

## حذف مواد نفتی از خاک با تلفیق دو روش الکتروکینتیک و گیاه پالایی

امیرحسین کریمی

دانشجوی دکتری مهندسی ژئوتکنیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

### چکیده

در طی ۲۰۰ سال گذشته افزایش سریع جمعیت جهان منجر به نیاز شدید به مقادیر زیاد سوخت، مواد شیمیایی صنعتی، کودهای مختلف، سموم دفع آفات و داروها شده است تا موجب بهبود کیفیت زندگی گردد. با وجود مصرف بیشتر این مواد بخشی از آن خراب و بخشی نیز وارد محیط زیست شده و باعث خطرات بالقوه و بالفعل زیست محیطی گردیده اند. وجود این مواد در طبیعت به دلیل سمی بودن، سرطان زایی و توانایی ورود به چرخه غذایی و مهمتر از همه، دوام بالا در خاک، نگرانی های بسیاری را سبب شده است. برای نمونه آلودگی خاک در محیط زیست از مسائل مهم روز است که جوامع مختلف با آن روبه رو هستند از دیدگاه جهانی پس از آب و هوا، پوسته خاک، سومین جزء عمده محیط زیست انسان تلقی می شود. توان خود پالایی خاک به علت کم بودن مبادله ی آن کمتر از توان خود پالایی هوا و آب است.

در صورتی که خاک بر اثر فعالیت های بشر وضعیتی پیدا کند که دیگر نتوان بهترین کاربری را از آن داشته باشیم در اصطلاح می گویند خاک آلوده شده است. یا به عبارتی دیگر: هر فعالیتی که توسط بشر صورت پذیرد، بطوریکه نتوان از آن خاک بهترین استفاده را داشت، اصطلاحاً آلودگی خاک می گویند در سال های اخیر قوانین و آیین نامه های سختگیرانه در زمینه محیط زیست موجب شد تا بشر برای سالم سازی مناطق آلوده به انجام پژوهش های متعدد روی آورد. اخیراً روشهای زیادی برای حذف فلزات سنگین از خاک و پاکسازی مکانهای آلوده پیشنهاد شده است.

**واژگان کلیدی:** پاکسازی خاک، الکتروکینتیک، گیاه پالایی

## مقدمه

آلودگی های نفتی یک پیامد اجتناب ناپذیر از افزایش سریع جمعیت و فرایند صنعتی شدن است که به دنبال آن آلودگی خاک توسط مواد هیدروکربنه نفتی به شکل وسیع در اطراف تاسیسات اکتشاف و پالایش و به شکل موضعی در مسیرهای انتقال این مواد در سطح استان های نفت خیز جنوبی کشور قابل مشاهده است. علاوه بر انتشار مستقیم این آلاینده ها، غبار حاصل از سوخت گازهای همراه نفت، طی سالیان متمادی توانسته مواد سمی و مضر به خاک های منطقه اضافه کند. وجود این آلاینده ها در محیط زیست علاوه بر تاثیر گسترده بر اکوسیستم منطقه، با گذشت زمان و ورود به چرخه غذایی، به جوامع انسانی نیز راه می یابند و به این ترتیب سلامت انسان ها را تهدید می کند. و از سویی دیگر، پتانسیل بالفعل این خاک ها را برای استفاده های بهینه در زمینه کشاورزی و تولید محصول، بسیار کاهش می دهد.

فلزات سنگین یکی از مهمترین منابع آلودگی خاک به حساب می آیند. مهمترین منابع آلودگی فلز سنگین انتشار فلزات از معادن، کارخانه های ذوب آهن، سوزاندن زغال سنگ و زباله، فاضلاب شهری، صنعت متالوژی و غیره می باشند. از آنجا که فلزات سنگین قابلیت تخریب پذیری ندارند در مرور زمان به دلایل متفاوت تجمع یافته و بر غلظت و اثرات مخرب آن افزوده می شود. غلظت بالای فلزات سنگین در خاک تاثیرات نامطلوبی بر خصوصیات شیمیایی و فیزیکی خاک دارد، آلودگی فلزات سنگین خاک ممکن است خطراتی را برای انسان و اکوسیستم از طریق : مصرف مستقیم یا تماس با خاک آلوده، زنجیره غذایی، نوشیدن آب زیر زمینی آلوده ایجاد کند که باعث تجمع بیولوژیکی در حیوانات و انسان می شود. همچنین سبب کاهش کیفیت مواد غذایی از طریق سمیت سلولی، کاهش قابلیت استفاده اراضی برای تولید محصولات کشاورزی و استفاده های عمرانی و مشکلات تصرف و کمبود زمین از دیگر معضلات آلودگی فلزات سنگین می باشد. در ادامه به اثراتی که آلاینده های آلی و غیرآلی در خاک دارند می پردازیم که شامل موارد زیر است:

۱- اولین اثراتی که پخش مواد نفتی یا نفوذ گازهای طبیعی، در خاک می گذارد، جایگزین شدن هوای خاک با گازهای مذکور و بوجود آمدن یک محیط بی هوازی است که نهایتا منجر به نابودی میکروارگانیسم ها و پوشش گیاهی خواهد شد.

۲- از دیگر مضرات پخش مواد نفتی، سمیت خاص برخی از هیدروکربن های حلقوی روی رشد و نمو گیاهان می باشد.

۳- از دیگر مضرات پخش مواد نفتی، سمیت خاص برخی از هیدروکربن های حلقوی روی رشد و نمو گیاهان می باشد.

۴- از بین رفتن حاصلخیزی خاک.

۵- ایجاد مسمومیت در آبزیان و حیات وحش.

۶- کاهش شدید اکسیژن محلول در آب و جلوگیری از تبادل اکسیژن.

همچنین آلاینده های آلی و غیر آلی بر انسان شامل اثراتی هستند که نوع و شدت به عوامل زیر بستگی دارد:

۱- میزان ورود این مواد به بدن انسان ها.

۲- پاسخ بدن نسبت به ورود آن ها که با سن، جنس، وضع تغذیه و سلامت شخص متفاوت است.

۳-مدت زمان تماس با این مواد.

۴-منبع یا مسیر تماس با اینگونه مواد

آلاینده ها در خاک ممکن است سرنوشت هایی در

- واکنش با محلول های آلی خاک،تشکیل رسوب و نامحلول شدن مشتقات آلاینده \_
- تبخیر شدن به هوا.
- واکنش با اجزای آلی خاک مانند اسیدهای هیومیک.
- مبادله با عامل هیدروکسیل و سایرگروههای خاک رس.
- انتقال به آبهای زیرزمینی.
- جذب شدن به سطح ذرات.
- تجزیه زیست

روش های پالایش خاک های آلوده :

خاک های آلوده به جهت طبیعت ناهمگن خاک و حجم بالای موادی که باید اصلاح شوند محیطی پیچیده و پرهزینه برای پاکسازی هستند. بر اساس تحقیقات دفتر بررسی آلودگی آب و خاک سازمان حفاظت محیط زیست ، رفع آلودگی خاک معمولا با دو روش خارج از محل و در محل صورت می گیرد.

