دوماهنامه طبّ جنوب
پژوهشکده زیست- پزشکی خلیج فارس
دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی درمانی بوشهر
سال هجدهم، شماره ۳، صفحه ۵۲۶ - ۵۱۶ (مرداد و شهریور ۱۳۹۴)

ISMJ 2015; 18(3): 516-526

حذف پایرن از خاک آلوده با استفاده از فرآیند الکتروکینتیک در تلفیق با سورفکتانت

سید عنایت هاشمی [۱]، عباس رضایی [۲*]، سید محمد موسوی [۳]، محمدرضا نیکودل [۴]، حسین گنجی‌دوست [۵]

[۱] گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی درمانی بوشهر
[۲] گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده علوم پزشکی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
[۳] گروه بیوتکنولوژی، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
[۴] گروه مهندسی زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
[۵] گروه مهندسی محیط، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

(دریافت مقاله: ۹۲/۱۰/۲۴- پذیرش مقاله: ۹۳/۱/۱۶)

چکیده

زمینه: پایرن، یکی از هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه‌ای بسیار پایدار می‌باشد و به‌واسطه توزیع گسترده در محیط و داشتن خواص سرطان‌زایی و جهش‌زایی، از مهم‌ترین ترکیبات آلاینده این گروه به‌شمار می‌رود. از میان روش‌های مختلف تصفیه‌ای، روش الکتروکینتیک یک گزینه دوستدار محیط زیست برای آلاینده‌های آلی و معدنی جذب شده به خاک‌های بسیار دانه ریز نظیر خاک‌های رسی و خاک‌های با هدایت الکتریکی پایین مطرح می‌باشد. هدف از این تحقیق، افزایش راندمان تصفیه پایرن از خاک، با استفاده از سورفاکتانت‌های انیونی (سدیم دودسیل سولفات) و سورفاکتانت غیر یونی (تریتون ایکس صد)جهت انحلال و واجذب بیشتر آن از خاک می‌باشد.

مواد و روش‌ها: در این تحقیق، خاک رس به‌علت دارا بودن خواص ویژه به‌عنوان خاک مدل انتخاب شد. روش تلفیقی استفاده از سورفکتانت و فرآیند الکتروکینتیک جهت حذف پایرن از خاک استفاده گردید. آزمایشات با استفاده از روش سطح پاسخ (RSM) طراحی و انجام شد و اثرات سه متغیر غلظت سورفاکتانت، ولتاژ و نوع سورفاکتانت در حذف پایرن از خاک آلوده مورد ارزیابی قرار گرفت.

یافته‌ها: بیشترین راندمان حذف پایرن با استفاده از سورفاکتانت به‌عنوان عامل انحلال دهنده پایرن، با استفاده از سورفاکتانت مخلوط حاصل گردید. در حالت بهینه با ضریب اطمینان ۹۵ درصد، با استفاده از مخلوط سورفاکتانت آنیونی سدیم دودسیل سولفات و غیر یونی تریتون ایکس صد با نسبت حجمی یکسان و با ولتاژ ۱۸/۵۴ ولت و غلظت سورفاکتانت ۶/۵۳ درصد، راندمان حذف پایرن مقدار ۹۴/۶ درصد از خاک آلوده تعیین گردید.

نتیجه‌گیری: نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که فرآیند الکتروکینتیک در تلفیق با مخلوط سورفاکتانت‌ها به‌عنوان عامل انحلال یا متحرک‌سازی پایرن از خاک آلوده، می‌تواند به‌عنوان روش کارآمد و قابل اجرا در تصفیه خاک‌های آلوده استفاده گردد.

واژگان کلیدی: پایرن، خاک آلوده، فرآیند الکتروکینتیک، سورفاکتانت

* تهران، گروه بهداشت محیط، دانشکده علوم پزشکی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

E-mail:abbasrezaee@yahoo.com; rezaee@modares.ac.ir

[Downloaded from ismj.bpums.ac.ir on 2026-09-06]

مقدمه

متعاقب افزایش جمعیت، صنعتی شدن و ایجاد تکنولوژی‌های مدرن، مقادیر بسیار زیادی از آلاینده‌های معدنی و آلی به محیط زیست وارد شده و در مواردی باعث آلودگی گسترده خاک‌ها گردیده‌اند (۱).

آلودگی خاک به مواد آلی به‌عنوان یک مشکل جدی و تهدیدی برای بهداشت عمومی، سلامت انسان، منابع آب و زنجیره غذایی محسوب می‌گردد (۲).

سازمان حفاظت محیط زیست ایالات متحده آمریکا از میان تعداد بی‌شمار آلاینده‌های آلی معرفی شده، هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه‌ای را با توجه به تناوب رخداد آلودگی در خاک‌ها، بسیار مهم تلقی نموده است (۳). از نظر ساختاری، هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه‌ای (چند هسته‌ای)، ترکیبات شیمیایی هستند که از دو یا چند حلقه آروماتیک به شکل خطی یا خوشه‌ای تشکیل شده‌اند. در برخی از ترکیبات، اتم‌های نیتروژن، گوگرد و اکسیژن جهت تشکیل ترکیبات آروماتیک هتروسیکلیک در حلقه بنزنی جایگزین شده‌اند (۴). منابع اصلی آلودگی‌های محیط زیست با ترکیبات آروماتیک چند حلقه‌ای، منابع طبیعی و مصنوعی می‌باشد. مواردی نظیر احتراق ناقص سوخت‌های فسیلی، وسایط نقلیه و آتش سوزی جنگل‌ها، انفجارهای آتش‌فشانی، سوخت چوب در منازل و غیره از جمله علل وارد شدن این ترکیبات به محیط زیست است (۵). به واسطه سمیت این ترکیبات و ایجاد اثرات سرطان‌زایی، موتاژنیک و تراتوژنیک برای موجودات آبزی و انسان، سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا این گروه از آلاینده‌های را در دسته آلاینده‌های دارای اولویت (POPs)[1] قرار داده است. ویژگی‌های فیزیکو شیمیایی این ترکیبات به‌ویژه وزن مولکولی بالای آن‌ها باعث شده که این ترکیبات دیر تجزیه باشند و احتمالاً در محیط‌های مختلف به‌ویژه در خاک‌ها تجمع یابند (۶). با افزایش وزن مولکولی هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه‌ای، خواص آبگریزی یا چربی دوستی آن‌ها افزایش، قابلیت انحلال در آب و فشار بخار آن‌ها کاهش و ترکیب از نظر ساختاری مقاوم‌تر از نظر تجزیه طبیعی می‌گردد (۷).

