکتانت‌ها به عنوان عامل انحلال یا متحرک سازی پایرن از خاک آلوده، می تواند به عنوان روش کارآمد و قابل اجرا در تصفیه خاک‌های آلوده استفاده گردد.	افزایش غلظت سورفاکتانت‌ها باعث تغییر ویژگی‌های خاک نظیر ثابت دی الکتریک، PH، ویسکوزیته، کاهش کشش سطحی گردید. این تغییرات در ویژگی‌های سطحی خاک و میزان جریان الکترواسموتیک تاثیر گذاشت و در نتیجه باعث افزایش کارآیی حذف الکترواسموتیک پایرن گردید.
۸	گودرزی و میرمومن ۱۳۹۵	تاثیر مشخصات مایع منفذی و زمان بر کارآیی روش الکتروکینتیک در رفع آلودگی فلزات سنگین از خاک	آزمایشگاهی	مشاهده شد کاهش PH سیستم خاک – الکترولیت، از طریق افزایش تحرک پذیری فلز سنگین و تغییر ریز ساختار خاک، قابلیت مهاجرت آلودگی از محیط را افزایش می‌دهد. بر اساس نتایج به دست آمده، تقویت جبهه اسیدی محیط پیرامون کاتد با توسعه فرآیند الکترولیز و کمک به افزایش غلظت یون +H درون توده خاک، روش موثری برای شدت بخشی راندمان اصلاح الکتروکینتیک (استخراج بیشتر آلودگی در زمان کمتر) خاک‌های ریزدانه حاوی فلزات سنگین می‌باشد.	در حضور محلول کاتولیت یک مولار اسید نیتریک نسبت به آب مقطر، بازده استخراج نزدیک به ٤۰٪ افزایش نشان می‌دهد.
۹	رمضانی و همکاران ۱۳۹۵	بررسی تاثیر فرآیند الکتروکینتیک به همراه آبشویی بر کیفیت زه آب در اصلاح یک خاک شور – سدیمی	آزمایشگاهی	نتایجی که از این آزمایش حاصل شد نشان داد که در تیمارهای الکتروکینتیک هدایت الکتریکی لحظه‌ای زه آب و شدت جریان الکتریکی عبور کرده از خاک به صورت افزایشی – کاهشی تغییر کرده‌اند.	با استفاده از این روش می‌توان در یک مدت زمان ثابت و حجم مشخصی آب آبشویی، یون‌های بیشتری را از خاک خارج نمود.
۱۰	خطایی و همکاران ۱۳۹٦	حذف نفت خام از خاک با استفاده از روش الکتروکینتیک بهبود یافته با سورفکتنت‌ها	آزمایشگاهی	به طور کلی می‌توان این گونه نتیجه گرفت که با کاربرد SDS ، افزایش دو پارامتر ولتاژ و غلظت سورفکتنت به بیش از CMC، تقریبا به یک میزان در راندمان حذف اثر گذاشته و آن را بهبود داده‌اند. از طرفی با کاربرد Saponin، اثر افزایش ولتاژ بر راندمان حذف بیشتر بوده است. در حالی که با افزایش غلظت سورفکتنت به بیش از CMC، راندمان حذف تغییر چندانی نداشته و حتی اندکی کاهش یافته است.	با کاربرد سورفکتنت SDS ، با غلظت بیش از CMC ، بیشترین راندمان حذف حاصل شده است.