- ۱- شیشه گون سازی
- ۲- گیاه پالایی
- ۳- استخراج بخارات آلاینده ها
- ۴- رفع آلودگی حرارتی
- ۵- جداسازی الکتروکینتیکی
- ۶- خاکشویی
- ۷- روش های تصفیه بیولوژیکی
- ۸- لندفارمینگ
- ۹- تثبیت و جداسازی

فاکتور های مهم انتخاب روش رفع آلودگی مورد استفاده :

- پایداری و اثربخشی بلند مدت
- فراوانی غلظت فلزات هدف
- در دسترس بودن تجاری
- پذیرش عمومی
- هزینه

## ۱- رفع آلودگی حرارتی :

رفع آلودگی حرارتی دسته ای از تکنیک هایی است که از کاربرد گرما در الف) تقویت حرکت آلاینده ها ( به عنوان مثال، بخار/توزیع هوای گرم ) ، ب) جداسدن آلودگی از ذرات خاک ( به عنوان مثال، دفع حرارتی و گرم کردن ماکروویو )، پ) تبدیل آلودگی ها به مواد با سمیت و خطر کمتر ( به عنوان مثال، پاپرولیز )، ت) از بین بردن کامل آلودگی ها ( مانند، سوزاندن و بیت ذوب شدن ) و یا ث) جلوگیری از حرکت آلاینده ها ( به عنوان مثال ، انجماد) استفاده می کند. برای کاهش طیف وسیعی از آلاینده های آلی ، از جمله هیدروکربن های نفتی، هیدروکربن های آروماتیک چند حلقه ای و آفت کش ها می توان از روش های رفع آلودگی حرارتی استفاده کرد. علاوه بر این ، روش های حرارتی در کاهش غلظت جیوه در خاک نیز موثر هستند. در حالیکه رفع آلودگی حرارتی می تواند سریعتر و قابل اطمینان تر از برخی روش های دیگر باشد، اما به طور معمول به زیر ساخت ها و ماشین آلات بیشتری احتیاج دارد و در نتیجه هزینه بیشتری نیز به همراه خواهد داشت. علاوه بر این، در بررسی های اخیر محققان در یافته اند که روش های حرارتی بر بسیاری از خواص خاک تاثیر میگذارند.

## ۲- استخراج بخارات آلاینده ها :

روش پاکسازی استخراج بخارات آلاینده ها یا SVE که همچنین با عناوین تهویه خاک یا استخراج خلاء نیز شناخته می شود، یک روش در محل برای پاکسازی خاک های آلوده در خاک های غیر اشباع است که با استفاده از آن با نصب چاه های عمودی و یا افقی در منطقه آلودگی خاک و با ایجاد خلا در شبکه خاک، گرادیان فشار منفی به وجود آمده و باعث حرکت بخارات، که با کمک دمنده های هوا ایجاد می شوند ، به سمت چاه های استخراج می شود، سپس این بخارات قبل از آزاد شدن در اتمسفر ( معمولاً با جذب کربن) پاکسازی می شوند SVE. معمولاً در مواردی که منطقه غیر اشباع به نسبت نفوذ پذیر و یکدست باشد کاربرد بیشتری دارد. در حالت ایده آل سایت باید با یک لایه سطحی غیرقابل نفوذ پوشانده شود تا اتصال کوتاه جریان هوا و نفوذ به حداقل برسد. این روش در مواقعی که برای فرآورده های سبک تر و فرار نفتی از جمله بنزین استفاده می شود، بیشترین کاربرد را دارد. سوخت های سنگین مانند سوخت دیزل، روغن های گرمایش و نفت سفید به راحتی توسط این روش حذف نمی شوند.

## ۳- شیشه گون سازی :

شیشه گون سازی یا شیشه مذاب روشی است که از یک منبع انرژی قدرتمند برای ذوب کردن خاک یا سایر مواد خاکی در دماهای بسیار زیاد (۲۰۰۰-۱۶۰۰ درجه سانتی گراد) استفاده می کند، و باعث بی حرکتی مواد معدنی و یا از بین بردن آلاینده های آلی با استفاده از پاپرولیز می شود. در طی این فرآیند، اکثر آلاینده هایی که در ابتدا در خاک وجود دارند ، به صورت فرار در می آیند ، در حالیکه باقی مانده به یک ماده شیمیایی ساکن ، پایدار و کریستالی تبدیل می شوند. درجه حرارت بالا اجزای آلی را از بین برده و در نتیجه محصول جانبی اندکی حاصل می شود. مواد معدنی ، مانند فلزات سنگین و رادیونوکلیدها، در واقع در یک ساختار شیشه ای ایجاد می کنند که عموماً قوی و بادوام بوده و در برابر نشت مقاوم می باشند.

فرآیند شیشه گون سازی شامل سه روش اصلی می باشند:

۱- فرآیند های الکتریکی : استفاده از انرژی الکتریکی در محل از طریق الکترود های گرافیتی قرار داده شده در زمین.

۲- فرآیند های حرارتی: به یک منبع گرمای خارجی و یک راکتور معمولی ( کیت دوار با روکش نسوز) نیاز است.

۳- فرآیندهای پلاسما : از طریق تخلیه الکتریکی می توانند تا ۵۰۰۰ درجه سانتی گراد حرارت ایجاد کنند.

#### ۴- خاکشویی:

شستشو خاک با استفاده از مایعات (معمولا آب، گهگاه همراه با حلال ها) و با کمک فرآیند های مکانیکی برای تمیز کردن خاک ها انجام می پذیرد. حلال ها بر اساس توانایی آن ها در حل آلودگی خاص و اثرات محیطی و بهداشتی آن ها انتخاب می شوند. فرآیند خاک شویی خاک های ریز دانه (خاک رس و سلیت) را از خاک های درشت دانه ( شن و ماسه) جدا می کند. از آنجا که آلاینده های هیدروکربن تمایل دارند که به ذرات ریز تر خاک ( در درجه اول رس و سلیت) بچسبند و از آن جدا شوند، بنابراین جدا کردن ذرات ریز تر خاک از بزرگتر باعث کاهش حجم خاک های آلوده می شود. سپس خاک های ریز دانه می توانند با روش های دیگر (مانند سوزاندن یا تجدید بیولوژیکی) پاکسازی شوند و یا طبق مقررات محلی دفع شوند. گروه های آلوده هدف این فرآیند شامل ترکیبات آلی نیمه فرار (SVOC)، مواد نفتی و باقیمانده سوخت، فلزات سنگین، PCB، PAHs، و آفت کش ها می باشند. این فناوری علاوه بر پاکسازی طیف گسترده ای از آلاینده های آلی و معدنی از خاک های درشت دانه، بازیابی فلزات را امکان پذیر می کند.

#### ۵- لندفارمینگ:

لندفارمینگ یک فناوری اصلاح خاک های آلوده است که بالای سطح زمین اجرا می شود، این روش غلظت ترکیبات نفتی موجود در خاک را از طریق فرآیند های مرتبط با رفع آلودگی بیولوژیکی کاهش می دهد. این فناوری معمولا شامل پخش خاک های آلوده حفاری شده در یک لایه نازک ( کمتر از ۱.۵ متر) بر روی سطح زمین یک محل تصفیه شده و تحریک فعالیت میکروبی هوازی در خاک ها از طریق هوادهی و یا اضافه کردن مواد مغذی، مواد معدنی، آب و رطوبت است. باکتری ها که به دلیل کاربرد مناسب آن ها در تجزیه هیدروکربن ها انتخاب شده اند، اغلب برای تجزیه و تخریب سریع ساختار آلودگی به خاک اضافه می شوند. روش لندفارمینگ روشی موفق در رفع آلودگی هیدروکربن های نفتی است که بیش از ۱۰۰ سال در سراسر جهان و بیش از ۲۵ سال توسط صنایع نفتی انجام می گردد. از مهم ترین مشاهدات مربوط به عملکرد لندفارمینگ به موارد زیر می توان اشاره کرد:

- به مقدار زیادی زمین نیاز دارد.
- در تخریب اجزای سنگین نفتی کارآمد نیست.
- pH خاک در محدوده ۶.۵-۷.۵ شرایط بهینه را برای تجزیه تخریب فراهم می آورد.
- این روش برای سایت هایی با غلظت مواد تشکیل دهنده بیشتر از ۵۰۰ ppm موثر نمی باشند
- در این روش رطوبت مطلوب برای بالاترین میزان تخریب، ۱۸٪ است. در رطوبت ۳۳٪ (خیلی مرطوب) و ۱۲٪ رطوبت (خیلی خشک)، میزان تخریب بسیار پایین است.

