مجله سلامت و محیط زیست، فصلنامه‌ی علمی پژوهشی
انجمن علمی بهداشت محیط ایران
دوره چهاردهم، شماره اول، بهار ۱۴۰۰، صفحات ۳۵ تا ۵۰

Available online: https://ijhe.tums.ac.ir
مقاله پژوهشی

حذف فلز سنگین نیکل از خاک شالیزارهای دشت سیلاخور لرستان با استفاده از فرایند احیای الکتروکینتیکی

محسن شعبان[1]، داریوش یوسفی کبریا[2]، مرضیه رضوی[1,*]
۱- گروه ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران، موسسه آموزش عالی آفرینش علم گستر بروجرد، بروجرد، ایران
۲- گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

اطلاعات مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۱/۱۴
تاریخ ویرایش: ۱۴۰۰/۰۳/۱۲
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۱۸
تاریخ انتشار: ۱۴۰۰/۰۳/۳۱

واژگان کلیدی: اصلاح الکتروکینتیک، الکترودهای آند و کاتد، خاک کشاورزی، نیکل

پست الکترونیکی نویسنده مسئول:
Marzie.Razavi@afarinesh.ac.ir

چکیده

زمینه و هدف: مصرف کودهای شیمیایی در صنعت کشاورزی بعنوان یکی از روش‌های افزایش محصول شناخته شده است که همین مساله می‌تواند منجر به افزایش ریسک ورود آلاینده‌های شیمیایی به چرخه غذایی انسان شود. هدف این پژوهش، امکان سنجی و ارزیابی حذف فلز سنگین نیکل از خاک شالیزارهای استان لرستان است.

روش بررسی: نمونه برداری از ۱۵ ایستگاه و بصورت تصادفی از مناطق کشت برنج در دشت سیلاخور استان لرستان انجام شد و میزان غلظت اولیه و غلظت نهایی نیکل در مقاطع مختلف نمونه‌ها، و همچنین میزان حذف آلاینده از نمونه‌ها پس از استفاده از روش اصلاح الکتروکینتیک و آماده‌سازی نمونه‌ها با استفاده از دستگاه طیف‌سنج نشری پلاسمای جفت شده القایی (ICP-OES) در سه راکتور با طول‌های cm ۵، ۱۰ و ۱۵ اندازه گیری و محاسبه شد.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که استفاده از روش اصلاح الکتروکینتیک در کاهش غلظت فلز سنگین در نمونه خاک کشاورزی موثر بوده است و میزان نیکل موجود در خاک را تا حدود مجاز استاندارد خاک سازمان محیط زیست ایران (۵۰ mg/kg)، کاهش داده است. مقادیر اولیه فلز سنگین نیکل در خاک شالیزار در نمونه مرکب برابر ۱۰۸ mg/kg بوده است که بهترین راندمان حذف آن پس از انجام آزمایشات در ناحیه کاتد و آند به ترتیب برابر با ۹۰/۸۴ و ۹۳/۷۵ درصد گردید.

نتیجه‌گیری: سلامت و کیفیت محصولات کشاورزی به استفاده از خاک سالم در محدوده استانداردهای زیست محیطی بستگی دارد. نتایج مطالعه حاضر نشان داد که فرایند EKR قادر به خروج نیکل از محیط خاک بوده و در نتیجه انجام فرایند، غلظت آلاینده به مقدار مجاز و حتی پایین تر از استاندارد کیفی خاک سازمان حفاظت محیط زیست ایران رسیده است.

Please cite this article as: Shaban M, Yousefi Kebria D, Razavi M. Removal of nickel from paddy soil by electrokinetic reclamation process, a case study of Silakhor plain (Lorestan). Iranian Journal of Health and Environment. 2021;14(1):35-50.

Copyright © 2021 Iranian Association of Environmental Health, and Tehran University of Medical Sciences. Published by Tehran University of Medical Sciences. This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/). Noncommercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.

[Downloaded from ijhe.tums.ac.ir on 2026-11-04]

مقدمه

افزایش روز افزون جمعیت، منجر به تغییر در الگوی مصرف مردم، در کل دنیا شده است. افزایش تولیدات کشاورزی در نتیجه استفاده بیشتر از کودهای شیمیایی و سموم دفع آفات بوده که این مساله منجر به ایجاد آلودگی‌های زیست محیطی فراوان در محیط زیست سراسر دنیا شده است. رواناب‌های سطحی در زمین‌های کشاورزی و نفوذ این مواد به درون محیط خاک منجر به تضعیف کیفیت خاک گردیده است (۱). از آنجائی‌که خاک یکی از منابع مهم و ارزشمند موجود بر روی کره زمین بوده و سهم بسزایی در تولید منابع غذایی انسان دارد، لذا سلامت و کیفیت محصولات به‌دست آمده از آن باید در حدی باشد که سلامت و بقاء موجودات زنده‌ای که از این منابع استفاده می‌کنند در خطر قرار نگیرد. در این راستا، بیشترین بهره‌وری اقتصادی و زیست محیطی از این منابع، در گرو بهره‌مندی و استفاده از روش‌های اصلاح و پاکسازی خاک معرفی شده است (۲).

امروزه روش‌های متعددی برای حذف آلاینده‌ها و به خصوص فلزات سنگین از خاک پیشنهاد شده است. تاکنون شیوه‌های متعددی از جمله روش‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی شامل خاک‌برداری و خاک‌ریزی، دفن خاک، اسیدشویی و شستشوی خاک، بایوپایل و ... برای پالایش مناطق آلوده استفاده شده است (۳-۵). بسیاری از این روش‌ها به دلیل داشتن هزینه بالا، تغییر ویژگی‌های شیمیایی و ساختار خاک و یا عدم دسترسی به امکانات لازم برای اجرای آنها در کشورهای در حال توسعه، قابل کاربرد نیستند. یکی از روش‌های نوین حذف فلزات سنگین و آلاینده‌ها که در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است، فرایند EKR است (۴، ۶-۸). این فرایند شامل ایجاد یک میدان الکتریکی ثابت و ضعیف در خاک آلوده با استفاده از قرار دادن دو الکترود در محفظه آند و کاتد و عبور جریان مستقیم در میان آنها است (۹). از ویژگی‌های روش اصلاح الکتروکینتیک در مقایسه با سایر روش‌های پاکسازی خاک، می‌توان به هزینه راه اندازی و نگهداری پایین، مصرف کم انرژی الکتریکی و عدم تحمیل هزینه‌های گزاف مواد شیمیایی، راندمان خوب در خاک‌های با نفوذپذیری پایین و همچنین تغییر مشخصات و ویژگی‌های شیمیایی خاک اشاره شده است (۴، ۱۰، ۱۱). در جدول تناوبی به آن دسته از عناصری که وزن اتمی بالایی داشته و در درجه حرارت اتاق خاصیت فلزی دارند فلز سنگین اطلاق می‌شود. این فلزات، اغلب سمی بوده و به دلیل عدم متابولیزه شدن در بدن انسان و سایر موجودات زنده، به صورت یک تهدید جدی برای سلامتی آنها هستند (۱۲-۱۵). از سوی دیگر این آلاینده‌ها نمی‌توانند به وسیله میکروارگانیسم‌ها تجزیه شوند و برای مدت زمان طولانی، بدون تغییر، در محیط خاک و رسوب باقی می‌مانند (۱۶). در میان فلزات سنگین موجود در جدول تناوبی، از نیکل به وفور در کودهای شیمیایی مصرفی در زمین‌های کشاورزی استفاده شده است. همچنین دود خروجی از نیروگاه‌های برق و کوره‌های زباله سوز، حاوی مقادیر زیادی از این آلاینده بوده و به راحتی توسط ریزش‌های جوی به زمین رسیده و بنابراین این آلاینده به شکل گسترده‌ای در میان خاک، رسوب، آب و مواد زیستی وجود دارد. اصلاح و پاکسازی زمین‌های کشاورزی به دلیل پتانسیل بالا در انتقال این آلاینده‌ها به بدن انسان و سایر موجودات زنده، همواره یکی از اهداف اصلی شاخه‌های ژئوتکنیک زیست محیطی به شمار رفته است (۱۷-۱۹). با توجه به اینکه در سال‌های اخیر، کشت برنج در این منطقه از استان لرستان رونق یافته است و با توجه به مطالعات انجام شده در خصوص غلظت بالای فلز نیکل و اثرات سرطان‌زایی که مستقیما با سلامت مصرف کنندگان در ارتباط است، لذا نیاز به بررسی روش‌های اصلاح مناسب و مقرون به صرفه در محیط خاک منطقه وجود دارد. در تحقیق حاضر به بررسی فرایند EKR در حذف فلز سنگین نیکل در نمونه موردی خاک آلوده به نیکل در شالیزارهای دشت سیلاخور لرستان پرداخته شد.