۱۱	حافظ گلستانی فر ۱۳۹۸	روش‌های پاکسازی خاک‌های آلوده به ترکیبات نفتی	تحلیلی	لندفارمینگ و گیاه پالایی از روش‌های پاکسازی خاک آلوده به ترکیبات نفتی می‌باشد که لندفارمینگ برای غلظت بیش از ۵۰۰۰۰ ppm هیدروکربن‌های نفت اثر بخش نیست.	بررسی روش لندفارمینگ و گیاه پالایی برای خاک‌های آلوده به ترکیبات نفتی.
۱۲	خطایی و همکاران ۱۳۹۸	بررسی اثر تعویض متناوب قطبیت در راندمان حذف نفت خام از خاک به روش بیوالکتروکینتیک	آزمایشگاهی	در روش پاکسازی بیوالکتروکینتیک بدون تعویض قطبیت نتیجه پاکسازی برابر با ٤١ درصد و در روش بیوالکتروکینتیک با تعویض قطبیت نتیجه پاکسازی برابر با 61 درصد بدست آمد.	پاکسازی بیشتر روش بیوالکتروکینتیک با تعویض قطبیت.
۱۳	نصیری و همکاران ۱۳۹۸	اثر زمان و اسیدیته در بهبود کارآیی روش الکتروکینتیک برای پاکسازی خاک آلوده به کروم	آزمایشگاهی	با توجه به نتایج حاصل شده از تغییرات شدت جریان، به نظر می‌رسد زمان ۵ روز نتایج پاکسازی بهتری در مقایسه با مدت زمان ۳ روز داشته باشد.	ابتدا جریان الکتریکی در همه آزمایش‌ها کم بود. این پدیده به دلیل آن است که زمانی لازم است تا محلول الکترولیت موجود در محفظه آند وارد خاک آلوده شود و آلاینده های موجود در خاک را حل و یا از ذرات خاک واجذب کند ولی بعد از گذشت زمانی شدت جریان به روند بیشینه خود رسیده است. دلیل آن انتقال و مهاجرت الکتریکی آلاینده‌ها به سمت الکترودها است.
١٤	دلیرج و همکاران ۱۳۹۹	میزان حذف آلودگی و تغییرات PH خاک	تحلیلی	الکتروکینتیک مناسب‌ترین روش پاکسازی برای محیط های متخلخل با نفوذ پذیری پایین شناخته می‌شود.	در روش الکتروکینتیک، از گرادیان ولتاژ الکتریکی مستقیم یا جریان مستقیم با شدت کم عبوری از دو الکترود جایگذاری شده در خاک آلوده استفاده می شود و آلاینده ها به سمت الکترودها حرکت می‌کنند.
۱۵	براتی فردین و همکاران سال ۱۳۹۹	اثر افزایش ولتاژ و تنظیم PH در بهبود کارآیی روش الکتروکینتیک برای حذف کروزین از خاک آلوده	تحلیلی	الکترولیز آب سبب تولید یون‌های +H و -OH به ترتیب در آند و کاتد و ایجاد محیط اسیدی و قلیایی در نتیجه واکنش‌های اکسایش و کاهش در محل قرارگیری الکترودها طبق روابط ۱ و ۲ خواهد شد.	ماهیت غیر یونی و جذب بالای ترکیبات آلی به خاک سبب شده که سازوکار الکترواسمز، سازوکار اصلی و غالب به صورت تنها و یا در تلفیق با دیگر عوامل بهبود دهنده برای پاکسازی این ترکیبات از خاک باشد.