#### ۶- تصفیه بیولوژیکی:

رفع آلودگی بیولوژیکی، رفع آلودگی خاک با استفاده از فعالیت های میکروبی و یا باکتری می باشد. در مقایسه با روش های فیزیکی و شیمیایی و حرارتی، این روش معمولا کم هزینه تر بوده و برای رفع آلودگی های نفتی مفید می باشد. در این روش باکتری ها با تغذیه هیدروکربن های موجود در خاک به عنوان منبع غذایی، باعث پاکسازی آلودگی های نفتی می شوند. این فعالیت تا زمانیکه از بین رود ادامه خواهد داشت و سپس به دلیل نبود منبع تغذیه میکروارگانیسم ها از بین می روند. مهم ترین اطلاعات مورد نیاز برای اجرای این روش موارد زیر می باشند:

- شرایط فیزیکی خاک (مانند: نفوذ پذیری، تخلل، PH، رطوبت)
- نوع و غلظت آلاینده
- خصوصیات ترکیبات میکروبی

این روش خود می تواند به صورت مستقیم و به تنهایی مورد استفاده قرار گیرد و هم می تواند به صورت ترکیبی و با روش های دیگر استفاده می شود، که از مهم ترین روش های رفع آلودگی بیولوژیکی می توان به القا بیولوژیکی، از یاد بیولوژیکی، تپه های بیولوژیکی، اصلاح بیولوژیکی دوغاب، زسیت درمانی پیشرفته اشاره کرد. تجزیه بیولوژیکی دوغاب یکی از روش های مرسوم این فناوری می باشد. این روش رفع آلودگی بیولوژیکی خارج از محل بوده و نیاز به خاکبرداری از خاک آلوده دارد. این فرآیند با ترکیب خاک خاکبرداری شده با آب و سایر مواد افزودنی انجام می شود و همچنین باکتری هایی که برای تجزیه آلودگی انتخاب شده اند نیز اضافه می شوند. خاک خاکبرداری شده در یک بیوراکتور کنترل شده که در آن دوغاب مخلوط شده است تا مواد جامد به حالت تعلیق درآیند و میکروارگانیسم در تماس با آلاینده ها قرار گیرند، پاکسازی می شود. در این راکتور ها، تجزیه بیولوژیکی با سرعت بالایی اتفاق می افتد، که زمان تقریبی پاکسازی معمولا بین ۱ تا ۶ ماه می باشد. پس از اتمام فرآیند، بر روی دوغاب آب زدایی صورت میگیرد و خاک پاکسازی شده دفع می شود.

#### ۷- تثبیت و جداسازی:

تثبیت و جامدسازی، حرکت مواد خطرناک و آلاینده ها را در محیط از طریق دو روش فیزیکی و شیمیایی کاهش می دهد. تثبیت و جامدسازی در محل و یا خارج از محل معمولا در خاک های آلوده به فلزات سنگین و سایر ترکیبات معدنی اعمال می شود. با این حال، تثبیت خاک هایی که حاوی مقادیر کم ترکیبات آلی هستند، حتی برای ارگانیک های فرار نیز امکان پذیر است. تثبیت به طور کلی به فرآیندی اطلاق میشود که با تبدیل آلودگی به حالت بی تحرک، با قابلیت انحلال کم تر و سمیت پایین تر، خطر ایجاد شده توسط آلودگی را کاهش میدهد که به وسیله واکنش شیمیایی بین فلز سنگین و بایندر اتفاق می افتد. از طرف دیگر جامد سازی به فرآیندی گفته می شود که مواد آلوده را در یک محیط جامه و با ساختاری یکپارچه محصور میکند که معمولا به صورت فیزیکی بوده و واکنش های شیمیایی در این مرحله لزوما اتفاق نمی افتد. ترکیب فرآیند تثبیت و جامد سازی معمولا منجر به افزایش استحکام و کاهش قابلیت نشت، تراکم پذیری و هدایت هیدرولیکی می شود. با این حال، کاهش نشت فلزات مهم ترین عامل است زیرا، از دیدگاه زیست محیطی، فرآیند S/S زمانی که در نشت وجود نداشته باشد، معنی ندارد. تثبیت و جامد سازی در محل از سه مولفه اصلی تشکیل شده است: ۱- مخلوط کردن خاک آلوده در محل. ۲- سیستم ذخیره سازی، آماده سازی و تغذیه. ۳- وسیله ای برای رساندن افزودنی به منطقه اختلاط خاک.

#### ۸- گیاه پالایی:

این روش اولین بار در سال ۱۹۸۳ برای حذف مواد آلی و غیر آلی و دیگر ترکیبات آلاینده خاک به کار گرفته شده است. گیاه پالایی به معنای استفاده از گیاهان سبز برای حذف آلاینده های محیط زیست، مثل فلزات سنگین یا سمی، مواد نفتی و مواد شیمیایی از محیط یا تبدیل آن ها به آلاینده های بدون خطر می باشد. گیاه پالایی یک فناوری نسبتاً نوین و اقتصادی در پالایش خاک های آلوده است که در آن از گیاهان مقاوم جهت پالایش خاک ها، رسوبات، آب های زیر زمینی و سطحی آلوده به آلاینده های آلی و غیر آلی و کاهش غلظت آلاینده های معدنی و رادیواکتیو استفاده میشود. در فن آوری گیاه پالایی، ریشه گیاهان محرکی بر فعالیت میکروبی است و باعث افزایش جمعیت میکروبی تجزیه کننده آلاینده ها شده و به طور غیر مستقیم از جمله با تامین منابع انرژی، کربن و نیتروژن مورد نیاز جانداران تجزیه کننده آلاینده ها از طریق ترشحات ریشه ای گیاهان مانند کربو هیدرات ها، آمینو اسید ها، اسید نوکلئیک، عوامل رشد و سایر ترکیبات ترشح شده سرعت تجزیه آلاینده ها را افزایش می دهد و سبب کاهش بیشتر آلاینده های نفتی از خاک می شود. به همین سبب انتخاب گیاهانی که در خاک های آلوده آلاینده ها تأثیر کمتری روی آن ها دارد و نسبت به گیاهان دیگر سالم و مقاوم تر باشند با ایجاد سیستم ریشه ای سالم می توانند سرعت و کیفیت عملیات گیاه پالایی را بهبود بخشد. پالایش به دو صورت مستقیم و غیرمستقیم انجام می شود: در پالایش مستقیم، گیاهان با جذب آلاینده ها و تجمع آن ها در سلول خود باعث تجزیه و تخریب آلاینده ها می شود. در پالایش غیر مستقیم گیاهان با ترشحات خود موجب تحریک ریزجانداران در ریزوسفر شدن و تخریب آلاینده ها را افزایش میدهد. گیاه پالایی برای آلاینده های آلی و غیر آلی موجود در سه بستر جامد (مانند خاک)، مایع (مانند آب) و هوا استفاده می شود. مکانیسم های گیاه پالایی شامل موارد زیر می باشند که در ادامه به توضیح مختصری از هر کدام از موارد می پردازیم.