[Downloaded from ijhe.tums.ac.ir on 2026-11-04]

مواد و روش‌ها

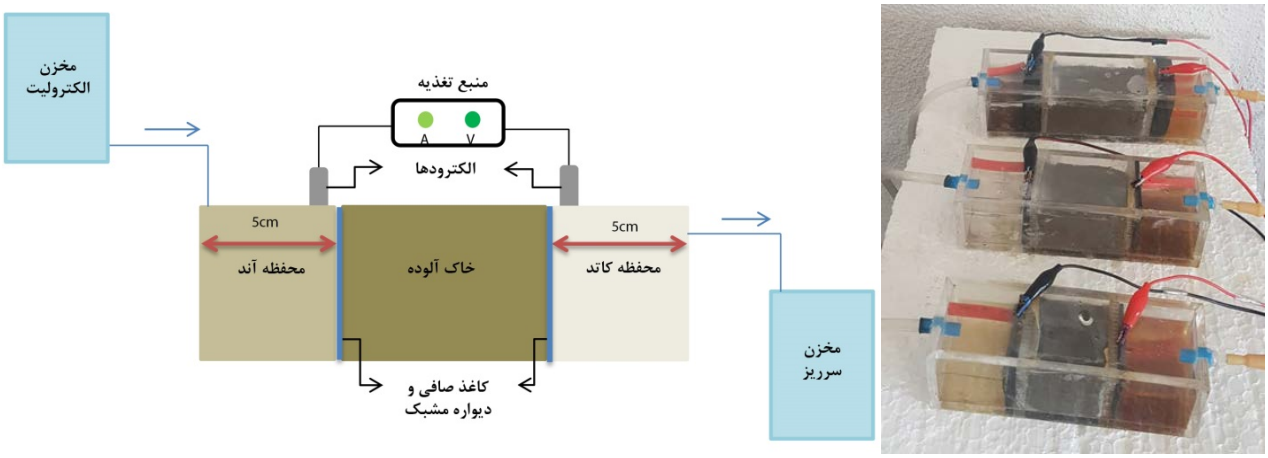
_ ساختار راکتورها

در این تحقیق از سه راکتور آزمایشگاهی از جنس پلکسی‌گلس با ضخامت ۵ mm و مشخصات ارائه شده در جدول ۱ استفاده شد.

جدول ۱- مشخصات و ابعاد راکتورها

مشخصات راکتورها / شماره راکتور	ابعاد داخلی راکتور (اندازه نمونه خاک)			ابعاد داخلی محفظه‌های حاوی آب مقطر (سر و ته راکتور)		
	عمق	عرض	طول	عمق	عرض	طول
راکتور شماره ۱	۵	۵	۵	۵	۵	۵
راکتور شماره ۲	۵	۵	۱۰	۵	۵	۵
راکتور شماره ۳	۵	۵	۱۵	۵	۵	۵

محفظه میانی حاوی خاک با استفاده از دو دیواره مشبک که سوراخ‌هایی به قطر ۱ mm و به فواصل ۳ mm در آن تعبیه شده، از محفظه‌های کناری (محفظه آنولیت و کاتولیت) جدا گردید. به منظور جلوگیری از ورود دانه‌های خاک به محفظه‌های آندی و کاتدی، از کاغذ صافی در حد فاصل قسمت‌های انتهایی مخازن با قسمت میانی (خاک)، استفاده شد. شکل شماتیک و تصویر واقعی راکتورها در شکل ۱ نشان داده شده است.

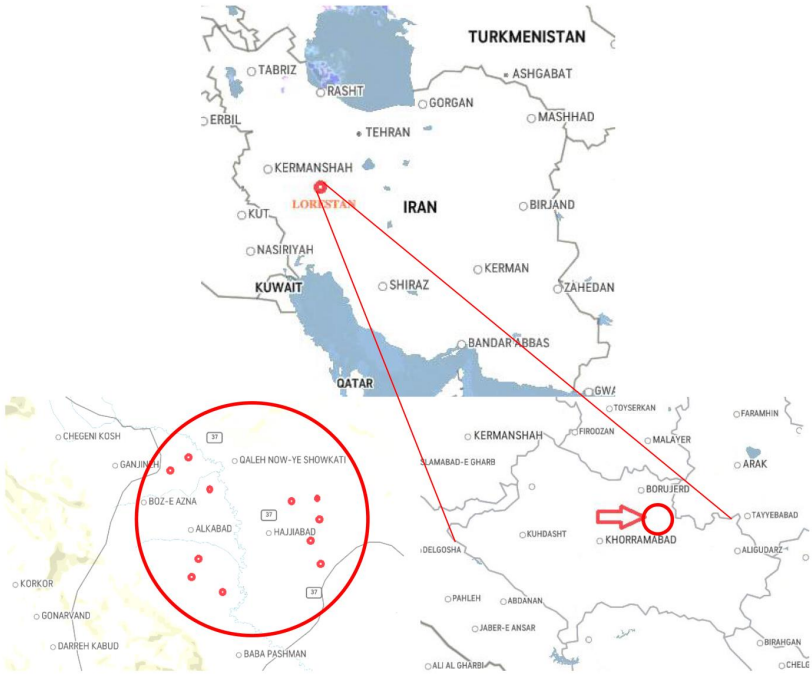


شکل ۱- تصویر واقعی و شماتیک راکتورهای استفاده شده در تحقیق

[Downloaded from ijhe.tums.ac.ir on 2026-11-04]

ـ روش نمونـه گیری

خـاک بـه کار رفتـه در کلیـه آزمایش‌هـا، خـاک کشـاورزی شـالیزارهای دشـت سیلاخور لرسـتان بوده که بصورت تصادفی از نقاط مختلف نشـان داده شـده در شـکل ۲ نمونه‌گیری و به آزمایشـگاه منتقـل گردیـد. روش نمونه گیـری در این تحقیق، روش ارائـه شـده توسـط Jewell و همـکاران (۲۰) اسـت کـه در شـرایط اسـتفاده از آن، زمانـی اسـت کـه منبـع آلاینـده و نحـوه توزیـع آن در خاک نامشـخص باشـد. بـرای نمونه گیری تصادفـی، ابتـدا محـدوده مورد بررسـی، شـبکه بنـدی گردید و بـه هـر یـک از نقـاط شـبکه، عددی نسـبت داده شـد. سـپس براسـاس انتخـاب تصادفـی اعـداد، محل‌هـای نمونـه گیـری مشـخص شـد. پـس از انتقـال نمونه‌هـا بـه آزمایشـگاه و تهیـه نمونـه مرکـب و همچنیـن آمـاده سـازی آنهـا، میـزان غلظـت اولیـه نیـکل توسـط دسـتگاه ICP-OES قرائـت گردید.