۱۶	شعبان و همکاران ۱۳۹۹	حذف نیکل از خاک شالیزار با استفاده از روش اصلاح الکتروکینتیک	آزمایشگاهی	نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که بهترین راندمان حذف فلز سنگین نیکل در ولتاژ ۱۰ و در فاصله بین الکترود ۱۰ سانتی متری رخ داده است.	در این تحقیق بازه زمانی انجام تحقیق مقدار ثابت ۷ روز در نظر گرفته شده است . به نظر می‌رسد در نظر گرفتن زمان‌های بیشتر منجر به جابجایی و حذف بیشتر آلاینده گردد.
۱۷	ادهمی و همکاران ۱۳۹۹	بررسی فرآیند حذف فنانترن از خاک با استفاده از فرآیند الکتروکینتیک	آزمایشگاهی	نتایج نشان دهنده کارآمدی روش تلفیقی الکتروکینتیک – فنتون در حذف آلاینده‌های آروماتیک از خاک است.	به منظور عملیاتی شدن این روش در مقیاس پایلوت نیاز به بررسی پارامترهای دیگری از جمله تأثیر نوع و غلظت اکسید کننده و کاتالیزور، کنترل PH ، اختلاف پتانسیل و دما است.
۱۸	اوحدی و همکاران ۱۳۹۹	تاثیر شدت بخشی با محلول کلسیم کلرید بر سازوکار الکترولیز و الکترواسمزی خاک رسی در فرآیند الکتروکینتیک	آزمایشگاهی	به نظر می رسد در نمونه های شدت بخشی شده با کلسیم کلرید، به دلیل انتقال یون کلسیم در نمونه و تبادل کاتیونی آن با کاتیون‌های یک ظرفیتی لایه دوگانه، و متعاقب آن با کاهش ضخامت لایه دوگانه رسی، در افزایش دبی الکترواسمزی تسهیل شده است.	بهبود عملکرد در حضور کلسیم کلرید را می‌توان به انتقال کاتیونی ناشی از حضور یون کلسیم نسبت داد. این فرایند می‌تواند سبب افزایش تحکیم اسمزی در مجاورت کاتد شود.
۱۹	جی وی یو و نرتنیکس ۱۹۹۶	ارزیابی نظری یک تکنیک برای آلودگی‌زدایی الکتریکی خاک	تحلیلی	نتایج پیش‌بینی نشان داده‌اند که کارایی تصفیه الکتروکینتیک به پارامترهای جذب و پخش بستگی دارد.	جذب بالا و نفوذ کند نیازمند زمان عمل‌آوری طولانی خواهد بود.
۲۰	کانر و همکاران ۲۰۰۳	استفاده ترکیبی از اصلاح الکتروکینتیک و گیاه پالایی برای رفع آلودگی خاک‌های آلوده به فلز	آزمایشگاهی	نتایج نشان می‌دهد که اعمال جریان الکتریکی در خاک‌های آلوده به مس و کادمیوم ناشی از انتشارات صنعتی باعث می‌شود که هر دو فلز از آند به کاتد مهاجرت کنند، همراه با تغییرات مشخصی در pH خاک.	رشد گیاه و جذب فلز، همراه با تجهیز فلزات خاک، در طول دوره های آزمایشی بیش از ۸۰ روز ادامه یافته است.
۲۱	مچری و ردی ۲۰۰۷	دفع و انتقال فلزات سنگین و آلاینده‌های خاک به روش الکتروکینتیک	آزمایشگاهی	با افزایش غلظت همحلال، جریان الکتریکی کاهش می‌یابد.	مجموعه ای از آزمایشات الکتروکینتیک با استفاده از خاک کائولن با نفوذپذیری کم انجام شد که حاوی فنانترن و نیکل هر کدام به میزان ۵۰۰ میلی گرم که تحت اعمال ولتاژ دوره‌ای قرار گرفت.

۲۲	اشمیت و همکاران ۲۰۰۷	یک مطالعه امکان سنجی آزمایشگاهی در مورد تزریق الکتروکینتیکی مواد مغذی در یک خاک آلی، گرمسیری و رسی	آزمایشگاهی	به دلیل ماهیت کلسیمی مورد مطالعه خاک غلظت فسفات در کاتولیت کاهش یافت جایی که احتمالاً به دلیل واکنش با کلسیم بود.	ظرفیت تبادل و هدایت الکتریکی، مانند استفاده در نتایج تجربی در طراحی یک سیستم در مقیاس مزرعه برای اصلاح خاک‌های آلوده به نفت و هیدروکربن در محل مفید است.
۲۳	تانگ تسای و همکاران ۲۰۰۹	استفاده از خوردگی الکترود آهن باعث افزایش اکسیداسیون الکتروکینتیک-فنتون برای اصلاح خاک‌های آلوده به گازوئیل	آزمایشگاهی	فرآیند الکتروکینتیک پیشرفته یک جهت عملی برای تصفیه خاک کم نفوذپذیر آلوده به گازوئیل است. الکترودهای آهن از نظر حذف TPH-D برتر از الکترودهای گرافیتی هستند.	ظرفیت تبادل و هدایت الکتریکی، مانند استفاده در نتایج تجربی در طراحی یک سیستم در مقیاس مزرعه برای اصلاح خاک‌های آلوده به نفت و هیدروکربن در محل مفید است.
۲٤	سو و همکاران ۲۰۱۰	یک مطالعه امکان سنجی آزمایشگاهی بر روی یک الگوی جدید تزریق مواد مغذی الکتروسینتیکی و زیست پالایی فنانترن در خاک رسی	آزمایشگاهی	با توجه به زیست پالایی خاک آلوده به فنانترن، الگوی معکوس قطبی منجر به تزریق بهتر یون شد، منجر به حذف بالاتر فنانترن می‌شود.	فنانترن یک هیدروکربن کریستالی موجود در قطران زغال سنگ، به ویژه در ساخت رنگ‌ها و داروهای مصنوعی استفاده می‌شود.
۲۵	یانگ لی و همکاران ۲۰۱۰	مطالعه امکان سنجی بیوالکتروسینتیک برای حذف فلزات سنگین از خاک	آزمایشگاهی	از نتایج کلی آزمایش‌ها، می‌توانیم نتیجه بگیریم که فرآیند بیولیچینگ توسط باکتری‌های اکسیدکننده S ممکن است یک مرحله پیش تصفیه خوب برای جمع کردن فلزات سنگین در خاک باشد.	فرآیند بیوالکتروکینتیک یک فناوری موثر برای اصلاح خاک است.
۲٦	رامیرز و همکاران ۲۰۱٤	امکان‌سنجی تامین اکسیژن الکتروکینتیک برای اهداف زیست پالایی خاک	آزمایشگاهی	جریان الکترواسمتیک به انتقال اکسیژن کمک نکرد و افزایش در گرادیان‌های ولتاژ، نرخ انتقال اکسیژن بالاتری را ایجاد کرد.	این روش را می توان برای فرآیندهای اصلاح خاک در مدت زمان بلند مورد استفاده قرار داد.
۲۷	گراسیا روبیو و همکاران ۲۰۱٦	امکان‌سنجی اصلاح الکتروکینتیک خاک آلوده به جیوه	آزمایشگاهی	برای حذف این بخش متحرک جیوه، آزمایش‌های الکتروتراکشن با اسید نیتریک به عنوان تقویت‌کننده انجام شد. مدل ریاضی مورد استفاده برای تجزیه و تحلیل سازگاری نتایج به دست آمده برای دو مقیاس نیز در این تحقیق ارائه شده است.	این مطالعه توزیع جیوه در بخش‌های مختلف قبل و بعد از تصفیه الکتروکینتیک را ارزیابی می‌کند