#### • استخراج گیاهی:

استخراج گیاهی شامل جذب مواد آلاینده از طریق ریشه و تجمع آن در اندام های هوایی می باشد. در استخراج گیاهی جذب مواد آلاینده به وسیله ریشه ها و سپس با تجمع این مواد در اندام های گیاه همراه می باشد که عموماً به صورت بایومس گیاهی برداشت و از بین برده می شود. استخراج گیاهی برای فلزات، متالویدها (As, Se)، مواد رادیواکتیو و غیر فلزات به کار می رود. این مواد داخل گیاه تجزیه نشده و تغییر شکل نمی یابد. استخراج گیاهی برای جذب مواد آلی یا آلاینده های غذایی به وسیله گیاه مورد استفاده قرار نمی گیرد، چون این مواد می توانند متابولیزه شده و تغییر شکل یافته یا توسط گیاه تبخیر شوند، به طوریکه از تجمع مواد آلاینده ها در گیاه جلوگیری می شود. محیط هدف در فرایند استخراج گیاهی، خاک می باشد ولی آن فرایند می تواند مواد آلاینده موجود در رسوبات و لجن ها را نیز پاکسازی نماید.

#### • تثبیت گیاهی:

تثبیت گیاهی روشی جهت جمع آوری آلاینده ها به وسیله ریشه های گیاه از طریق رسوب آلاینده ها به کمک ترشحات ریشه است. در این روش ریشه با ترشح ترکیبات شیمیایی مختلف آلاینده ها را در خاک تثبیت کرده و قابلیت دسترسی آنها را کاهش می دهد. همچنین گیاهانی که در مکانهای آلوده رشد میکنند خاک را تثبیت می نمایند و با پوشش زمین منجر به کاهش فرسایش آبی و بادی و تماس مستقیم آلاینده ها با حیوانات می شوند.

#### • تصفیه ریشه ای:

تصفیه ریشه ای با جذب ماده آلاینده توسط ریشه و عدم انتقال آن به اندام هوایی صورت می گیرد. تصفیه ریشه ای استخراج مواد آلوده کننده به وسیله ریشه ها از آب های سطحی، پسماند های آبی یا آب های زیرزمینی از راه جذب یا رسوب روی ریشه ها یا جذب به داخل ریشه ها می باشد. تصفیه ریشه ای مواد آلاینده را به کمک ریشه از منطقه آلوده خارج می کند و در صورت لزوم به بخش بالای آب گیاه منتقل می شود. تصفیه ریشه ای می تواند برای پاکسازی مخازن آب های سطحی آلوده استفاده شود.

#### • تجزیه ریشه ای :

این فرایند با افزایش تجزیه زیستی مواد آلاینده در ناحیه ریشه و به وسیله میکروارگانیسم ها صورت می گیرد. تجزیه ریشه ای افزایش تجزیه زیستی طبیعی در خاک از راه تاثیر ریشه های گیاه است و منجر به تخریب یا سم زدایی مواد آلاینده آلی می شود. وجود ریشه گیاه اغلب حجم و تنوع جمعیت میکروبی خاک اطراف ریشه را افزایش می دهد. افزایش فعالیت و جمعیت میکروبی در محیط ریشه می تواند افزایش تجزیه زیستی مواد آلاینده خاک شود.

#### • تجزیه گیاهی:

تجزیه گیاهی با جذب ماده آلاینده و متابولیسم آن در ریشه، ساقه یا برگ های گیاه انجام می شود. یک فرایند تخریب مواد آلاینده است که شامل جذب، متابولیسم و تجزیه آلاینده های موجود در خاک، رسوبات، لجن ها، آب های زیرزمینی یا سطحی به وسیله آنزیم های تولیدی و رها شده از گیاه می باشد. در استفاده از تجزیه گیاهی، تغییر شکل یک ماده آلاینده در داخل گیاه به یک ماده سمی تر و سپس رهاسازی آن به اتمسفر از راه تعریق نامطلوب است.

#### ویژگی گیاهان مورد استفاده در گیاه پالایی:

اشکال مختلف گیاه پالایی نیاز به خصوصیات عمومی متفاوتی برای تاثیر مطلوب دارد. در تصفیه ریشه ای و تثبیت گیاهی، توانایی جذب فلزات، عدم انتقال فلزات از ریشه ها به اندام هوایی و رشد سریع ریشه ها نیز وجود دارد. برای استخراج گیاهی، گیاه باید غلظت بالای فلزات سمی در لندام های هوایی و برگ ها را تحمل کند و پس از انتقال، در خود جمع نماید. همچنین گیاه باید دارای رشد زیاد و توانایی تولید بایومس فراوان باشد. برای تجزیه ریشه ای، گیاه باید آنزیم های مناسب و مواد دیگری را که موجب افزایش تجزیه زیستی می شوند را از خود آزاد کند. همچنین باید دارای عمق مناسب، مقدار و حجم زیاد ریشه باشد. در فرایند تبخیر گیاهی نیاز به گیاهانی دارد که مواد آلاینده را جذب و بدون تولید ترکیبات سمی آن را متابولیزه نماید. گیاهان بی شماری در تحقیقات گیاه پالایی استفاده شده است. اما توجه بیشتر به گروه کوچکتري از این گیاهان وجود دارد که به دلیل پراکنش وسیع، قابلیت دسترسی آسان، رشد راحت و وجود دانش پایه ای زیاد در مورد این گیاهان می باشد. گیاهان خشکی به علت دارا بودن سیستم ریشه ای وسیع تر، موثرتر از گیاهان آبی می باشند. خردل هندی دارای بایومس نسبتا زیاد و رشد سریع بوده و توانایی جذب و انباشت فلزات و رادیونوکلیدها را دارد. گیاه آفتابگردان می تواند فلزات را در خود جمع کند و دارای بایومس یکسانی با خردل هندی می باشد.

#### ملاحظات کاربردی پاکسازی گیاهی :

- طبق تحقیقات صورت پذیرفته، وجود گیاهان در خاک به چندین صورت موجب تصفیه و پاکسازی آن می شود:
- بهبود خواص فیزیکی و شیمیایی خاک
- حذف فلزات سنگین، رادیواکتیو و برخی دیگر مواد آلاینده خاک نظیر ترکیبات معطر چندقدره ای
- تبدیل مواد سمی به مواد غیرسمی یا موادی با سمیت کمتر

- کاهش نفوذ عمودی مواد سمی در خاک با جذب آب های اضافی در سطح
- افزایش جمعیت میکروبی در خاک
- افزایش میزان هوادهی از راه های آزادسازی مستقیم اکسیژن و یا ایجاد مسیرهای عبور هوا کند و یا متوقف نمودن حرکت ترکیبات ارگانیک آبگریز
- انباشتگی فلزات در سطح خاک

عوامل موثر در پاکسازی گیاهی:

به منظور کسب موفقیت در گیاه پالایی آلاینده ها از خاک و دستیابی به بیشترین کاهش غلظت این ترکیبات از خاک، فاکتورهای زیست محیطی مختلفی حائز اهمیت می باشد. نوع خاک و مواد آلی و غیرآلی موجود در خاک، درصد رطوبت خاک نیز بر رشد گیاهی و فعالیت میکروبی گیاهان و اکسیژن مورد نیاز در تنفس هوای گیاهان موثر می باشد. درجه حرارت بر سرعت واکنش های انجام شده تاثیرگذار می باشد. همچنین سرعت و دامنه تخریب آلاینده ها به میزان دسترسی گیاهان به مواد مغذی بستگی دارد. در نهایت نور خورشید هم در تبدیل آلاینده های اولیه و سمی به آلاینده های با خواص و سمیت متفاوت، موثر می باشد.