شکل ۲- موقعیت جغرافیایی منطقه و مناطق نمونه برداری شده

ـ ابزار و تجهیزات اندازه گیری

در طول مدت کلیه آزمایش‌ها، pH در محفظه‌های آند و کاتد اندازه‌گیری و کنترل گردید. برای اندازه‌گیری میزان pH از pH متر و جهت تامین انرژی الکتریکی مورد نیاز راکتورها، از یک منبع تغذیه Centaur مدل PS-3051E استفاده شد. الکترودهای مصرفی در این تحقیق گرافیت صفحه‌ای ضدخوردگی و اندازه گیری میزان جریان الکتریکی توسط مولتی متر انجام شد. جهت تعیین خصوصیات شـیمیایی نـمونه‌ها، از آزمایـش طـیف سنـجی پراش اشـعه ایـکس (X-ray Fluorescence Spectroscopy) استفاده شد (جدول ۲). همچنین مشخصات فیزیکی خاک مورد مطالعه در آزمایشگاه اندازه گیری و در جدول ۳ ارائه گردید. میزان غلظت اولیه و نهایی فلز سنگین نیکل در قسمت‌های مختلف نمونه خاک با استفاده از دستگاه طیف‌سنج نشری پلاسمای جفت شده القایی یا ICP-OES (مدل Optima 5300DV, Perkin Elmer, US) اندازه گیری گردید.

[Downloaded from ijhe.tums.ac.ir on 2026-11-04]

جدول ۲- (الف و ب) مشخصات شیمیایی خاک با استفاده از آنالیز XRF

(الف)

نام ترکیب شیمیایی	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	Na_2O	K_2O	TiO_2	P_2O_5	LOI
مقدار (درصد)	۵۰/٦۵	۱۲/۳۲	۵/۳	۱۰/۲۸	۰/۷۲	۲/٦۸	۰/۸۳	۰/۲۱	۱۲/۵

(ب)

نام فلز سنگین	S	As	Ba	Ce	Co	Cr	Zn	Ni	Sr
مقدار(ppm)	۳۳	۹	۳۷۹	۹٤	۱۷	۱۵۰	۱۲۲	۱۰۸	۲٤٦

جدول ۳- مشخصات فیزیکی خاک مورد مطالعه

مشخصات	واحد	مقدار
دانسیته خشک	g/cm^3	۱/٦
pH	–	٦/٤-۵/۹
رطوبت بهینه	درصد	۲۲/۱
حد روانی	درصد	٤٦
حد خمیری	درصد	۳۱
نشانه خمیری	درصد	۱۲

ـ روش آزمایشات

در این تحقیق آزمایشات با شرایط ارائه شده در جدول ۴ انجام گردیدند و اثر تغییر فاصله میان الکترودها (طول نمونه خاک)، بر میزان تغییرات pH، میزان جریان الکتریکی تولیدی و همچنین جابجایی و حذف فلز سنگین نیکل از خاک آلوده شالیزار بررسی گردید.

[Downloaded from ijhe.tums.ac.ir on 2026-11-04]

جدول ۴- برنامه آزمایش‌های انجام شده در تحقیق حاضر

شماره آزمایش	مدت زمان آزمایش (روز)	ولتاژ مورد استفاده (v)	طول نمونه (cm)	گرادیان ولتاژ (v/cm)
۱	۷	۱۰	۵	۰/۵
۲	۷	۱۰	۱۰	۱
۳	۷	۱۰	۱۵	۱/۵

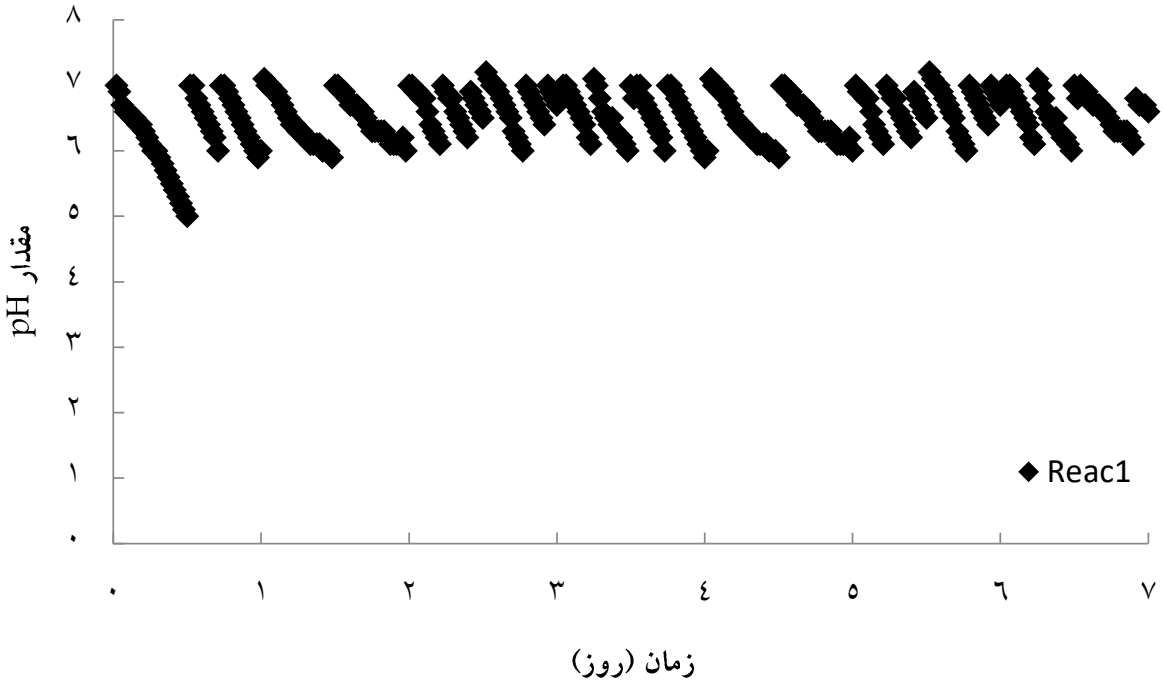
پس از اتمام هر آزمایش، نمونه خاک به سه قسمت مساوی تقسیم شده و غلظت فلز سنگین نیکل در قسمت‌های مختلف نمونه اندازه گیری گردید. کلیه آزمایشات به صورت سه بار تکرار انجام گردیدند و مدت زمان آزمایشات، ۷ روز در نظر گرفته شده بود.