غلظت هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه‌ای در خاک‌ها بر اساس ویژگی‌های جغرافیایی و وسعت محیط مورد مطالعه متفاوت است ولی اغلب در دامنه ۱۰۰۰-۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک خشک قرار می‌گیرد (۸).

یکی از هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه‌ای بسیار پایدار، پایرن می‌باشد که در متون به‌عنوان ردیاب فعالیت وسایط نقلیه همچنین به‌عنوان ردیاب در موتورهای دیزلی در نظر گرفته می‌شود (۹). در این مطالعه پایرن به‌واسطه توزیع گسترده در محیط و داشتن خواص سرطان‌زایی و جهش‌زایی، به‌عنوان آلاینده مدل استفاده شد (۱۰). فرآیند الکتروکینتیک روشی است که با استفاده از جریان برق مستقیم با گرادیان ولتاژ پایین در خاک آلوده، از طریق متحرک کردن آلاینده و یا تجزیه آن در خاک‌ها، آلاینده‌ها را حذف می‌نماید. این روش برای هر دو گروه آلاینده‌های آلی و معدنی قابل کاربرد است (۱۱). مشخص گردیده است که فرآیندهای الکتروکینتیکی دارای پتانسیل پالایش خاک‌های آلوده با نفوذپذیری پایین و یا خاک‌های هتروژن آلوده شده به آلاینده‌های آلی و فلزات سنگین می‌باشد. فرآیند الکتروکینتیک یک گزینه دوستدار محیط زیست برای مکان‌های آلوده به آلاینده‌های آلی و معدنی جذب شده به خاک‌های بسیار دانه ریز نظیر خاک‌های رسی و خاک‌های با

[1] Priority Organic Pollutants (POPs)

[Downloaded from ismj.bpums.ac.ir on 2026-09-06]

هدایت الکتریکی پایین است. مکانیسم‌های انتقال آلاینده در این فرآیند شامل: حرکت توده آب (الکترواسموزیس)، حرکت یون‌ها (الکترومیگریشن) و حرکت مواد کلوئیدی (الکتروفورسیس یا کاتاروفورسیس) می‌باشد (۱۲). یکی از شاخص‌های اساسی جهت افزایش کارایی حذف هیدروکربن‌های آروماتیک چند هسته‌ای، انحلال آن‌ها با استفاده از عواملی نظیر سورفاکتانت‌ها است. اضافه نمودن این عوامل انحلال باعث تغییرات خواص مایع نظیر ثابت دی الکتریک، pH، ویسکوزیته مایع و همچنین ویژگی‌های سطحی ذرات خاک می‌گردد. سورفاکتانت‌ها، انحلال حاصل نفوذ آلاینده را به درون هسته آبگریز میسل‌های سورفاکتانت افزایش می‌دهند. با افزایش تعداد میسل‌ها در محلول، انحلال پایرن را افزایش می‌یابد. بنابراین غلظت بالاتر از غلظت بحرانی میسل ضرورتاً برای افزایش انحلال قابل توجه می‌باشد (۱۳).

بر اساس مطالعه انجام شده توسط آلکانترا (Alcantra) و همکاران، تجزیه کل هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه در ولتاژ جریان بالا می‌تواند افزایش مطلوبی را داشته باشد. با وجود این مصرف انرژی در طی فرآیند الکتروکینتیکی افزایش زیادی داشته است. به همین دلیل ولتاژ جریان به‌عنوان یک متغیر کلیدی محسوب می‌شود (۱۴ و ۱۶). نتایج حاصل از این تحقیق نیز این موضوع را تأئید می‌نماید. بر مبنای گزارشات ارائه شده، امروزه کاربرد مخلوط سورفاکتانت‌ها بر کاربرد تنهای آن‌ها در عمل ارجح‌تر است. بر اساس مطالعه انجام شده توسط مازن (MAZEN) و همکاران نشان داده شد که تمایل به جذب سطحی مخلوط سورفاکتانت‌های TX۱۰۰ و SDS به خاک‌های رسی، سنگ و ماسه بسیار کمتر از استفاده از هر کدام به تنهایی می‌باشد. این کاهش در جذب سطحی سورفاکتانت به غلظت‌های بحرانی میسل پایین‌تر نسبت داده می‌شود (۱۵).

لذا هدف از انجام این تحقیق ارزیابی تأثیر سورفاکتانت در میزان حذف پایرن توسط فرآیند الکتروکیننیک می‌باشد.

مواد و روش‌ها

سل الکتروشیمیایی مورد استفاده از جنس پلکسی گلاس با حجم ۵۰۰ سانتی‌متر مکعب و اندازه (۵*۱۰*۱۰)سانتی‌متر بوده و الکترودها نیز از جنس استیل و دارای سطح مؤثر ۳۲ سانتی‌متر مربع و سطح کل ۴۸ سانتی‌متر مربع می‌باشد.

– مواد شیمیائی مورد استفاده عبارتند از:

پایرن با درجه خلوص بیشتر از ۹۶ درصد، استون و ان –هگزان MERCK جهت استخراج، استون و ان–هگزان MERCK جهت آلوده‌سازی خاک رسی–سیلتی و همچنین استخراج پایرن از خاک در پایان فرآیند الکتروکینتیک، سدیم دودسیل سولفات MERCK، تریتون ایکس صد MERCK (TX–۱۰۰)، کلرور کلسیم دو آبه (CaCl2.2H2o).