۲۸	کارگر و همکاران ۲۰۲۰	مطالعه امکان سنجی اصلاح فروپاشی خاک لس ایلینویز با استفاده از تکنیک الکتروکینتیک توسط نانو سیلیس و نمک	آزمایشگاهی	مشاهده شد که اصلاح الکتروکینتیک با محلول NaCl می تواند پتانسیل فروپاشی لس ایلینوی را در تنش عمودی ۲۰۰ کیلو پاسکال کاهش دهد.	از تنش های عمودی تست شده در نهایت می توان نتیجه گرفت که تکنیک الکتروکینتیک به عنوان یک روش با مزایای مختلف قادر است به طور موثر مشکل فروپاشی را برطرف کند.
۲۹	فیدل و همکاران ۲۰۲۰	تلفیق روش الکتروکینتیک و اکسیداسیون توسط TX-100	آزمایشگاهی	پس از تلفیق روش الکتروکینتیک و اکسیداسیون توسط TX-100، درصد حذف به ۸۸،۰۵ ٪ رسید که این نشان دهنده ی آن بود که آلاینده‌ها به طور قابل توجهی حذف شده‌اند.	در روش الکتروکینتیک به دلیل اینکه OCP به سختی قابل حل است در نتیجه بازده حذف به دست آمده بین ۲۲،۶۲٪ تا ۵۵،۷۸٪ می‌باشد که زیاد مطلوب نیست.
۳۰	کلایدیو و همکاران ۲۰۲۱	استفاده از اسیدهای آلی به عنوان عوامل تسهیل کننده در حذف فلزات سنگین از خاک	آزمایشگاهی	آزمایش‌های استخراج خاک فلزی نشان می دهد که اسید اگزالیک می تواند یک ماده استخراج کننده موثر برای کروم و اسید استیک برای سرب باشد . این دو اسید آلی را می توان در ترکیب با سیترات برای حذف همزمان شش فلز آزمایش کرد . روش دیگر، روش الکتروکینتیک پی در پی با اسید سیتریک ، اسید اگزالیک و اسید استیک ممکن است منجر به حذف شش فلز شود.	پاک سازی خاک آلوده به کروم و سرب نیاز به تحقیقات بیشتری برای شناسایی شرایط آزمایشی مناسب دارد که منجر به حذف قابل توجهی شود.