یافته‌ها

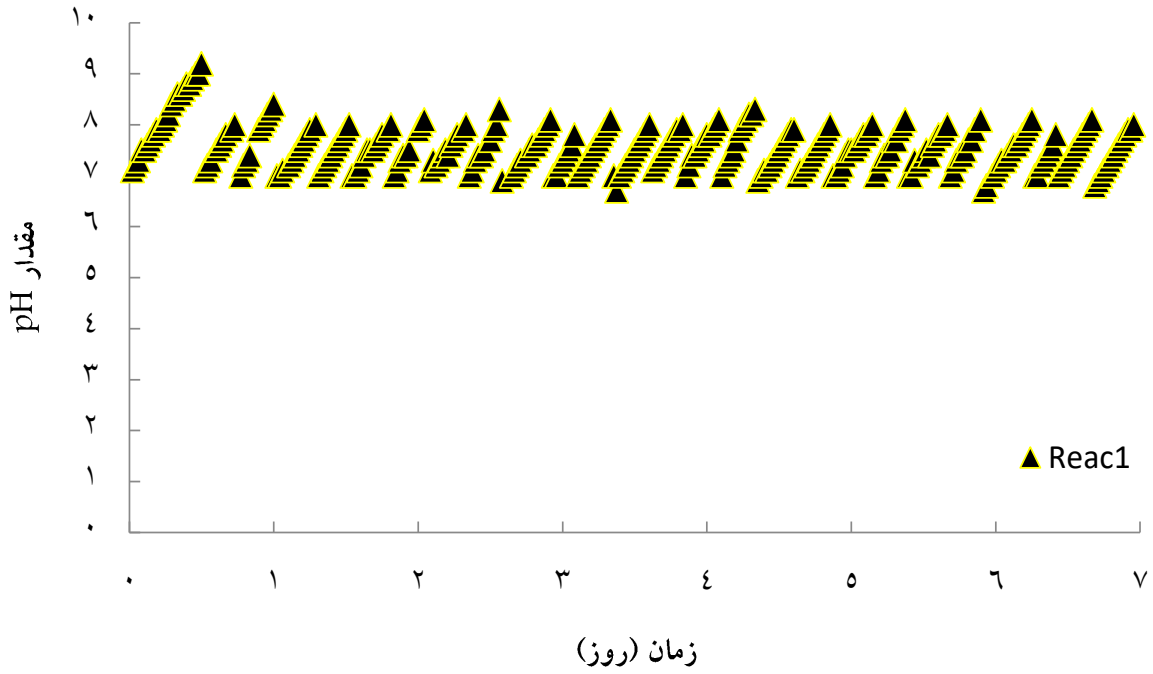
_ *تغییرات pH آنولیت و کاتولیت*

مقدار pH آنولیت و کاتولیت در ابتدای آزمایشات (آب مقطر) اندازه گیری و مقدار ۷±۰/۰۲ در هر دو نمونه قرائت گردید. تغییرات pH آنولیت و کاتولیت در سه راکتور در نمودارهای ۱ تا ۶ نمایش داده شده است. به محض برقراری جریان الکتریکی در هر راکتور، در نتیجه الکترولیز آب، یون‌های H^+ و OH^- به ترتیب در محفظه آندی و کاتدی تولید شده و سبب ایجاد به ترتیب محیط‌های اسیدی و قلیایی می‌گردد (۲۱). میانگین مقادیر pH آنولیت در بازه‌های زمانی min ۳۰ به ترتیب در راکتورهای ۱، ۲ و ۳ برابر با ۳/۲۶، ۳/۲۳ و ۳/۲۶ اندازه گیری شد. این مساله بیانگر سیر نزولی مقدار pH در محفظه آندی کلیه راکتورها بود. از سوی دیگر مقادیر pH کاتولیت نسبت به مقدار اولیه با افزایش روبرو شده و به ترتیب در راکتورهای ۱، ۲ و ۳ به مقدار ۷/۴۴ و ۷/۴۶ و ۷/۳۲، در راکتورها رسید. مطابق اندازه‌گیری‌های به‌دست آمده، pH آنولیت در مدت زمان ۷ روز در تمامی راکتورها به تدریج کاهش و pH کاتولیت افزایش یافت که همواره سعی بر کنترل آن در محدوده خنثی بود، چرا که افزایش pH در نزدیکی الکترود کاتد سبب ایجاد پدیده سیمانی شدن و ممانعت از حرکت یون‌های فلز سنگین در داخل نمونه خاک به سمت محفظه کاتدی می‌گردد (۱۵، ۲۲، ۲۳). در این تحقیق کنترل و تعدیل pH در طول نمونه خاک با استفاده از بافرفسفات و تزریق در مخازن محلول‌های آنولیت و کاتولیت انجام شد تا مانع از تغییرات شدید و ناگهانی pH و شرایط سیمانی شدن در محدوده کاتد گردد.

[Downloaded from ijhe.tums.ac.ir on 2026-11-04]