– به منظور آنالیز آماری داده‌ها از آنالیز تحلیل واریانس (ANOVA)[2] و با استفاده از روش RSM[3] استفاده گردید و نتایج به‌کمک نرم‌افزار Design– Expert ویرایش ۷ مورد ارزیابی قرار گرفت.

آنالیز بافت خاک

پس از تهیه خاک از منطقه رباط کریم در جنوب غرب تهران و در محدوده کوره‌های آجرپزی، خواص فیزیکوشیمیایی آن بر اساس روش‌های ASTM در

[2] Analysis Of Variance
[3] Respond Surface Methodology(RSM)

[Downloaded from ismj.bpums.ac.ir on 2026-09-06]

آزمایشگاه تعیین گردید. بر اساس طبقه‌بندی USCS[4] و روش ASTM-2488 خاک مورد نظر در رده خاک‌های رسی – سیلتی (CL-ML) قرار گرفت. این نوع خاک دارای ظرفیت تعویض کاتیونی پایین و خواص معدنی یکنواخت و پایدار و ظرفیت بافری پایین می‌باشد، از طرفی این نوع خاک نسبتاً خنثی می‌باشد از این رو در این تحقیق به‌عنوان خاک مدل انتخاب گردید. خواص و ترکیب این خاک در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱) ویژگی‌های خاک مورد استفاده

شاخص	روش اندازه‌گیری	مقدار
وزن مخصوص نسبی	ASTM-D854	۲/۶۴
دانسیته توده خشک (g/cm^3)	ASTM-D854	۱/۵۳
رطوبت (٪)	ASTM-D854	۴
کل ماده آلی(٪)	ASTM-D2974	<۰/۵
هدایت هیدرولیکی (m/s)	ASTM-D2434	۴/۷×10^{-5}
تخلخل (٪)	ASTM	۲۳
pH	ASTM-D2974	۷/۹-۸/۱

آماده سازی نمونه‌های خاک

بر اساس نمونه شاهد استخراج شده، خاک مورد استفاده در این تحقیق فاقد پایرن بوده و میزان اولیه مواد آلی آن در حد کمتر از ۰/۵ درصد می‌باشدکه با استفاده از روش استاندارد ASTM-D2974 مورد سنجش قرار گرفت. قبل از آلوده کردن خاک مورد استفاده در تحقیق، به منظور شستشو و حذف این مقدار ماده آلی با استفاده از مخلوط ان- هگزان و استون با نسبت حجمی برابر شسته شده و به‌مدت یک هفته زیر هود تهویه قرار گرفته تا کاملاً خشک گردید. غلظت پایرن مورد استفاده در این تحقیق ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر حلال (۳۷/۷۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک خشک) بود. قبل از اضافه نمودن پایرن به خاک، آن را در ۱۰۰۰ میلی‌لیتر از مخلوط استون و ان- هگزان (۱:۱) حل نموده و به ۱کیلوگرم خاک اضافه گردید. مخلوط خاک آلوده به پایرن را در یک بطری به‌مدت ۳۰ دقیقه چرخانده تا به‌طور کامل هموژن و یکنواخت گردد. متناسب با میزان خاک مورد نیاز در هر دوره آزمایش، این مرحله چندین بار تکرار گردید. سپس مخلوط حاصل به‌مدت یک هفته زیر هود شیمیائی قرار گرفت و هر روز به هم زده شد تا هگزان–استون به‌طور کامل تبخیر و خاک آلوده به پایرن خشک گردد. یک نمونه از خاک آلوده به پایرن جهت آنالیز اولیه اخذ گردید و مطابق با روش‌های استاندارد پیشنهادی با استفاده از دستگاه گاز کروماتوگرافی (GC) (AGILENT، ۶۸۹۰ N) سنجش گردید.

طراحی آزمایش با استفاده از روش سطح - پاسخ

به‌منظور بررسی اثر متغیرهای غلظت سورفاکتانت، ولتاژ و نوع سورفاکتانت، از روش RSM استفاده گردید و نتایج به‌کمک نرم‌افزار Design – Expert ویرایش ۷ مورد ارزیابی قرار گرفت. روش سطح پاسخ مجموعه‌ای از روش‌های آماری و ریاضیاتی جهت مدل‌سازی و تحلیل مسائلی است که پاسخ مورد نظر تابعی از چندین متغیر است. هدف از به‌کارگیری این روش بهینه نمودن پاسخ است. اولین گام، یافتن یک تابع تقریبی مناسب بین پاسخ و مجموعه متغیرهای مستقل است. این تابع تقریبی معمولاً یک چند جمله‌ای از متغیرهای مستقل است (۱۴). به‌منظور تخمین عوامل در چند جمله‌ای‌های تقریبی از روش کمترین مربعات (Least Square) استفاده می‌شود.

(معادله ۱)

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^{k}\beta_1 x_1 + \sum_{i=1}^{k}\beta_{ii}{x_i}^2 + \sum_{i=1}^{k}\sum_{i=1}^{k}+\beta_{ij}x_i x_j + \varepsilon$$

که در این معادله y مقدار پاسخ، βiها ضرایب رگرسیون و ε مقدار خطا را نشان می‌دهد. طراحی

[4] Unified Soil Classification System (USCS)

[Downloaded from ismj.bpums.ac.ir on 2026-09-06]

مرکب مرکزی (CCD)[5] مشهورترین نوع طراحی استفاده شده برای پردازش این مدل است. CCD شامل 2k فاکتوریل (یا کسری از فاکتوریل)، 2k آزمایش محوری و nc آزمایش مرکزی است (۱۴) .

آزمایشات بر مبنای سه متغیر اصلی مورد نظر شامل: غلظت سورفاکتانت در محدوده ۳ تا ۷ درصد، ولتاژ در محدوده غلظت ۱۰ تا ۲۰ ولت و سه نوع سورفاکتانت شامل سدیم دودسیل سولفات (SDS)[6]، تریتون ایکس صد (TX۱۰۰)[7] و مخلوط این دو با نسبت یک به یک (SDS:TX۱۰۰) به‌عنوان متغیر کیفی صورت گرفت.