مزایای پاکسازی گیاهی:

- باعث آشفتنی اکولوژی محل نمی شود .
- توانایی حذف همه آلاینده ها از جمله آلی و غیر آلی
- عملیات به وسیله نور آفتاب انجام می گیرد.
- سازگار با محیط زیست و هزینه مناسب

محدودیت های پاکسازی گیاهی:

- تکیه بر چرخه طبیعی جذب گیاهی است و زمانبر.
- به مساحت زیاد زمین نیازمند می باشد و تنها قادر به پاکسازی عمق های کم خاک.
- تمام انواع آلاینده ها با غلظت های مختلف توسط این پدیده قابل پاکسازی نیستند.
- وضعیت منطقه، آلاینده ها و گیاهان مناسب برای جذب آلاینده ها در همه ی مکان ها مشابه نمی باشند.
- درمان گیاهی هنگامی بهترین تاثیر را دارد که از طریق ریشه جذب شود، تقریباً ۹۰ تا ۱۵۰ سانتی متر برای گیاهان بوته ای نیاز می باشد.

مصرف تولیدات گیاه پالایی:

یکی از موانع اجرای تجاری سازی گیاه پالایی، چگونگی مصرف گیاهان آلوده است. پس از برداشت، آلودگی خاک توسط گیاهان کاهش یافته، اما مقدار زیادی بایومس خطرناک تولید شده است. بررسی ها نشان می دهد تولید کمپوست و متراکم کردن، دو روشی است که برای مدیریت بایومس گیاهان آلوده توسط بسیاری از محققان پیشنهاد شد، اما بهترین روش برای مصرف بایومس های

تولید شده توسط گیاه پالایی، تغییر و تبدیلات ترموشیمیایی است که در این روش بایومس به عنوان یک منبع انرژی مصرف تجاری دارد. این بایومس شامل کربن، هیدروژن و اکسیژن است که با عنوان هیدروکربن های اکسیژنه شناخته می شود. جز اصلی هربایومس لینگنین، همی سلولوز، سلولوز، مواد معدنی و خاکستر است که دارای مقادیر بالایی رطوبت، مواد آلی فرار و جرم مخصوص ظاهری هستند، اما ارزش گرمایی پایینی دارند. درصد این اجزا از گونه ای به گونه دیگر متفاوت است که مدیریت این حجم از مواد زائد بسیار مشکل بوده و نیاز به کاهش حجم دارد.

## ۹- الکتروکینتیک:

پاکسازی خاک به روش الکتروکینتیک به دلیل نتایج بسیار رضایتبخش و امیدوارکننده چه در مقیاس آزمایشگاهی و چه در مقیاس پایلوت، توجه بسیاری از محققان و دولت ها را در دهه گذشته به خود جلب کرده است. واژه الکتروکینتیک عبارت است از اعمال گرادیان در برابر فشار هیدرولیکی در خاک که باعث افزایش مهاجرت آب و سایر ترکیبات شیمیایی به سمت الکتروود جمع می شود. نخستین بار رئوس در سال ۱۸۰۸، پدیده الکتروکینتیک را هنگام اعمال جریان مستقیم در خاک رس مشاهده کرد. این فرآیند در سال ۱۹۷۰ در اتحاد جماهیر شوروی سابق برای تغلیظ فلزات معدنی در خاک های اعماق معدن استفاده شد، اما هنوز به عنوان یک روش تصفیه شناخته شده نبود. اولین کاربرد موفقیت آمیز آن احیای خاک در سال ۱۹۸۶ در کشور هلند بود از آن پس تاثیر این روش در موارد متعددی در رفع آلودگی از خاک ها بررسی شده است. فرآیند الکتروکینتیک عبارتست از ایجاد یک میدان الکتریکی در نمونه که با قراردادن ۲ رشته الکتروود درون نمونه (یک رشته آند و یک رشته کاتد) و عبور جریان مستقیم با شدت کم از آن ها، آلاینده ها طی مکانیسم های زیر به سمت الکتروودها حرکت می نمایند: هنگامیکه که حجم معینی از خاک جریان الکتریکی اعمال می شود. نیروی محرکی ایجاد می شود که باعث حرکت توده ای ذرات می شود و باعث شکل گیری مکانیسم های الکترواسمز، مهاجرت الکتریکی و الکتروفورز می شود. همه مکانیسم های ایجاد شده تحت تاثیر بار سطحی ذرات خاک و آرایش معدنی خاک می باشند.

۱- مهاجرت الکتروشیمیایی: انتقال انواع یون ها تحت تاثیر گرادیان الکتریکی

۲- الکترواسمز: انتقال آب میان حفره ای تحت تاثیر گرادیان الکتریکی

۳- الکتروفورز: حرکت کلئیدها و ذرات باردار تحت تاثیر گرادیان الکتریکی

۴- الکترولیز: واکنش های شیمیایی که در اطراف الکتروودها بر روی الکتروولیت ها انجام می شوند.

## ۱- الکترواسمز:

پدیده الکترواسمز، حرکت آب میان حفره ای در خاک تحت جریان الکتریکی می باشد. در اثر اعمال یک شیب الکتریکی در امتداد یک تودخه خاک، بارهای مثبت به سمت قطب منفی (کاتد) و بارهای منفی به سمت قطب مثبت (آند) جذب می شوند. تعدادی بار مثبت اضافی روی سطح باردار خاک وجود دارد. زمانی که این بارهای اضافی به سمت قطب منفی حرکت می کنند، آب در اثر نیروی اصطحاک با این ذرات به سمت قطب منفی حرکت می کند. چنین جریانی به طرف قطب مثبت نیز وجود دارد اما چون کوچکتر است عموماً جهت جریان آب به سمت کاتد می باشد و الکترواسمز نامیده می شود. در خاک های ریزدانه سرعت حرکت آب به میدان الکتریکی، مقاومت خاک در برابر جریان و اصطحاک یون ها و مولکول های آب بستگی دارد.

## ۲- مهاجرت الکتریکی:

پدیده مهاجرت الکتریکی به حرکت انواع یون ها در جریان منفذی در اثر اعمال میدان الکتریکی گفته می شود. یون های مثبت (کاتیون ها) به سمت کاتد و یون های منفی (آنیون ها) به سمت آنحرکت می کنند. به واسطه این مکانیسم یون ها در اطراف الکترود مخالف با بارشان متمرکز می شوند. مهاجرت الکتریکی کاتیون ها و آنیون ها به سمت الکترود مخالف خود، متناسب با غلظت یون ها در جریان آب منفذی و شدت جریان الکتریکی می باشد.

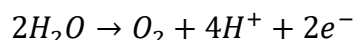
## ۳- الکتروفورز:

مکانیسم الکتروفورز شامل حرکت ذرات باردار و کلوییدها تحت جریان الکتریکی می باشد. با اعمال میدان الکتریکی به توده خاک حاوی ذرات کلوییدی، ذرات باردار که در جریان منفذی معلق هستند مانند یون ها به حرکت درآمده و به سمت قطب های مخالف بارشان حرکت می کنند. این پدیده الکتروفورز نام دارد. در پدیده الکتروفورز انتقال ذرات و در الکترواسمز انتقال آب در نظر گرفته می شود. به علت شباهت مکانیسم حرکت، در برخی موارد الکتروفورز به همراه مهاجرت یونی در یک مکانیسم کلی تحت عنوان مهاجرت ذرات باردار در نشر گرفته می شود.