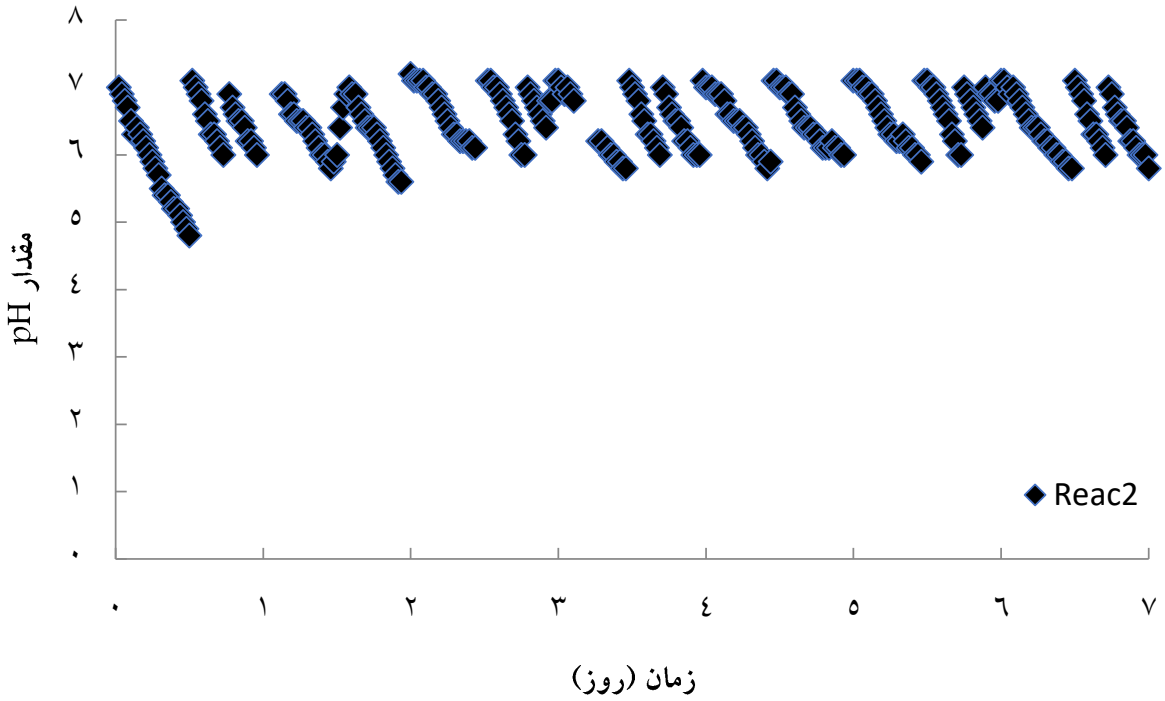


نمودار ۱- تغییرات pH آنولیت نمونه cm ۵ در ولتاژ ثابت ۱۰ ولت

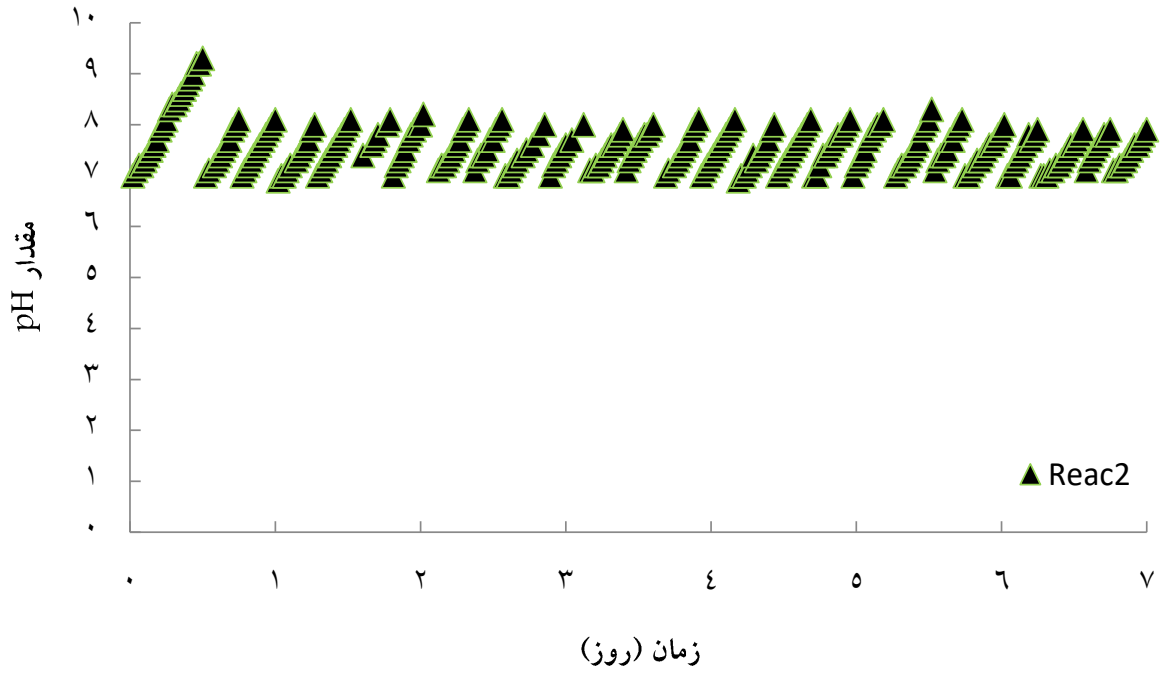


نمودار ۲- تغییرات pH کاتولیت نمونه cm ۵ در ولتاژ ثابت ۱۰ ولت

[Downloaded from ijhe.tums.ac.ir on 2026-11-04]

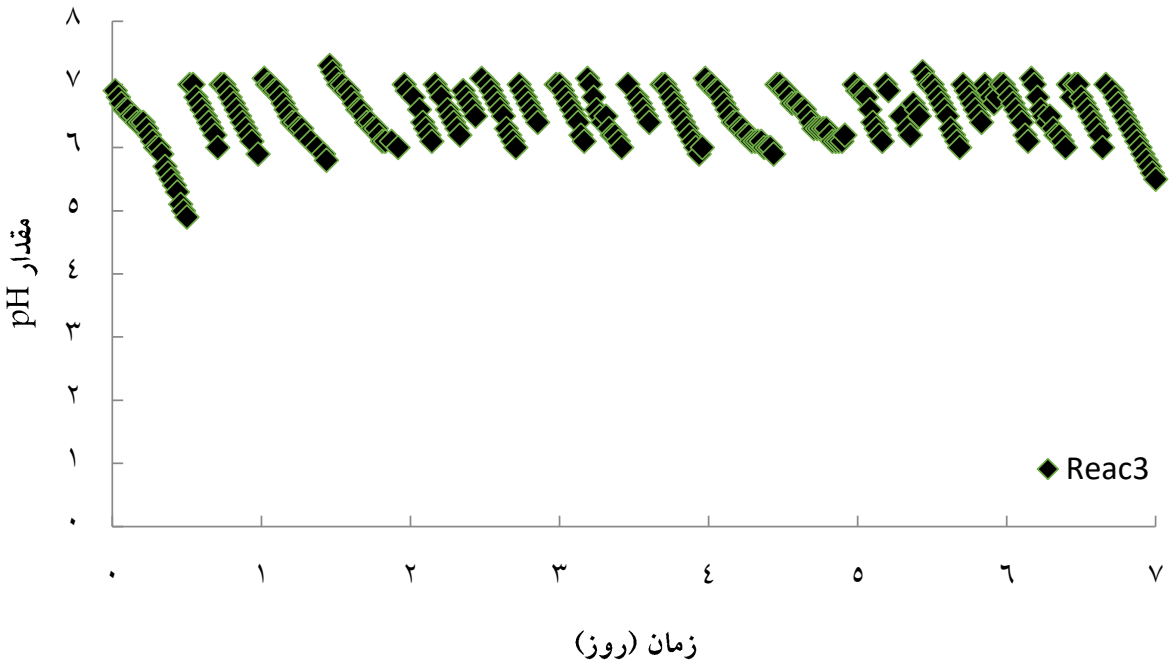


نمودار ۳- تغییرات pH آنولیت نمونهcm ۱۰ در ولتاژ ثابت ۱۰ ولت

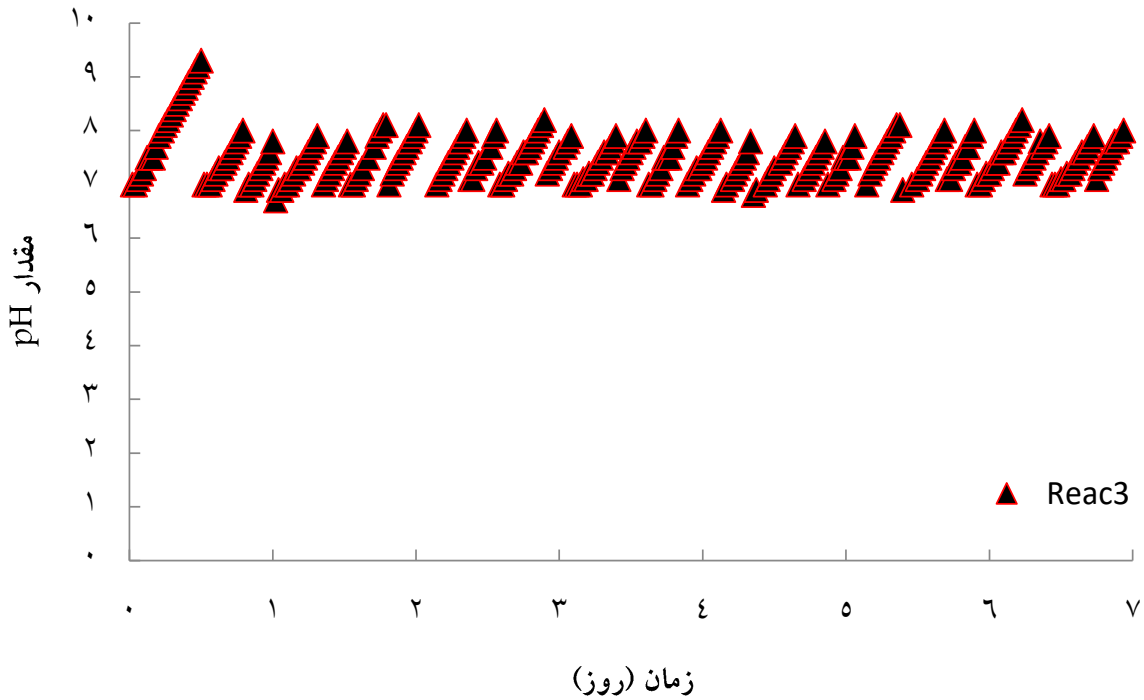


نمودار ۴- تغییرات pH کاتولیت نمونهcm ۱۰ در ولتاژ ثابت ۱۰ ولت

[Downloaded from ijhe.tums.ac.ir on 2026-11-04]