لازم به ذکر است که بر اساس دستورالعمل MSDS[8]، این سورفاکتانت‌ها فاقد اثر سرطان‌زایی و جهش‌زایی برای انسان بوده و فقط باعث ایجاد حساسیت‌های پوستی، چشمی و تنفسی می‌شود. از طرفی با توجه به مصرف اندک آن‌ها و اکسیداسیون شیمیایی آن‌ها در فرایند الکتروکینتیک، اثر مضری روی سلامتی انسان و برای محیط زیست ندارند. سایر شرایط آزمایش عبارت بود از: غلظت اولیه پایرن ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر حلال معادل ۳۷/۶۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک خشک، رطوبت ۳۰ درصد، نوع الکترود استیل، فاصله بین الکترودها ۱ سانتی‌متر، سطح الکترودها ۴۸سانتی‌متر مربع، ابعاد ظرف پایلوت ۵×۱۰×۱۰ سانتی‌متر بود. در طراحی آزمایشات، هرکدام از متغیرهای کمی مورد نظر در ۵ سطح کدگذاری گردیدند. متغیرهای کمی شامل غلظت سورفاکتانت در دامنه ۳ تا ۷ درصد در ۵ سطح (α+، ۱+، ۰، ۱–، α-) یا (۷، ۶/۴۱، ۵، ۳/۵۹، ۳ درصد)، و متغیر ولتاژ عبوری از میان الکترودها بر حسب ولت نیز در ۵ سطح (α+، ۱+، ۰، ۱–، α-) یا (۴۵،۲۰/۱۸، ۱۵، ۴۶/۱۰،۱۱) در نظر گرفته شد (جدول ۲). بر مبنای طرح آزمایش طراحی شده توسط RSM، برای سه فاکتور در نظر گرفته شده ۳۶ آزمایش مشخص گردید.

جدول ۲) دامنه و مقادیر متغیرهای مورد استفاده در طراحی آزمایش سطح - پاسخ

متغیر	ویژگی	واحد	متغیرها	مقادیر	دامنه
A	غلظت سورفاکتانت	٪	حداقل (-α)=۳		حداکثر (+α)=۷
B	ولتاژ	ولت	حداقل (-α)=۱۰		حداکثر (+α)=۲۰
C	نوع سورفاکتانت	فاکتور کیفی	S_1	S_2	S_2

روش استخراج پایرن از خاک

۲ گرم از خاک مورد سنجش را با ۶ میلی‌لیتر از مخلوط حلال استخراج شامل استون و ان- هگزان (۱:۱v/v) مخلوط کرده و در درون لوله آزمایش ۱۰ میلی‌لیتری می‌ریختیم و درب آن را محکم بسته (جهت جلوگیری از تبخیر) و با استفاده از دستگاه شیکر لوله به‌مدت ۱۰ دقیقه به‌طور کامل به هم زده می‌شد. سپس لوله‌ها به‌مدت ۴۰ دقیقه در حمام اولتراسونیک گذاشته و فازمایی رویی را در لوله‌های فالکون ریخته و به‌مدت ۱۵ دقیقه با دور ۴۰۰۰ دور در دقیقه سانتریفوژ شد؛ در انتها سوپرناتانت جدا شده از فاز جامد با دستگاه گاز کروماتوگرافی سنجش گردید. ۱۰ میکرولیتر از مایع استخراج شده را به دستگاه تزریق نموده و پس از تشکیل کامل همه پیک‌ها (مدت زمان حدود ۲۰ دقیقه) اطلاعات حاصله را استخراج نموده و با محاسبه سطح زیر پیک‌ها به کمک منحنی کالیبراسیون تهیه شده، غلظت پایرن بر مبنای سطح زیر منحنی، محاسبه و تعیین می‌گردید.

[5] Central Composite Design (CCD)
[6] Sodium Dodecyl Sulphate
[7] Triton X100
[8] Material Safety Data Sheet

[Downloaded from ismj.bpums.ac.ir on 2026-09-06]

به‌منظور آنالیز آماری نتایج بدست آمده، از آنالیز واریانس (ANOVA) استفاده شد (جدول ۳).

جدول ۳) نتایج آنالیز واریانس (ANOVA) طراحی آزمایش سطح – پاسخ جهت حذف پایرن از خاک آلوده با استفاده از فرآیند تلفیقی الکتروکینتیک و سورفکتانت

شاخص	مجموع مربعات	درجه ازادی	میانگین مربعات	ارزش-F	ارزش-P
مدل	۳۰۹۰/۴۶	۱۱	۲۸۰/۹۵	۵۹/۳۷	<۰/۰۰۰۱ مدل معنی‌دار
A - غلظت سورفاکتانت (٪)	۵۶۹/۷۶	۱	۵۶۹/۷۶	۱۲۰/۴۰	<۰/۰۰۰۱
B- ولتاژ جریان (ولت)	۱۸۱۷/۰۷	۱	۱۸۱۷/۰۷	۳۸۳/۹۹	<۰/۰۰۰۱
C- نوع سورفاکتانت	۳۳۵/۳۹	۱	۳۳۵/۳۹	۳۵/۴۴	<۰/۰۰۰۱
AB	۰/۰۸۳	۱	۰/۰۸۳	۰/۰۱۸	۰/۸۹۵۵
AC	۴۱/۰۳	۲	۲۰۵۲/	۴/۳۴	۰/۰۲۴۷
BC	۸۸/۶۳	۲	۴۴/۳۱	۹/۳۶	۰/۰۱۰
A^2	۵/۳۳۳ E-۰۰۳	۱	۵/۳۳۳ E-۰۰۳	۱/۱۲۷ E-۰۰۳	<۰/۹۷۳۵
B^2	۲۲۸/۵۳	۱	۲۲۸/۵۳	۴۸/۲۹	۰/۰۰۰۱
عدم برازش (Lack of Fit)	۱۰۳/۱۲	۱۵	۶/۸۷	۵/۹۲	۰/۰۰۵۳ (معنی‌دار)
خطای خالص	۱۰/۴۹	۹	۱/۱۶	–	–
انحراف معیار	۲/۱۸		ضریب همبستگی (R^2)		۰/۹۶۴۶
میانگین	۷۳/۳۴		ضریب همبستگی واقعی ($Adj.R^2$)		۰/۹۴۸۳
ضریب تغییرات	۲/۹۷		ضریب همبستگی پیشنهادی ($Pred.R^2$)		۰/۸۹۷۹