٤-نتیجه‌گیری

بهسازی خاک و رفع آلودگی آن در جهت کمک به محیط زیست در سال‌های اخیر مورد توجه مهندسین قرار داشته که از نتایج بدست آمده می‌توان به نکات زیر دست یافت:

-بهسازی و رفع آلودگی خاک با کمترین هزینه ممکن از آسیب بیشتر به محیط زیست و موجودات زنده جلوگیری می‌کند.

-در مورد خاک و محیط زیست همیشه پیشگیری از آلودگی می‌تواند بهتر از رفع آلودگی عمل کند.

-رفع آلودگی خاک و بهسازی آن می‌تواند شامل استفاده از تکنولوژی‌هایی برای از بین بردن آلودگی و حذف آن از خاک باشد که می‌تواند خاک را به شرایط اولیه خود بازگرداند البته این امر ساده نیست و نیازمند هزینه و زمان می‌باشد و این که یک روش نمی‌تواند تمام آلودگی‌های ایجاد شده در خاک را از بین ببرد.

-به خاطر همین موضوع ما صرفا به دنبال روشی نیستیم که ۱۰۰ درصد آلودگی خاک را از بین ببرد بلکه همین که بتوان آلودگی خاک را تا سطحی که برای جانداران محیط زیست و انسان‌ها خطرناک نباشد کاهش داد کفایت می‌کند.

-روش الکتروکینتیک یک تکنولوژی در جهت حفظ محیط زیست بوده و در راستای از بین بردن آلودگی خاک گسترش یافته است هرچند از این روش می‌توان در انواع مصالح جامدی که دارای تخلخل می‌باشند بهره گرفت.

-اصل روش الکتروکینتیک در خاک به حرکت درآمدن یون ها تحت تاثیر میدان الکتریکی ایجاد شده می‌باشد. می‌توان گفت اصلاح خاک به روش الکتروکینتیک از عبور دادن جریان برق از میان خاک بین الکترودها می‌باشد.

-با توجه به خصوصیات مختلف آلوده‌کننده‌های آلی و خصوصیات دیگر آلوده کننده مثل فلزات سنگین به نتیجه

می‌رسیم که اجرای روش الکتروکینتیک برای خاک‌هایی که با این فلزات آلوده شده‌اند متفاوت می‌باشد.

-در جاهایی که با آلودگی‌های پیچیده‌تری که می‌تواند شامل ترکیبات آلی کنترل نشده و غیر آلی مواجه باشیم می‌توان از به کار بردن ترکیب چند روش مختلف بهسازی نتایج بهتری را بدست آورد.

-از نتایج تحقیقاتی که طی سال‌های اخیر بوجود آمده می‌توان یافت که استفاده از روش الکتروکینتیک برای حذف کردن فلزات سنگین در مقایسه با حذف‌کردن مواد نفتی دارای بازدهی و نتایج بهتری می‌باشد این مسئله به این علت است که فلزات سنگین قطبی بوده که مهاجرت یون‌ها را ساده‌تر می‌کند.

۵-مراجع

-اوحدی، وحیدرضا، و خلج، محمد (۱۳۸۹). عملکرد ژیوتکنیک زیست محیطی نانورس‌ها در فرآیند الکتروکینتیک. *نهمین همایش دانشجویی فناوری نانو*. دانشگاه تربیت مدرس.

-بهاروندی، فهیمه، و چرم،مصطفی و غفوری، حیدرضا غفوری (۱۳۹۱). حذف فلز سنگین سرب از یک خاک رسی آلوده توسط پدیده الکتروکینتیک. *اولین همایش ملی توسعه پایدار کشاورزی و محیط زیست سالم*.

-کیایی،آرش. و توکلی محمدی،محمد رضا. و خدادادی، احمد (۱۳۹٤). بررسی بازدهی روش الکتروکینتیک در حذف جیوه از خاک رس آلوده. *علوم و تکنولوژی محیط زیست*، دوره هفدهم، شماره سه.

-جمالی مقدم، محمد. میرمحمد صادقی، مسعود و مویدی،حسین (۱۳۹٤). مروری بر روش الکتروکینتیک جهت رفع آلودگی زمین‌های آلوده. *اولین همایش ملی مهندسی عمران و محیط زیست*، دانشگاه آزاد اسلامی قزوین.