نمودار ۵- تغییرات pH آنولیت نمونه cm ۱۵ در ولتاژ ثابت ۱۰ ولت

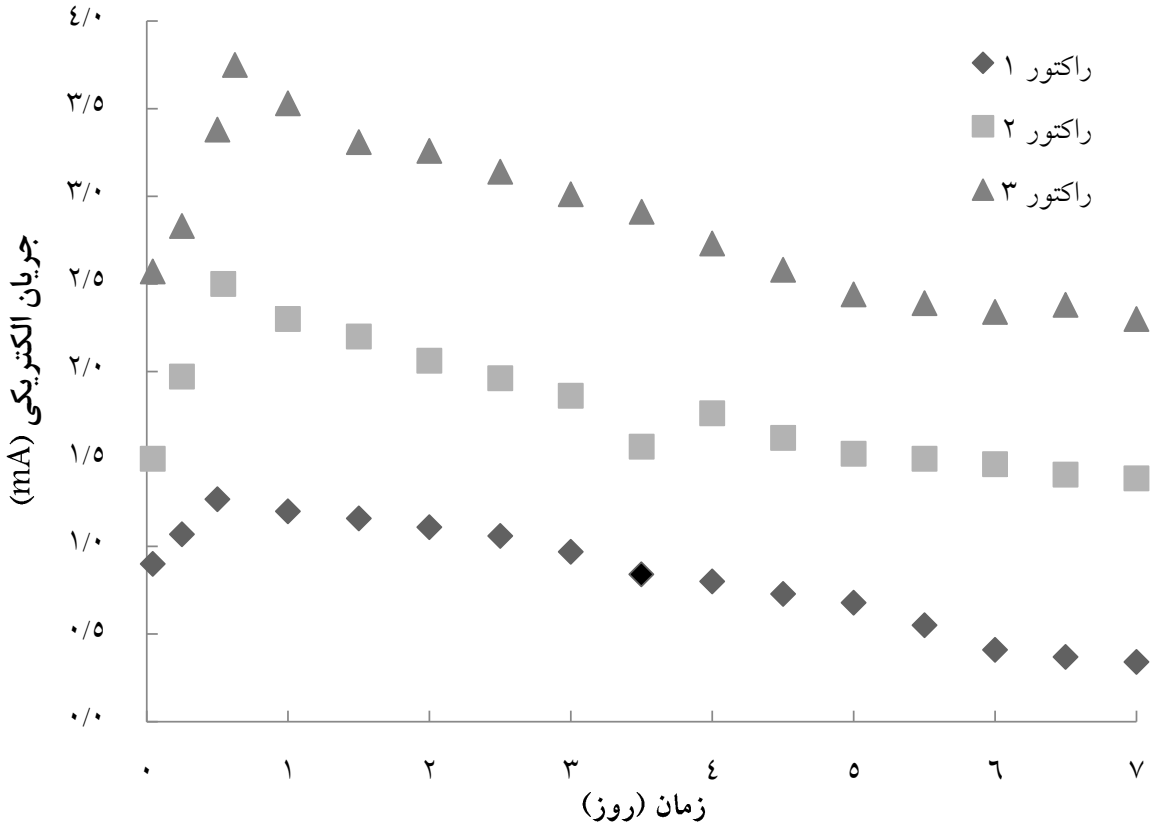


نمودار ۶- تغییرات pH کاتولیت نمونه cm ۱۵ در ولتاژ ثابت ۱۰ ولت

[Downloaded from ijhe.tums.ac.ir on 2026-11-04]

_ *تغییرات میزان جریان در طول آزمایش*

در این مرحله میزان تغییرات جریان در هر سه راکتور بررسی شد. نتایج حاصل از تحقیق نشان داد که میزان جریان الکتریکی اندازه گیری شده، همواره نوساناتی را به همراه داشته که می‌تواند به دلیل نوع بافت خاک و همچنین یون‌های موجود در آن باشد که سبب ایجاد نوسان در میزان جریان حاکم بر سیستم شده است. همگام با گذشت زمان و پیشرفت فرایند EKR، مقدار جریان الکتریکی کاهش یافته است (نمودار ۷).