در جدول ۳ فاکتورهای اصلی، برهمکنش آن‌ها و مقادیر ارزش-P و درجه آزادی (df) ارائه شده است. نتایج این آنالیز نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی توسط نرم‌افزار از نوع درجه دوم یا منشوری (Quadratic Model) می‌باشد. از لحاظ آماری با توجه به مقادیر p-value به‌دست آمده، روش پیشنهادی با ضریب اطمینان ۹۵ درصد معنی‌دار است (۰/۰۰۰۱>۰/۰۵). هر چه ارزش-P کمتر باشد یعنی اینکه بین دو فاکتور برهمکنش بیشتری وجود دارد. بر همین اساس کمترین برهمکنش مربوط به AB می‌باشد زیرا بزرگ‌ترین ارزش-P را دارد (p=۰/۸۹۵۵) و بیشترین مربوط به BC می‌باشد زیرا کوچک‌ترین ارزش-P را دارد (p=۰/۰۱). همچنین نتایج حاصل از جدول ۴ نشان می‌دهد که متغیرهای A، B، C، AC، BC، B۲ شاخص‌های معنی‌دار مدل هستند. با این وجود، تغییرات غلظت سورفاکتانت با ولتاژ معنی‌دار نمی‌باشد یعنی شاخص‌های A۲ و AB به‌واسطه ارزش-P بزرگ‌تر از ۰/۰۵، معنی‌دار نیستند. ارزش-F مدل پیشنهادی معادل ۵/۳۹ می‌باشد که دلالت بر معنی‌دار بودن مدل درجه دوم (quadratic) و رضایت‌بخش بودن ارزیابی آزمایش‌ها دارد (P<۰/۰۰۰۱). همبستگی مدل‌ها (fitness) توسط ضریب رگرسیون R2 ارزیابی می‌گردد. بزرگ بودن میزان ضریب همبستگی حاکی از این است که مدل پیشنهادی قادر به توصیف رفتار حذف پایرن در این شرایط است (R2=۰/۹۶۴۶) و بیانگر معنی‌دار بودن پیشگوئی پاسخ می‌باشد. ضریب رگرسیون R2 پیشنهادی توسط مدل (Pred.R2=۰/۸۹۷۹) دارای انطباق قابل توجه با ضریب رگرسیون R2 آزمایش‌ها (Adj.R2=/۹۴۸۳) بود.

به منظور اطمینان از شرائط بهینه پیشنهادی، آزمایش تأییدی صورت گرفت (جدول ۴). بدین منظور سورفاکتانت نوع مخلوط (S3) و با ولتاژ ۱۸/۴ ولت و غلظت سورفاکتانت ۶/۵۳ درصد به‌عنوان تأئید مرحله

[Downloaded from ismj.bpums.ac.ir on 2026-09-06]

آزمایش بهینه در نظر گرفته شد و راندمان حذف پایرن پیشنهادی که توسط نرم‌افزار که معادل ۹۱/۲۴ درصد بیان شده بود ارزیابی گردید. پس از انجام آزمایش، راندمان واقعی حذف پایرن ۹۴/۶ درصد به‌دست آمد که با ضریب اطمینان ۹۵ درصد قابل قبول است.

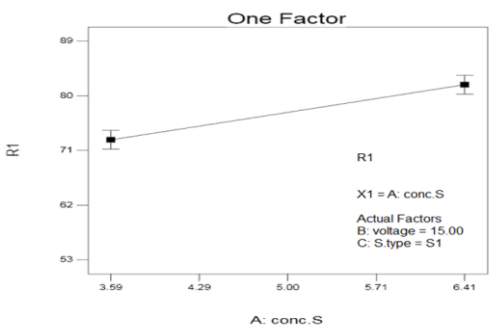
جدول ۴) مقادیر پارامترها در حالت بهینه و مقایسه مقدار مدل با مقدار اندازه‌گیری شده حاصل از آزمایش

نوع سورفاکتانت	سورفاکتانت(٪) غلظت	ولتاژ جریان (ولت)	درصد حذف پایرن پیش بینی مدل (٪)	درصد حذف پایرن واقعی (٪)
S3 or (SDS:TX۱۰۰)	۶	۱۸/۴	۹۱/۲۴	۹۴/۶

بحث

نتایج این تحقیق مشخص نمود که فرآیند الکتروکینتیک در تلفیق با سورفاکتانت به‌عنوان عامل انحلال یا متحرک سازی پایرن از خاک آلوده، از جمله روش‌های کارآمد و با پتانسیل قابل توجه می‌باشد. حذف الکتروکینتیک پایرن از خاک آلوده با استفاده از سورفاکتانت‌های SDS، TX۱۰۰ و مخلوط این دو با نسبت حجمی برابر بر پایه روش آماری سطح - پاسخ نشان داد که سورفاکتانت مخلوط بیشترین اثر و سدیم دودسیل سولفات و تریتون ایکس صد به‌ترتیب اثرات کمتری را در حذف پایرن از خاک داشتند. نتایج حاصل از ارزیابی شرائط بهینه توسط مدل مورد ارزیابی، متعاقب استفاده از الکترود استیل، ولتاژ ۱۸/۵۴، سورفاکتانت مخلوط با غلظت ۶/۵۳ درصد در مدت ۲۸ روز راندمان، حذف پایرن معادل ۹۴/۶ درصد با غلظت اولیه ۵۰ میلی‌گرم در لیتر حلال یا ۳۷/۷۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک خشک را مشخص می‌نمود. در مطالعات مشابه تلفیقی فرآیندهای الکتروکینتیکی جهت حذف هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه‌ای از خاک‌های رسی که توسط کیم (Kim) و همکاران صورت گرفته است راندمان حذفی معادل ۷۵ تا ۸۰ درصد درصد گزارش گردیده است (۱۷).