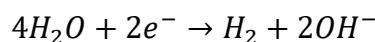
## ۴- الکترولیز:

الکترولیز واکنش شیمیایی است که اطراف الکترودها رخ می دهد. همانطور که بیان شد الکتروکینتیک فرآیندی است که طی آن بوسیله اعمال یک جریان مستقیم از میان توده خاک آلوده آن را احیا می کند. با برقراری میدان الکتریکی واکنش های (الف) در آند و (ب) در کاتد، طی عمل الکترولیز در الکترودها اتفاق می افتد:

( الف )



(ب)



فرآیند پاکسازی خاک با حرکت یون هیدروژن تولید شده در آند در خاک و خنثی سازی یون هیدروکسیل در کاتد صورت می گیرد. در بعضی از انواع خاک ها به خاطر خاصیت بافری بالا از حرکت یون هیدروژن در خاک جلوگیری می شود. وجود یون هیدروکسیل در کاتد سبب افزایش pH می شود. در pH بالا آلاینده ها رسوب می کنند و مانع از حرکت جریان منفذی می شوند. pH بالا و غلظت کم فلزات سنگین در کاتد باعث ایجاد ترکیباتی با بار منفی در کاتد می شود که حرکت این ترکیبات منفی به سمت آند و فلزات سنگین به سمت کاتد، متناسب با حرکت یون های هیدروژن و هیدروکسیل می باشد. به عبارت دیگر در ناحیه ای نزدیک به کاتد حرکت ترکیبات متوقف می شود و در همان ناحیه فلزات سنگین انباشته می شوند و در نهایت رسوب می کنند و تخلخل های خاک را مسدود می کنند و مانع از انجام فرآیند پاکسازی خاک می شوند. برای بالا بردن راندمان حذف آلاینده

ها، جلوگیری از رسوب آنها و نگهداشتن در فرم محلول در زمان انجام فرآیند ضروری است. در ادامه به کاربردهای الکتروکینتیک می پردازیم.

## ۱- کاربرد روش الکتروکینتیک در مطالعات ژئوتکنیکی

راس پدیده جریان آب از یک محیط متخلخل تحت یک شیب الکتریکی را شناسایی کرد. یون ها در مایع منفذی ۲ به سمت الکترودهای بار مخالف جذب شده و به همراه آن، آب احاطه کننده اطراف را نیز به طرف خود میکشد. ذرات رس حاوی بارهای منفی هستند که به وسیله یونهای مثبت در آب منفذی متعادل میگردند. بنابراین در یک خاک رسی، به کارگیری یک میدان الکتریکی منجر به یک جریان آب به همراه یونهای مثبت خالص آنها خواهد شد. این فرآیند الکترواسمز نامیده میشود که عبارت است از حرکت آب در حفرات خاک (یا یک محیط متخلخل) تحت تأثیر میدان الکتریکی به علت تشکیل لایه دوگانه الکتریکی بین سطح باردار ذرات و یون های محلول که طی آن آب از آند به کاتد حرکت میکند. این راهکار به عنوان یک روش آبزدایی بسیار مناسب برای خاک های باقابلیت نفوذپذیری کم است، درحالیکه استفاده از روش های هیدرودینامیکی مرسوم نیازمند دوره های زمانی بسیار طولانی است. این فرآیند برای انواع مختلف خاکها از خاکهای سیلتی حساس گرفته تا خاکهای رسی نرم و نیز خاکهای رسی خیلی حساس استفاده شده است.

## ۲- کاربرد روش های الکتروکینتیک در مسائل زیست محیطی

با توجه به اهمیت کنترل میزان غلظت آلاینده ها به ویژه فلزات سنگین در خاک، مسئله پالایش خاک از زوایای مختلف مورد بررسی قرار گرفته که بخش اعظم آن اختصاص به روشهای پالایش دارد. از روشهای مختلف که برای پالایش در جای خاکهای آلوده به جز روش الکتروکینتیک پیشنهاد شده است، می توان به فرآیندهای حرارتی، فیزیکی، شیمیایی و زیستی (بیولوژیک) اشاره کرد. روش های حرارتی برای از بین بردن آلاینده های آلی در خاک قابل استفاده بوده و مناسب می باشند. روش های فیزیکی مانند شستشوی خاک و عصاره گیری مکشی برای پالایش هر دو آلاینده های آلی و معدنی کاربرد دارند. روش های شیمیایی شامل اضافه کردن مواد شیمیایی و ترکیبات فعال کننده سطحی به خاک برای آزادسازی آلاینده ها از ذرات خاک می باشند که این مواد به همراه آلاینده ها میتوانند بعداً از خاک جدا گردند. روشهای زیستی میتوانند باعث نابودی و یا تغییر شکل آلایندهها در اثر فعالیت میکروبها در خاک شوند. در هر حال، بزرگترین محدودیت روشهای ذکر شده این است که برای استفاده در خاکهای بانفوذپذیری و هدایت هیدرولیکی کم مناسب نیستند و برخی از آنها نیز برای پالایش آلایندههای جذب شده بر سطح ذرات خاک کارآمد نمیباشند. سگال و همکاران جزء اولین پژوهشگرانی بودند که جداسازی مواد آلی و فلزات سنگین از خاک تحت تأثیر جریان الکتریکی را گزارش کردند از آن زمان به بعد استفاده از روش الکتروکینتیک با اهداف زیست محیطی افزایش یافته است.

مزایای فرآیند الکتروکینتیک :

- یک روش ساده با تجهیزات ساده و دوست دار محیط زیست
- انعطاف پذیری بالایی دارد و هم در محل و هم در خارج از محل قابل اجراست
- برای همه انواع آلاینده ها از جمله فلزات سنگین، مواد آلی فرار یا شبه فرار و مواد رادیواکتیو

معایب فرآیند الکتروکینتیک:

- به حلالیت و اجزایی آلاینده ها در شبکه خاک حساس است.
- هنگامیکه غلظت یون های غیرهدف بیشتر از یون های هدف باشد فرآیند موثر نمی باشد.

- شرایط اسیدی و تجزیه الترولیک می تواند باعث خوردگی آن شود.

ران بی و همکاران در سال ۲۰۱۷ به بررسی اثر میدان الکتریکی متناوب و مستقیم بر گیاه پالایی فلزات سنگین خاک به وسیله گیاه راپسید و تنباکو پرداختند. در این پژوهش نوع خاک مورد استفاده قرار گرفت: خاکهای غیر آلوده از منطقه جنگلی، خاکی که به طور مصنوعی به ۷۵ میلیگرم بر کیلوگرم کادمیوم آلوده شد و خاک های آلوده به سرب، کادمیوم و روی برداشت شده از یک منطقه صنعتی. واکنش گیاهان تحت تأثیر میدان متناوب متفاوت بود. بیوماس راپسید تحت میدان متناوب افزایش یافت و هیچ اثر منفی تحت میدان مستقیم پیدا نکرد، با این حال هیچ افزایشی در بیوماس تنباکو تحت تیمار متناوب پیدا نشد. میدان مستقیم یک اثر منفی روی بیوماس گیاه تنباکو داشت. مقدار کادمیوم جذب شده در دو گونه رشد کرده با میدان متناوب در مقایسه با نمونه شاهد بالا بود. جذب فلزات، سنگین توسط گیاه راپسید تحت تأثیر میدان متناوب در خاک افزایش یافت.