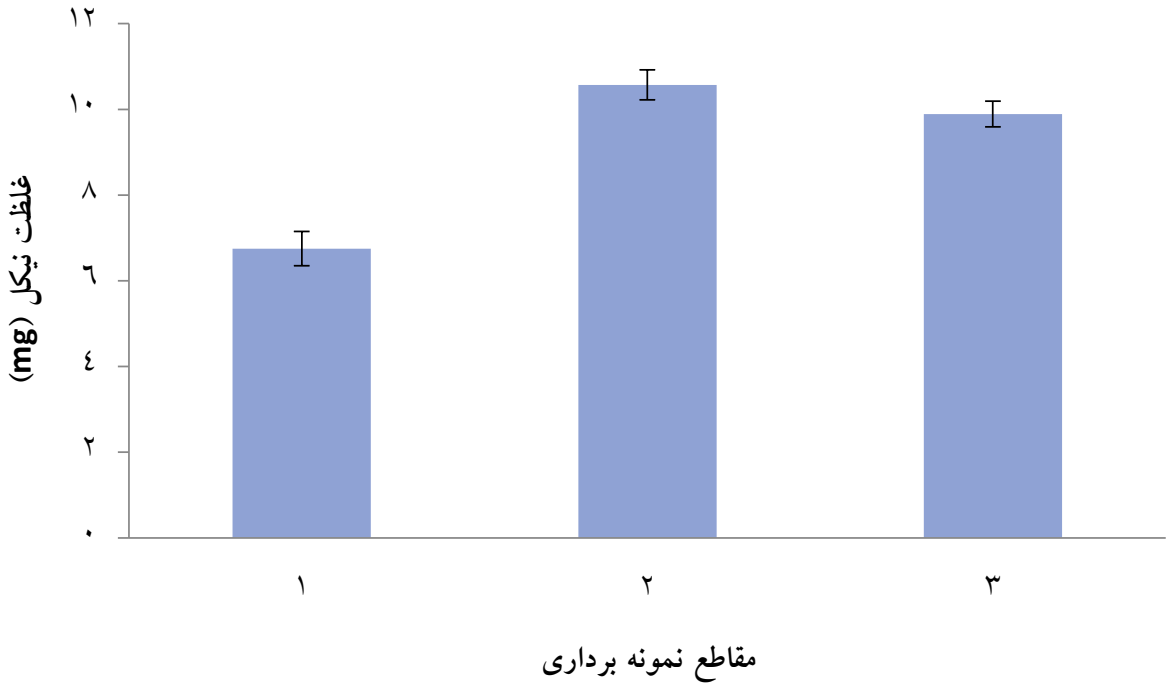


نمودار ۷- تغییرات جریان الکتریکی در سه راکتور ۱، ۲ و ۳

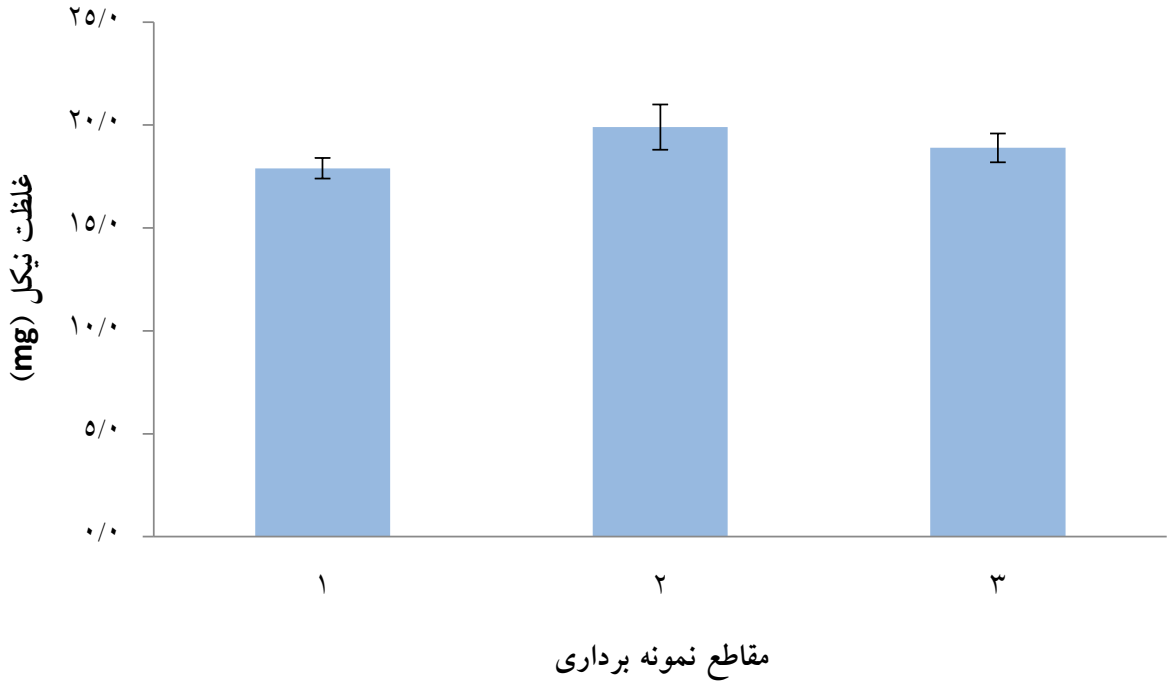
_ *میزان جابجایی فلز سنگین نیکل*

اعمال میدان الکتریکی در نمونه‌های خاک در بازه زمانی مشخص، سبب ایجاد فرایندهای الکتروکینتیکی در نمونه خاک آلوده به نیکل گردید. مکانسیم‌های فرایند EKR سبب حرکت ذرات دارای بار و آب میان حفره‌ای شد. در پایان فرایند (گذشت مدت زمان ۷ روز)، توزیع نیکل در سه مقطع مختلف نمونه خاک اندازه‌گیری و در نمودارهای ۸ تا ۱۰ در راکتورهای ۱، ۲ و ۳ ارائه گردید. نتایج نشان داد که در طول آزمایشات، نیکل در تمام نمونه‌ها به صورت پیوسته از ناحیه آند به سمت ناحیه کاتد جابجا شده است.

[Downloaded from ijhe.tums.ac.ir on 2026-11-04]

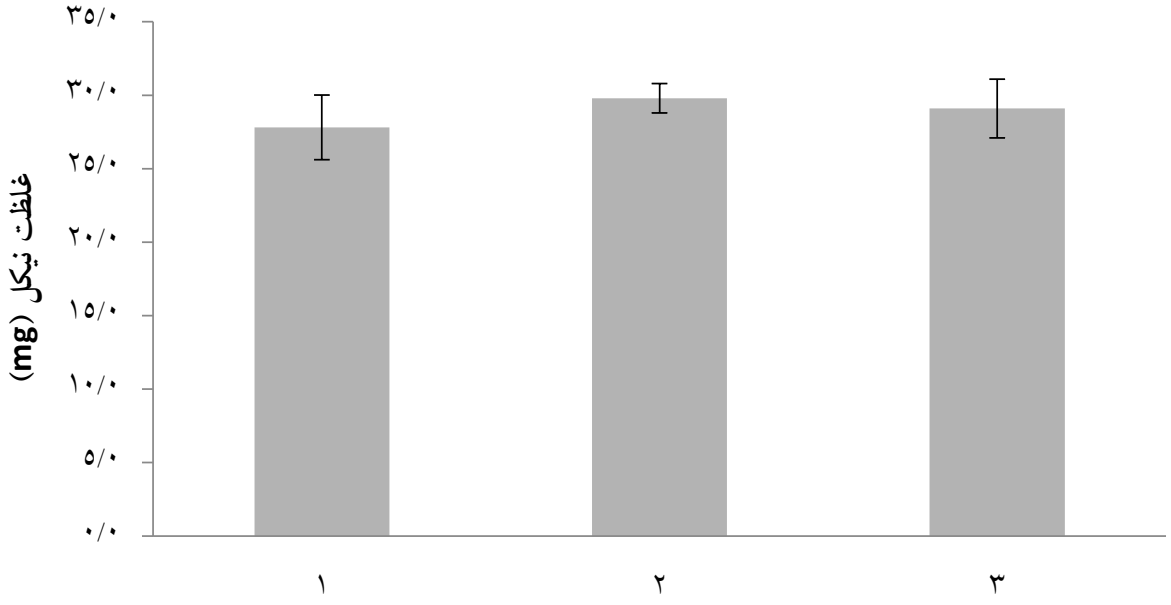


نمودار ۸- نیکل باقیمانده در مقاطع مختلف خاک پس از فرایند الکتروکینیک در راکتور ۱



نمودار ۹- نیکل باقیمانده در مقاطع مختلف خاک پس از فرایند الکتروکینیک در راکتور ۲

[Downloaded from ijhe.tums.ac.ir on 2026-11-04]



نمودار ۱۰- نیکل باقیمانده در مقاطع مختلف خاک پس از فرایند الکتروکینیک در راکتور ۳

نتایج نشان داد که کمترین میزان غلظت نیکل در راکتور شماره ۱ به ترتیب در ناحیه کاتد و ناحیه آند به مقدار mg/kg ۹/۸۹ و ۶/۷۵ مشاهده شد. به این ترتیب مقدار حذف نیکل از نمونه خاک در نزدیکی کاتد در راکتور شماره ۱ برابر با ۹۰/۸۴ درصد، در راکتور شماره ۲ برابر ۸۲/۵۱ درصد و در راکتور شماره ۳ برابر با ۷۳/۰۶ درصد بوده است. همچنین بررسی نتایج موازنه جرمی فلز سنگین نیکل (جدول ۵) نشان داد که احتمالا به دلیل جذب بخشی از نیکل در میان ماتریکس خاک امکان جداسازی و قرائت آن بخش از نیکل توسط دستگاه وجود نداشته است که البته این مقدار بسیار ناچیز است.