زمانی که از ولتاژ ثابت ۱۵ ولت استفاده گردید، با افزایش غلظت SDS از ۳ تا ۷ درصد و با در نظر گرفتن سایر شرایط آزمایش، راندمان حذف پایرن افزایش یافت (نمودار ۱). به گونه‌ای که در غلظت تقریبی ۶/۴۱ درصد، راندمانی حدود ۸۰ درصد برای حذف پایرن اخذ گردید.



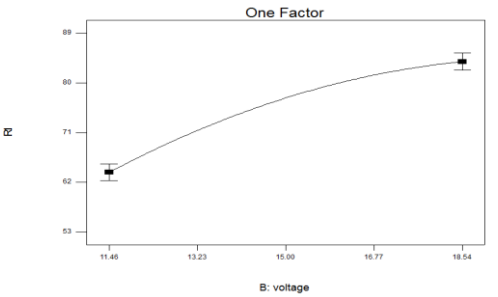
نمودار ۱) رابطه بین نوع سورفاکتانت (S1: SDS) ،غلظت سورفاکتانت و درصد حذف پایرن از خاک آلوده (R1)

شایان ذکر است که بر اساس مطالعات انجام شده، سورفاکتانت‌های مورد استفاده در این تحقیق به اندازه مورد نیاز استفاده شده است و در فرآیند الکتروکینتیک تحت عمل فرایند اکسیداسیون و احیاء شیمیایی قرار گرفته و به همراه پایرن تجزیه شده و به مواد کم خطر یا بی‌خطر تبدیل می‌شوند. به‌طور کلی، سدیم دودسیل سولفات باعث افزایش قابلیت انحلال آب برای کریستال‌های هیدروکربن های آروماتیک چند حلقه‌ای می‌گردد. بالاتر بودن غلظت SDS از غلظت بحرانی میسل آن باعث

[Downloaded from ismj.bpums.ac.ir on 2026-09-06]

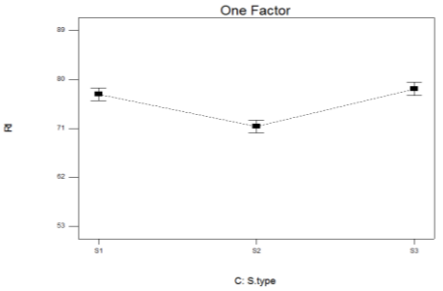
افزایش تحرک هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه‌ای در درون فاز مایی می‌شود و به همین دلیل راندمان حذف پایرن افزایش می‌یابد (۲۱-۱۹).

زمانی که از SDS با غلظت ثابت ۵ درصد استفاده شد، مشاهده گردید که با افزایش ولتاژ عبوری از میان الکترودها از ۱۰ به۲۰ ولت، راندمان حذف پایرن افزایش می‌یافت (نمودار ۲). به گونه‌ای که در ولتاژ حدود ۱۸/۵۴ ولت بیشترین راندمان حذف اخذ گردید (نمودار ۲). دلیل این موضوع، ایجاد میدان الکتریکی قوی‌تر و در نتیجه دانسیته جریان عبوری بیشتر از میان الکترودها بوده و در نتیجه فرآیندهای مرتبط با حذف پایرن از جمله الکترواسموزیس و مهاجرت الکتریکی بیشتر اتفاق افتاده و پایرن به میزان بیشتری حذف گردید (۲۲).



نمودار ۲) رابطه بین ولتاژ جریان عبوری از میان الکترودها و درصد حذف پایرن از خاک آلوده

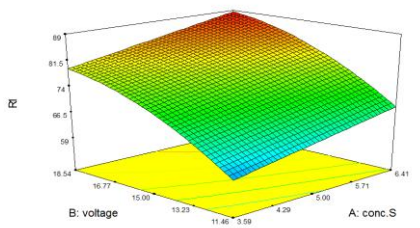
مطالعه انجام شده توسط پروزرو (Prozorov) و همکاران نشان داد که با تغییر در ولتاژ و الکترودهای مورد استفاده می‌توان تا حدود ۹۵ درصد حذف آلاینده را توسط فرآیند الکتروکینتیکی اخذ نمود (۱۸). در شرایطی که غلظت هر سه سورفاکتانت یکسان و معادل ۵ درصد و از یک ولتاژ ثابت ۱۵ ولت استفاده گردید و سایر شرایط آزمایش هم برای هر سه یکسان بود، بیشتربن راندمان حذف پایرن مربوط به S3 یا مخلوط دو سورفاکتانت با نسبت حجمی یکسان و در مرحله دوم مربوط به S1 یا سدیم دودسیل سولفات و کمترین راندمان حذف مربوط به سورفاکتانت S2 یا تریتون ایکس صد بود (نمودار ۳).



نمودار ۳) رابطه بین نوع سورفاکتانت و راندمان حذف پایرن از خاک آلوده

در مطالعه انجام شده توسط ونجان (Venjane) و همکاران جهت حذف پایرن از خاک آلوده با استفاده از مخلوط سورفاکتانت آنیونی و غیر یونی نشان داده شد که قابلیت انحلال پایرن در دامنه وسیعی از سورفاکتانت‌ها صورت می‌گیرد. نتایج این مطالعه نیز حاکی از درصد بالای قابلیت انحلال پایرن در خاک و در اختیار گذاشتن پایرن در فرآیند الکتروکینتیک است (۱۹).