-لاجوردی، محسن. و شریعتمداری، نادر (۱۳۹٤). رفع آلودگی خاک آلوده به مواد نفتی روی و نیکل با روش الکتروکینتیک. *دهمین کنگره بین المللی مهندسی عمران*، تبریز، دانشگاه تبریز، دانشکده مهندسی عمران.

-تابع بردبار, علی، رئیسی‌استبرق، علی و غازیانی، فاطمه (۱۳۹٤). استفاده از روش الکتروکینتیک در پاکسازی یک خاک رسی آلوده به .MTBE *نشریه مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تبریز*٤٥ (۲)(۷۹)، ۳۳-۲۵.

-هاشمی، سید عنایت، رضایی، عباس، موسوی، سید محمد، نیکودل، محمد رضا و گنجی دوست، حسین (۱۳۹٤). حذف پایرن از خاک آلوده با استفاده از فرآیند الکتروکینتیک در تلفیق با سورفکتانت. دو ماهنامه طب جنوب، پژوهشکده زیست پزشکی خلیج فارس، *دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی درمانی بوشهر*، سال هجدهم، شماره سوم، ۵۲٦-۵۱٦.

-گودرزی، امیر رضا و میرمومن، متین (۱۳۹۵). تاثیر مشخصات مایع منفذی و زمان بر کارآیی روش الکتروکینتیک در رفع آلودگی فلزات سنگین از خاک. *مجله علمی پژوهشی، عمران مدرس*، دوره شانزدهم، شماره دوم.

-رمضانی، میثم و غلامی سفید کوهی، محمد علی و ضیاء تبار احمدی، میرخالق (۱۳۹۵). بررسی تاثیر فرآیند الکتروکینتیک به همراه آبشویی بر کیفیت زه آب در اصلاح یک خاک شور – سدیمی. *نشریه حفاظت منابع آب و خاک*، سال پنجم، شماره سوم.

-خطایی، بهنوش، مختارانی، نادر. و گنجی دوست، حسین (۱۳۹٦). حذف نفت خام از خاک با استفاده از روش الکتروکینتیک بهبود یافته با سورفکتنت‌ها. *نشریه مهندسی عمران شریف*، دوره ۲_۳۳، شماره ۲/۱، ۱۱٤-۱۰۷.

-گلستانی فر،حافظ (۱۳۹۸). روش‌های پاکسازی خاک‌های آلوده به ترکیبات نفتی. ماهنامه‌ی علمی اکتشاف و تولید نفت و گاز. ش. ۱٦۸.

-خطایی، بهنوش و مختارانی، نادر و گنجی دوست، حسین (۱۳۹۸). بررسی اثر تعویض متناوب قطبیت در راندمان حذف نفت خام از خاک به روش بیوالکتروکینتیک. *نشریه مهندسی عمران شریف*، دوره ۲ – ۳۵، شماره دوم، ۱۲۳-۱۱۳.

-نصیری، افشین و جمشیدی زنجانی، احمد و خدادادی دربان، احمد (۱۳۹۸). اثر زمان و اسیدیته در بهبود کارآیی روش الکتروکینتیک برای پاکسازی خاک آلوده به کروم. *نشریه مهندسی منابع معدنی*، دوره چهارم، شماره چهارم، ۱۲۵-۱۱۱.

– دلیرج کندوسر، مهدی و عبادی، تقی و سید علیپور، سیده فاطمه (۱۳۹۹). مروری بر پاکسازی خاک‌های آلوده با استفاده از روش الکتروکینتیک. *ششمین کنفرانس بین المللی مهندسی عمران، معماری و شهرسازی*.

-براتی فردین، علی و خدادادی دربان، احمد و جمشیدی زنجانی، احمد (۱۳۹۹). اثر افزایش ولتاژ و تنظیم PH در بهبود کارآیی روش الکتروکینتیک برای حذف کروزین از خاک آلوده. *مجله علمی پژوهشی، مهندسی عمران مدرس*، دوره بیستم، شماره سوم.