اکانر و همکاران در سال ۲۰۱۱ روش تلفیقی الکتروکینتیک گیاهپالایی را برای پالایش خاکهای آلوده به کادمیوم و مس استفاده کردند. نتایج آنها حاکی از کاهش رشد گیاه چاودار چندساله ۱ در آند به علت کاهش شدید pH بود. با این وجود جذب مس به وسیله گیاه در کاتد نسبت به آند افزایش یافت، درحالیکه این موضوع برای کادمیوم برعکس بود باوجود غلظت کمتر کادمیوم در آند (که علت آن سمیت کمتر کادمیوم برای گیاه در آند بود. نتایج تحقیقات آنها نشان داد که درمجموع روش الکتروکینتیک تأثیر منفی معنی دار بر رشد گیاه ندارد. کاهش رشد گیاه بدون مشاهده اثرات ظاهری سمیت نتیجه اسیدی شدن و حرکت برخی کاتیون ها مانند کلسیم است که برای گیاه ارزش غذایی دارند.

#### بحث و نتیجه گیری :

با توجه به مطالعات انجام شده در این تحقیق، روش گیاه پالایی برای کاهش یا حذف آلودگی های منابع آب و خاک روشی مناسب به شمار می آید. نتایج بدست آمده نشان می دهد که یکی از روش های افزایش بازده در این روش بالا بردن میزان تعرق گیاه می باشد. مطالعات متعددی در زمینه کمیت آلاینده ها انجام شد. غلظت آلاینده اثری معنی داری بر درصد جوانه زنی بذر گیاهان نشان داده است، به این ترتیب که با افزایش غلظت آلاینده درصد جوانه زنی کاهش می یابد، با افزایش غلظت علاوه بر اثرات شدیدتر ماده آلاینده بر گیاه از لحاظ ایجاد محدودیت های زیستی و کاهش رلندمان گیاه پالایی، زمان تجزیه این ترکیبات در خاک طولانی تر می شود و همین مسئله در طول محدود آزمایش، باعث ایجاد اختلاف و کاهش درصد حذف می شود. براساس نتایج حاصله می توان این گونه نتیجه گرفت که نوع گیاه می تواند بر چگونگی رابطه بین غلظت آلاینده و درصد حذف آن تأثیر گذار باشد، به عبارت دیگر خصوصیات منحصر به فرد گیاهان تأثیر غلظت آلاینده را بر درصد حذف آن توسط گیاهان تحت تأثیر قرار می دهد. نتایج بدست آمده نشان می دهد که در خاک هایی که غلظت کایتون ها در آنها کم باشد، جریان الکترواسمز به عنوان مکانیزم غالب در فرایند رفع آلودگی می باشد. حجم جریان الکترواسمز به نوع کانی بستگی داشته با افزایش غلظت یونی خاک، کاهش می یابد. همچنین با افزایش ظرفیت جذب کانی بازدهی نیز کاهش می یابد. در مقابل، در خاکهایی که غلظت کاتیون ها زیاد است، جریان الکترواسمز سرعت بسیار کمتری داشته و مکانیزم غالب در رفع آلودگی، واکنش های الکتروشیمی و مهاجرت یونی می باشد. نتایج برخی از تحقیقات نشان داده شده است که با وجود جریان الکترواسمز، حرکت مواد نفتی در خاک کم می باشد. علت آن غیر قطبی بودن و حلالیت پایین هیدروکربن های نفتی در آب می باشد. در ضمن چون این مواد به شدت جذب خاک می شوند، بازدهی پایین می آید و برای افزایش بازدهی می توان از شوینده های زیستی و غیر زیستی در خاک استفاده کرد. افزایش متانول به خاک بازدهی را به مقدار جزئی افزایش می دهد. افزایش مواد مغذی حاوی نیترات نیز بر رلندمان حذف مواد نفتی مؤثر بوده و می تولند سبب افزایش حذف این ماده در مجاورت کاتد به میزان ۵ درصد گردد. به طور خلاصه براساس مطالعات مختلف انجام شده در زمینه گیاه

پالایی و الکتروکینتیک می توان نتیجه گرفت روش الکتروکینتیک با استفاده از فرآیندهای الکترواسمز و مهاجرت یونی قادر است به خوبی و در مدت زمانی کوتاه آلاینده ها را از خاک های با نفوذپذیری پایین حذف کند و همچنین فرآیند گیاه پالایی نیز در شرایطی خاص در صورت پایین بودن غلظت آلاینده راندمان مناسبی خواهد داشت. همچنین گیاهان با داشتن ریشه فیبری گسترده، موجب ایجاد محیط مناسب و افزایش تجزیه آلاینده های نفتی می شود و نیاز به هزینه کمتری دارد ولی در عوض نیاز به زمان طولانی تری دارد و در مقابل، فرآیند الکتروکینتیک در حذف هیدروکربن های نفتی در کوتاه مدت، روش موثری نشان داده است. با توجه به توانمندی های موجود در هر یک از روش های بیان شده می توان نتیجه گرفت که با ترکیب روش الکتروکینتیک با استفاده از شوینده ها و روش گیاه پالایی به صورت هیبریدی، می توان به درصد حذف مناسبی از آلاینده ها دست یافت و محدودیت هر یک از روش ها را کاهش داد.

#### منابع:

- [1] Sanchez, Virtudes, Francisco Javier López-Bellido, Manuel A. Rodrigo, Francisco Jesús Fernández, and Luis Rodriguez. "A mesocosm study of electrokinetic-assisted phytoremediation of atrazine-polluted soils." *Separation and Purification Technology* 233 (2020): 116044.
- [2] Sánchez, Virtudes, Francisco Javier López-Bellido, Pablo Cañizares, José Villaseñor, and Luis Rodríguez. "Scaling up the electrokinetic-assisted phytoremediation of atrazine-polluted soils using reversal of electrode polarity: A mesocosm study." *Journal of environmental management* 255 (2020): 109806.
- [3] Awa, Soo Hui, and Tony Hadibarata. "Removal of Heavy Metals in Contaminated Soil by Phytoremediation Mechanism: a Review." *Water, Air, & Soil Pollution* 231, no. 2 (2020): 47.
- [4] Cameselle, Claudio, and Susana Gouveia. "Phytoremediation of mixed contaminated soil enhanced with electric current." *Journal of hazardous materials* 361 (2019): 95-102.
- [5] Sánchez, Virtudes, Javier López-Bellido, Manuel A. Rodrigo, and Luis Rodríguez. "Enhancing the removal of atrazine from soils by electrokinetic-assisted phytoremediation using ryegrass (*Lolium perenne* L.)." *Chemosphere* 232 (2019): 204-212.
- [6] Sánchez, Virtudes, Francisco Javier López-Bellido, Pablo Cañizares, and Luis Rodríguez. "Can electrochemistry enhance the removal of organic pollutants by phytoremediation." *Journal of environmental management* 225 (2018): 280-287.
- [7] Acosta-Santoyo, Gustavo, Claudio Cameselle, and Erika Bustos. "Electrokinetic-enhanced ryegrass cultures in soils polluted with organic and inorganic compounds." *Environmental research* 158 (2017): 118-125.
- [8] Cameselle, Claudio, Reshma A. Chirakkara, and Krishna R. Reddy. "Electrokinetic-enhanced phytoremediation of soils: status and opportunities." *Chemosphere* 93, no. 4 (2013): 626-636.
- [9] Cang, Long, Dong-Mei Zhou, Quan-Ying Wang, and Guang-Ping Fan. "Impact of electrokinetic-assisted phytoremediation of heavy metal contaminated soil on its physicochemical properties, enzymatic and microbial activities." *Electrochimica acta* 86 (2012): 41-48.