ارتباط بین غلظت سورفاکتانت، ولتاژ جریان عبوری و راندمان حذف پایرن در نمودار ۴ ارائه شده است. با افزایش غلظت سورفاکتانت (SDS) و افزایش ولتاژ جریان عبوری از میان الکترودها راندمان حذف پایرن افزایش می‌یابد به گونه‌ای که در نقاط بالای دامنه متغیرها راندمان حذفی معادل ۸۹ درصد اخذ گردید.

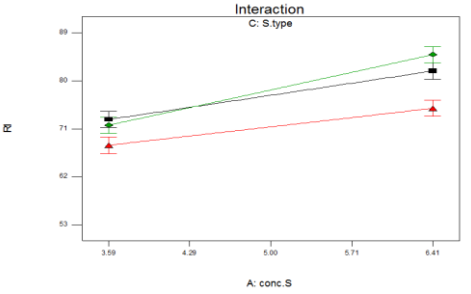


نمودار ۴) ارتباط بین ولتاژ جریان عبوری از میان الکترودها و غلظت سورفاکتانت در راندمان حذف پایرن از خاک آلوده

[Downloaded from ismj.bpums.ac.ir on 2026-09-06]

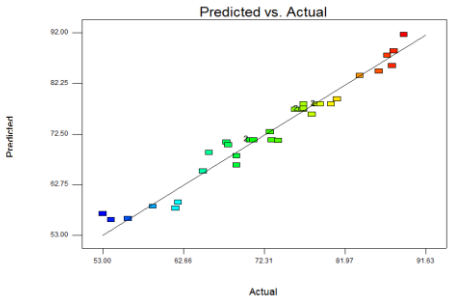
افزایش غلظت سورفاکتانت‌ها باعث تغییر ویژگی‌های خاک نظیر ثابت دی الکتریک، pH، ویسکوزیته، کاهش کشش سطحی می‌گردد. این تغییرات در ویژگی‌های سطحی خاک و میزان جریان الکترواسموتیک تأثیر گذاشته و در نتیجه باعث افزایش کارایی حذف الکترواسموتیک پایرن گردد (۲۰ و ۲۱).

نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌داد که سورفاکتانت‌های S۱ و S۳ دارای رفتار یکسان در حذف پایرن از خاک می‌باشند (نمودار ۵). از نقطه تقاطع به بعد با افزایش غلظت سورفاکتانت‌ها از ۳ تا ۷ درصد مشاهده می‌شود که سورفاکتانت مخلوط (S۳) راندمان حذف بالاتری دارد و پس از آن سورفاکتانت S۱ راندمان بیشتری نسبت به نوع S۲ دارد. فاکتورهای محیطی نظیر درجه حرارت، شوری، سختی، pH، دارای اثرات آشکاری روی محلول سورفاکتانت آنیونی یا غیریونی می‌باشد که باید در نظر گرفته شوند (۲۱).



نمودار ۵) برهمکنش ولتاژ عبوری از میان الکترودها و غلظت سورفاکتانت و نوع سورفاکتانت بر راندمان حذف پایرن از خاک آلوده

تطابق نتایج پیشنهادی توسط مدل و راندمان‌های واقعی مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج آن در نمودار ۶ ارائه گردیده است.



نمودار ۶) تطابق راندمان پیشنهادی توسط نرم‌افزار طراحی آزمایش و راندمان واقعی حاصل از آزمایش‌ها

نتایج نشان می‌دهد که با ضریب اطمینان ۹۵ درصد انطباق بسیار مطلوبی بین راندمان واقعی و پیش‌بینی شده توسط مدل از نظر ضریب همبستگی پیشنهادی و واقعی وجود دارد.

نتایج نشان می‌دهد که SDS و مخلوط SDS و TX۱۰۰ در آزادسازی هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه‌ای نظیر پایرن جذب شده به خاک‌های رسی –سیلتی بسیار مؤثر است. در حالتی که از سورفاکتانت مخلوط با غلظت ۶/۵۳ درصد در مدت ۲۸ روز و از گرادیان ولتاژ ۳/۰۹ ولت بر سانتی‌متر استفاده گردید، حذف پایرن معادل ۹۴/۶ درصد با غلظت اولیه ۵۰ میلی‌گرم در لیتر حلال یا ۳۷/۷۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک خشک به‌دست آمد. این نتیجه در پی افزایش غلظت سورفاکتانت از ۳ تا جدود ۷ درصد (۶/۵۳ درصد) به‌دست آمد. در واقع با افزایش غلظت این سورفاکتانت‌ها، افزایش قابل توجه در آزاد سازی پایرن از خاک که به میزان بسیار اندکی در حد ۰/۱۳۵ میلی‌گرم در لیتر در آب قابل حل است، به‌دست آمده است.

سپاس و قدردانی

بدین‌وسیله از حمایت‌های مالی و فراهم نمودن امکانات پژوهشی توسط دانشگاه تربیت مدرس در انجام این تحقیق تشکر و قدردانی می‌نمائیم.

[Downloaded from ismj.bpums.ac.ir on 2026-09-06]

References:

1.Huang D, Xu Q, Cheng J, et al. Electrokinetic remediation and its combined technologies for removal of organic pollutants from contaminated soils. Int J Electrochem Sci 2012; 7: 4528-44.

2.Flores R, García MG, Peralta-Hernández JM, et al. Electro-Remediation in the presence of ferrous sulfate as an ex-situ alternative treatment for hydrocarbon polluted soil. Int J Electrochem Sci 2012; 7: 2230-9.

3.Teixeira SCG, Ziolli RL, da Costa Marques MR, et al. Study of pyrene adsorption on two Brazilian soils. Water Air Soil Pollut 2011; 219: 297-301.

4.Gómez J, Alcántara MT, Pazos M, et al. A two-stage process using electrokinetic remediation and electrochemical degradation for treating benzo[a]pyrene spiked kaolin. Chemosphere 2009; 74: 1516-21.