-شعبان، محسن و یوسفی کبریا، داریوش و رضوی، مرضیه (۱۳۹۹). حذف نیکل از خاک شالیزار با استفاده از روش اصلاح الکتروکینتیک. *هشتمین کنفرانس ملی مهندسی عمران، معماری و توسعه شهری پایدار ایران.*

-ادهمی، سجاد و جمشیدی زنجانی، احمد و خدادادی دربان، احمد (۱۳۹۹). بررسی فرآیند حذف فنانترن از خاک با استفاده از فرآیند الکتروکینتیک – فنتون. *مجله علمی پژوهشی مهندسی عمران مدرس*، دوره بیستم، شماره اول.

-Claudio, C. Susana, G. Adrian, C. (2021). Enhanced Electrokinetic Remediation For The Removal of Heavy Metals from Contaminated Soils. Department of Chemical Engineering, Biotecnia, *University of Vigo*, 36310 Vigo, Spain.

-C. Sidoli O'connor, N. W. Lepp, R. Edwards and G. Sunderland (2003). The Combined Use of Electrokinetic Remediation and Phytoremediation to Decontaminate Metal-Polluted Soils: A Laboratory-Scale Feasibility Study. *Environmental Monitoring and Assessment*, Vol. 84.141–158.

-Celina A.B. Schmidt, Maria Claudia Barbosa, Marcio De S.S. De Almeida. (2007). A Laboratory Feasibility Study on Electrokinetic Injection of Nutrients on An Organic, Tropical, Clayey Soil. *Journal of Hazardous Materials*, Vol.143, 655–661.

-Fidele, S. And Liu, T. And Hongjie, S. And Yuhao, F. and Leilei, X .And Anna, H. And Xin, J. and Daouda, M. and Fang, W. (2020). Organochlorine Pesticides Contaminated Soil Decontamination Using Tritonx-100-Enhanced Advanced Oxidation Under Electrokinetic Remediation. *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 393.

-E. Mena Ramírez, J. Villaseñor Camacho, M.A. Rodrigo Rodrigo, P. Cañizares Cañizares (2014). Feasibility of Electrokinetic Oxygen

-اوحدی، وحید رضا و محمدی، آرمان و بهادری نژاد، امیدرضا (۱۳۹۹). تاثیر شدت بخشی با محلول کلسیم کلرید بر سازوکار الکترولیز و الکترواسمزی خاک رسی در فرآیند الکتروکینتیک. *مجله علمی پژوهشی مهندسی عمران مدرس*، دوره بیستم، شماره چهارم.

-Ana Garcı´A-Rubio, Marı´A Ville´N-Guzma´N, Francisco Garcı´A-Herruzo, Jose´ M. Rodrı´Guez-Maroto, Carlos Vereda-Alonso, Ce´Sar Gomez-Lahoz, And Juan Manuel Paz-Garcı´A (2016). Feasibility Study of the Electrokinetic Remediation of a Mercury-Polluted Soil. Chemical Engineering Department, *University of Ma´Laga, Ma´Laga 29071*, Spain.

Supply for Soil Bioremediation Purposes. Chemosphere, Vl.117, 382-387.

-Kranti Maturi & Krishna R. Reddy (2007). Cosolvent-Enhanced Desorption and Transport of Heavy Metals and Organic Contaminants in Soils During Electrokinetic Remediation. *Water Air Soil Pollut*, Vol.189, 199–211.

–Ji-Wei Yu, Ivars Neretnieks (1996). Theoretical Evaluation of a Technique for Electrokinetic Decontamination of Soils. *Journal of Contaminant Hydrology*, Vol.26, 291-299.

-Keun-Young Lee, Hyun A. Kim, Byung-Tae Lee, Soon-Oh Kim, Young-Ho Kwon, Kyoung-Woong Kim. (2010). a Feasibility Study on. *Environ Geochem Health*, Vol.33, 3–11.

– Ghiasi, V., & madah, S. (2022). Investigation of increasing shear strength of dispersive clays using additives. Road.

doi: 10.22034/road.2022.324512.2023

-Ghiasi, V., & Tavagho Hamedani, H. (2022). A review of soil improvement with waste and recycled materials and its impact on soil parameters. *Road*.

doi: 10.22034/road.2022.324228.2019

portland cement: review of the 3-d printing of concrete. *Applied Engineering and Technology*, *2*(2), 133-152.