[10] فدایی، عبدالمجید، دهقانی، محمدهادی، ۱۳۸۹. "بررسی روش های عملی اصلاح ترکیبات هیدروکربن های چند حلقه ای در خاک های آلوده محیط زیست.

- [11] Lebkowska, María, Ewa Zborowska, Ewa Karwowska, Ewa Miaśkiewicz-Pęska, Adam Muszyński, Agnieszka Tabernacka, Jeremi Naumczyk, and Maciej Jęczalik. "Bioremediation of soil polluted with fuels by sequential multiple injection of native microorganisms: Field-scale processes in Poland." *Ecological Engineering* 37, no. 11 (2011): 1895-1900.
- [12] Khodadadi, A., D. Yousefi, H. Ganjidoust, and M. Yari. "Bioremediation of diesel-contaminated soil using *Bacillus* sp.(strain TMY-2) in soil by uniform and non-uniform electro kinetic technology field." *J Toxic Environ Health Sci* (2011).
- [13] Shenbagavalli, S., and S. Mahimairaja. "Electro kinetic remediation of contaminated habitats." *African Journal of Environmental Science and Technology* 4, no. 13 (2010): 930-935.
- [14] Jeon, Chil-Sung, Jung-Seok Yang, Kyung-Jo Kim, and Kitae Baek. "Electrokinetic removal of petroleum hydrocarbon from residual clayey soil following a washing process." *CLEAN–Soil, Air, Water* 38, no. 2 (2010): 189-193.
- [15] Reddy, Krishna R., and Claudio Cameselle. *Electrochemical remediation technologies for polluted soils, sediments and groundwater*. John Wiley & Sons, 2009.
- [16] Lynch, R. J., Aldo Muntoni, R. Ruggeri, and K. C. Winfield. "Preliminary tests of an electrokinetic barrier to prevent heavy metal pollution of soils." *Electrochimica Acta* 52, no. 10 (2007): 3432-3440.
- [17] Virkutyte, Jurate, and Mika Sillanpää. "The hindering effect of experimental strategies on advancement of alkaline front and electroosmotic flow during electrokinetic lake sediment treatment." *Journal of hazardous materials* 143, no. 3 (2007): 673-681.
- [18] Minai-Tehrani, Dariush, Ali Herfatmanesh, Forood Azari-Dehkordi, and S. Minuoi. "Effect of salinity on biodegradation of aliphatic fractions of crude oil in soil." *Pak J Biol Sci* 9, no. 8 (2006): 1531-5.
- [19] Kim, Soo-Sam, Jung-Hwan Kim, and Sang-Jae Han. "Application of the electrokinetic-Fenton process for the remediation of kaolinite contaminated with phenanthrene." *Journal of hazardous materials* 118, no. 1-3 (2005): 121-131.
- [20] Saichek, Richard E., and Krishna R. Reddy. "Electrokinetically enhanced remediation of hydrophobic organic compounds in soils: a review." *Critical reviews in environmental science and technology* 35, no. 2 (2005): 115-192.
- [21] Wei, Shuhe, and Qixing Zhou. "Discussion on basic principles and strengthening measures for phytoremediation of soils contaminated by heavy metals." *Chinese Journal of Ecology* 23, no. 1 (2004): 65-72.
- [22] Barker, J. E., C. D. F. Rogers, D. I. Boardman, and J. Peterson. "Electrokinetic stabilisation: an overview and case study." *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement* 8, no. 2 (2004): 47-58.
- [23] Johnson, D. L., K. L. Maguire, D. R. Anderson, and S. P. McGrath. "Enhanced dissipation of chrysene in planted soil: the impact of a rhizobial inoculum." *Soil biology and biochemistry* 36, no. 1 (2004): 33-38.
- [24] O'connor, C. Sidoli, N. W. Lepp, R. Edwards, and G. Sunderland. "The combined use of electrokinetic remediation and phytoremediation to decontaminate metal-polluted soils: a laboratory-scale feasibility study." *Environmental monitoring and assessment* 84, no. 1-2 (2003): 141-158.
- [25] Poschenrieder, Charlotte, and Joan Barceló i Coll. "Phytoremediation: principles and perspectives." *Contributions to science* (2003): 333-344.

- [26] Kuyukina, Maria S., Irena B. Ivshina, Marina I. Ritchkova, James C. Philp, Colin J. Cunningham, and Nick Christofi. "Bioremediation of crude oil-contaminated soil using slurry-phase biological treatment and land farming techniques." *Soil and sediment contamination* 12, no. 1 (2003): 85-99.
- [27] Fabbri, Daniele, Ivano Vassura, Cheng-Gong Sun, Colin E. Snape, Carole McRae, and Anthony E. Fallick. "Source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons in a coastal lagoon by molecular and isotopic characterisation." *Marine chemistry* 84, no. 1-2 (2003): 123-135.
- [28] Virkutyte, Jurate, Mika Sillanpää, and Petri Latostenmaa. "Electrokinetic soil remediation—critical overview." *Science of the Total Environment* 289, no. 1-3 (2002): 97-121.
- [29] Boopathy, R. "Factors limiting bioremediation technologies." *Bioresource technology* 74, no. 1 (2000): 63-67.
- [30] Siciliano, Steven D., and Charles W. Greer. "Plant-bacterial combinations to phytoremediate soil contaminated with high concentrations of 2, 4, 6-trinitrotoluene." *Journal of environmental quality* 29, no. 1 (2000): 311-316.
- [31] EPA, EPA. A Citizen's Guide to Phytoremediation. EPA 542-F-98-011. Technology Innology office, Office of Solid Waste and Emergency Response, Washington, DC: <http://clu-in.org/products/citguide/photo2.htm>, 1998.
- [32] Awata, Hiroshi, Stephanie Bates, David Knaub, and R. Popelka. "Polynuclear aromatic hydrocarbons: Properties and environmental fate." *Environmental Engineering Chemistry II: Environmental Organic chemistry*. <http://www.ces.clemson.edu/ees/lee/pahs.htm> (1998).
- [33] Cunningham, S. D., J. R. Shann, David E. Crowley, and Todd A. Anderson. "Phytoremediation of contaminated water and soil." 1997.
- [34] Dzenitis, John M. "Soil chemistry effects and flow prediction in electroremediation of soil." *Environmental science & technology* 31, no. 4 (1997): 1191-1197.
- [35] Adler, Tina. "Botanical cleanup crews." *Science News* (Washington, DC) 150, no. 3 (1996): 42-43.
- [36] Günther, Thomas, Utz Dornberger, and Wolfgang Fritsche. "Effects of ryegrass on biodegradation of hydrocarbons in soil." *Chemosphere* 33, no. 2 (1996): 203-215.
- [37] Mumtaz, M., and J. George. "Toxicological profile for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs)." US Department of Human and Health Services. Agency for Toxic Substances and Disease Registry, Atlanta, GA (1995).
- [38] Acar, Yalcin B., Robert J. Gale, Akram N. Alshawabkeh, Robert E. Marks, Susheel Puppala, Mark Bricka, and Randy Parker. "Electrokinetic remediation: basics and technology status." *Journal of hazardous materials* 40, no. 2 (1995): 117-137.