5.Ibn Abubakar B, Abdullah N, Idris A, et al. Optimisation of pyrene removal by a mixed culture in a soil-slurry bioreactor using response surface methodology (RSM). Procedia Eng 2012; 50: 786-99.

6.Gan S, Lau EV, Ng HK. Remediation of soils contaminated with polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs). J Hazard Mater 2009; 172: 532-49.

7.Haritash AK, Kaushik CP. Biodegradation aspects of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs): a review. J Hazard Mater 2009; 169: 1-15.

8.Posada-Baquero R, Ortega-Calvo JJ. Recalcitrance of polycyclic aromatic hydrocarbons in soil contributes to background pollution. Environ Pollut 2011; 159: 3692-99.

9.da Cunha ACB, Sabedot S, Sampaio CH. Salix rubens and salix triandra species as phytoremediators of soil contaminated with petroleum-derived hydrocarbons. Water Air Soil Pollut 2012; 223: 4723-31.

10.Ahangar AG. Sorption of PAHs in the soil environment with emphasis on the role of soil organic matter: A review. World Appl Sci J 2010; 11: 759-65.

11.Reddy KR, Karri MR. Effect of oxidant dosage on integrated electrochemical remediation of contaminant mixtures in soils. J Environ Sci Health A 2008; 43: 881-93.

12.Sumbarda-Ramos EG, Guerrero-Gutierrez, OX, Murillo-Rivera B, et al. Electrokinetic treatment for clayed and sandy soils. J Appl Electrochem 2010; 40: 1255-61.

13.Deshpande S, Shiau, BJ, Wade D, et al. Surfactant selection for enhancing ex situ soil washing. Water Res 1999; 33: 351-60.

14.Alcantara MT, Gomez J, Pazos M, et al. PAHs soil decontamination in two steps: desorption and electrochemical treatment. J Hazard Mater 2009; 166: 462-8.

15.Muherei MA, Junin R, Merdhah AB. Adsorption of sodium dodecyl sulfate, Triton X100 and their mixtures to shale and sandstone: A comparative study. J Petrolium Sci Eng 2009; 67: 149-54.

16.Sahu JN, Acharya J, Meikap BC. Response surface modeling and optimization of chromium (VI) removal from aqueous solution using Tamarind wood activated carbon in batch process. J Hazard Mater 2009; 172: 818-25.

17. Kim JH, Kim SS, Yang JW. Role of stabilizers for treatment of clayey soil contaminated with phenanthrene through electrokinetic-Fenton process: some experimental evidences. Electrochim Acta 2007; 53: 1663-70.

18. Prozorov LB, Shcheglov MY, Nikolaevsky VB, et al. The influence of electric parameters on the dynamics of the electrokinetic decontamination of soils. J Radioanalytical Nuclear Chem 2000; 246: 571-4.

19.Guha S, Jaffe PR, Peters CA. Solubilization of PAH mixtures by a nonionic surfactant. Environ. Sci Technol 1998; 32: 930-5.

20.Li JL, Chen BH. Solubilization of model polycyclic aromatic hydrocarbons by nonionic surfactants. Chem. Eng. Sci 2002; 57: 2825-35.

21.Zhou W, Zhu L. Solubilization of pyrene by anionic and nonionic mixed surfactants. J Hazard Mater 2004; 109: 213-20.

22.Alcantara MT, Gomez J, Pazos M, et al. Combined treatment of PAHs contaminated soils using the sequence extraction with surfactantâs“electrochemical degradation. Chemosphere 2008; 70: 1438-44.

[Downloaded from ismj.bpums.ac.ir on 2026-09-06]

ISMJ 2015; 18(3): 516-526

Original Article

Pyrene removal from contaminated soil using electrokinetic process combined with surfactant

SE. Hashemi [1], A. Rezaee [2*], SM. Mousavi [3], MR. Nikodel [4], H. Ganjiidoust [5]

[1] Department of Environmental Health Engineering, Faculty of Health, Medical Sciences University of Bushehr. Iran

[2] Department of Environmental Health, Faculty of Medical Sciences, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

[3] Department of Biotechnology, Faculty of Chemical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

[4] Department of Engineering Geology, Faculty of Basic Science, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

[5] Department of Environmental Engineering, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

(Received 14 Jan, 2014 Accepted 5 Apr, 2014)

Abstract

Background: Pyrene is one of the stable polycyclic aromatic hydrocarbons that is considered as an important pollutants, because of extensive distribution in the environment and carcinogenic and mutagenic properties. Among the various treatment techniques, electrokinetic method is an environmental- friendly process for organic and mineral pollutants adsorbed to soil with fine pore size the same as clay and low hydraulic conductivity soils. For improving the efficiency of pyrene removal from soil, soulobilization of pyrene from soil could be used by surfactants.

Materials and Methods : In this study, clay soil was selected as model because of the specific properties. Combined method using surfactant and electrokinetic was applied for pyrene removal from soil. Experiments were designed using response surface methodology (RSM), and effect of three variables includes surfactant concentration, voltage and surfactant type were evaluated for pyrene removal from contaminated soil.

Results: Pyrene removal using anionic surfactants(SDS) and nonionic surfactants(TX100) as a solubilizing agents has high removal efficiency. In the optimum condition with 95% confidence coefficient, utilizing mixed surfactants of sodium dodecyl sulfate and triton X-100 with the same volume, induced of 18.54 volt and 6.53 percent surfactant concentration have 94.6% pyrene removal efficiency.

Conclusion:: Results of this study shows that electrokinetic process combined with surfactant as solubilizing agent could be applied as an efficient method for treating the pyrene-contaminated soils.

Key words: Pyrene, Contaminated soil, Electrokinetic process, Surfactant

***Address for correspondence**: Department of Environmental Health, Faculty of Medical Sciences, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran . E-mail: abbasrezaee@yahoo.com; rezaee@modares.ac.ir

Website: http://bpums.ac.ir
Journal Address: http://ismj.bpums.ac.ir

[Downloaded from ismj.bpums.ac.ir on 2026-09-06]