-Ghiasi, V., & Dashti famili, S. (2023). A Review of the Factors That Cause Sinkholes and the Effect of Soil Type on Its Formation. *Road*, *31*(114), 15-32.

doi: 10.22034/road.2022.323699.2017

-Haghtalab M, Ghiasi V and Shirzadi Javid A (2023), Study of changes in the kinetic parameters of corrosion on the macrocell current induced by the repair of reinforced concrete structures - Results of numerical simulation, Computers and Concrete, 32(3), 287-302.**doi.org/10.12989/cac.2023.32.3.287**

-Pourya Kargar, Abdolreza Osouli, Brent Vaughn, Arash Hosseini, and Hamid Rostami (2020). Feasibility Study of Collapse Remediation of Illinois Loess Using Electrokinetics Technique by Nanosilica and Salt Geo Congress. Geo-Congress Vol.315, 667-675.

-Tzai-Tang Tsai, Jygau Sah, Chih-Ming Kao. (2009). Application Of Iron Electrode Corrosion Enhanced Electrokinetic-Fenton Oxidation To Remediate Diesel Contaminated Soils: A Laboratory Feasibility Study. *Journal of Hydrology*, Vol.380, 4–13.

-Wei Xu, Cuiping Wang, Haibin Liu, Zhiyuan Zhang, Hongwen Sun. (2010). A Laboratory Feasibility Study on a New Electrokinetic Nutrient Injection Pattern and Bioremediation of Phenanthrene in a Clayey Soil. *Journal of Hazardous Materials*, Vol.184, 798-804.

-Ghiasi, V., & Molaei Tari, P. (2022). Geotechnical design of landfills and solutions for their construction in different soils. *Road*. **doi: 10.22034/road.2022.324326.2020**

-Ghiasi, V., & nazhdghorbani, A. (2022). An overview of the use of fly ash for soil stabilization. *Road*.
doi: 10.22034/road.2022.333556.2034

-Ghiasi, V., & molaei tari, P. (2023). Investigating the potential application of biochar on soil water retention properties (swrc) with different textures in geotechnical engineering structures. *Road*.
doi: 10.22034/road.2023.353589.2073

-Ghiasi, V., & Eskandari, S. (2024). Improvement of Alluvial Soils Using Cement Injection Method. *Road*, *32*(118), 209-232. **doi: 10.22034/road.2022.323689.2016**

-Ghiasi, V., & Zakavi, I. (2023). Geosynthetics of Stone Columns- A Review. *Road*, *31*(117), 143-170.
doi: 10.22034/road.2022.333550.2033

-Ghiasi, V., Haghtalab Joraghani, M., & Rashno, S. (2023). An Overview of Chemical Soil Stabilization Methods. *Road*, *31*(116), 151-166.

doi: 10.22034/road.2022.312705.1988

-Jafarzadeh Marandi, M., Ghiasi, V., & Badv, K. (2023). Numerical Evaluation of Two-dimensional Multi-layer Cover System to Regulate Acid Mine Drainage of Tailing Dams. *International Journal of Engineering*, *36*(10), 1839-1856.

-Rahimpour, H., Ghiasi, V., Fahmi, A., & Marabi, Y. (2023). Geopolymer vs ordinary

Feasibility Study of Soil Pollution Removal Using the Electrokinetic Method

Vahed Ghiasi, Department of Civil Engineering, Faculty of Civil and Architecture Engineering, Malayer University, Malayer, Iran.
Milad Kamalabadi Farahani, M.Sc., Student, Department of Civil Engineering, Malayer University, Malayer, Iran.

E-mail: v.ghiasi@malayeru.ac.ir

Received: February 2024- Accepted: June 2024

ABSTRACT

One of the most critical discussions about environmental pollution is soil pollution. Contaminated soil can endanger the life of organisms. For this reason, removing all types of soil contamination and even reducing the types of soil contamination is a fundamental and critical issue. One of the ways to clean and improve contaminated soils is the electrokinetic method; the principle of this method is to transfer the contaminated ions in the soil by an electric field and to eliminate and neutralize the contaminated ion or remove them from the soil. This practical method can remove various contaminants such as petroleum products and heavy metals. In some cases, this method can be seen along with other methods of soil improvement or even combining this method with some other methods to see a much better result. The present study will present the research on soil contamination by the electrokinetic method and its limitations.

Keywords: Electrokinetics, Soil Pollution Removal, Heavy Metals, Soil Remediation, Electric Field, Petroleum Hydrocarbons