جدول ۵- نتایج موازنه جرمی و راندمان حذف فلز سنگین نیکل

شماره آزمایش	باقیمانده در کاتولیت (mg)	باقیمانده در ناحیه نزدیک به کاتد (mg)	باقیمانده در ناحیه وسط (mg)	باقیمانده در ناحیه نزدیک به آند (mg)	نتیجه موازنه جرمی (درصد)
۱	۰/۰٤٦	۹/۸۹	۱۰/۵۷	٦/۷۵	۸۵/۱۷۵
۲	۰/۲	۱۸/۸۹	۱۹/۹۰	۱۷/۹	۷۹/۰۱
۳	۰/٤۲	۲۹/۰۹	۲۹/۷۹	۲۷/۸۱	۸۲/۹٦

[Downloaded from ijhe.tums.ac.ir on 2026-11-04]

بحث

برقراری جریان الکتریکی در نمونه‌های تحت آزمایش، سبب ایجاد مکانیسم‌های EKR در نمونه خاک آلوده گردید. مطابق یافته‌های به‌دست آمده در این تحقیق، مکانیسم الکترولیز منجر به تغییرات pH در هر سه راکتور - به ترتیب کاهش و افزایش در محفظه‌های آندی و کاتدی- شد. تجمع پروتون در محفظه آند و یون هیدروکسیل در محفظه کاتد، دلیل اصلی تغییرات pH آنولیت و کاتولیت در راکتورهای مورد بررسی بود. در واقع، یکی از ساز و کارهای فرایند EKR، مهاجرت الکتریکی یا انتقال یون‌ها است که سبب می‌شود، یون هیدروژن و هیدروکسیلی که به ترتیب در آند و کاتد تولید شده، سبب ایجاد شرایط اسیدی و قلیایی در محیط خاک شوند. جبهه اسیدی و بازی در طول نمونه خاک توسعه پیدا کرده و سبب تغییرات pH در آن می‌شود و از آنجائی‌که یکی از محدودیت اصلی در فرایند EKR ایجاد شرایط قلیایی در نزدیکی ناحیه کاتد و رسوب فلزات در ماتریکس خاک است، کنترل pH به صورت مداوم انجام شد. حرکت جبهه اسیدی و بازی و همچنین کنترل pH در خاک، در تحقیق Kebria و همکاران (۲۱)، Acar و همکاران (۲۴)، Khodadadi و همکاران (۲۵) ، Li و همکاران (۲۶) و همچنین Tang و همکاران (۱۵) اشاره شده است.

جریان الکتریکی، در ابتدای هر سه آزمایش دارای مقدار اولیه mA ۰/۹، ۱/۵ و ۲/۵۷ به ترتیب در راکتور۱، ۲ و ۳ بوده است که علت آن می‌تواند ناشی از حضور مقدار زیاد یون‌ها در مایع منفذی خاک در شروع آزمایش دانست. در تحقیقات Taghizadeh و همکاران (۲۷) نشان داده شد که هنگام مهاجرت یون‌ها به سمت الکترودهای ناهمنام، همزمان با رسوب یون‌ها بر روی سطح خاک، جریان به طور ناگهانی کاهش یافت. هر چه حرکت یون‌ها در طول نمونه از آزادی بیشتری برخوردار بوده و تحرک بیشتری داشته باشند، میزان جریان الکتریکی اندازه گیری شده توسط سیستم نیز بالاتر و پایدارتر خواهد بود. به نظر می‌رسد در راکتور ۳، به دلیل بالاتر بودن گرادیان ولتاژ، گسترش سریع جبهه اسیدی و حرکت فلز سنگین نیکل در طول نمونه، میزان جریان الکتریکی موجود در سیستم بیشتر بوده است، این در حالیست که در راکتور شماره ۱ به دلیل کمتر بودن گرادیان ولتاژ و کاهش گسترش جبهه اسیدی، یون‌های فلزات نتوانسته‌اند به طور کامل خود را به منطقه کاتد و محفظه کاتولیت برسانند. همچنین بنظر رسید که حضور آنولیت و کاتولیت در دو سر نمونه، کاهش هدایت الکتریکی و همچنین به دام افتادن فلز سنگین نیکل در نزدیکی کاتد منجر به افزایش مقاومت در درون نمونه خاک و کاهش جریان الکتریکی در طول مدت آزمایش و پایان آن بوده است که در تحقیقات Li و همکاران (۲۶) نیز منعکس گردیده است. به محض برقراری جریان الکتریکی، مکانسیم‌های EKR سبب حرکت ذرات دارای بار و آب میان حفره‌ای گردید. کاهش pH خاک در نزدیکی آند سبب تبادل کاتیونی هیدروژن با آلاینده جذب شده بر روی سطح رسوب شده که این مساله، منجر به آزاد شدن آلاینده و مشخصا در این تحقیق آزاد شدن یون نیکل گردیده است. پس از برقراری جریان در راکتورها، مکانیسم‌های EKR شامل الکترولیز، الکترواسمز و مهاجرت الکتریکی به وقوع پیوستند. همانطور که پیشتر ذکر شد، pH به عنوان یک فاکتور کلیدی در مهاجرت نیکل از کاتد به آند به شمار می‌رود. بر اساس پروفیل غلظت آلاینده نشان داده شده در نمودارهای ۸ تا ۱۰ برای نمونه خاک آلوده، غلظت نیکل در نزدیکی آند کمتر و در نزدیکی کاتد دارای مقداری بالاتر است. این تفاوت غلظت در دو ناحیه آند و کاتد به وضوح بیانگر جابجایی و مهاجرت نیکل از آند به سمت کاتد است که در تحقیقات Tang و همکاران (۱۵) و همچنین Reddy و همکاران (۷) نیز مشاهده شد. به محض حذف نیکل از روی سطح ذرات خاک، غلظت یون هیدروژن در حجم منافذ زیاد می‌شود و بنابراین هدایت الکتریکی و همچنین جریان الکتریکی افزایش می‌یابد (۴). نتایج نشان می‌دهد که مقدار قابل توجهی از نیکل به سمت کاتد مهاجرت کرده است. این احتمال وجود دارد که به دلیل، pH بالای خاک در نزدیکی کاتد، نیکل به شکل هیدروکسید یا کربنات، در میان ذرات خاک، رسوب کرده و در ماتریکس خاک در ناحیه کاتد به دام افتاده باشد (۷). هر چند در راکتور ۱، با طول نمونه کوتاهتر، گرادیان الکتریکی کمتری وجود داشته

[Downloaded from ijhe.tums.ac.ir on 2026-11-04]

است ولی به دلیل پایین‌تر بودن جریان الکتریکی حاصله هجوم جبهه بازی به سمت آند از شدت کمتری برخوردار بوده و در نتیجه پدیده سیمانی شدن در این حالت رخ نداده است.

نتیجه‌گیری

دشت سیلاخور لرستان یکی از بزرگ‌ترین و هموارترین دشت‌های استان لرستان به شمار می‌رود که به جهت دارا بودن خاک بسیار حاصلخیز یکی از قطب‌های کشاورزی و باغداری منطقه غرب کشور است. در سال‌های اخیر کشت برنج در این منطقه، با استقبال بسیار زیاد روبرو شده است. با توجه به نیاز روز افزون مصرف کنندگان و توجه به سلامت و بهداشت مواد غذایی افراد، نیاز به بررسی و در صورت لزوم پاکسازی خاک با استفاده از روش‌های نوین و مقرون به صرفه در این منطقه احساس گردید. نتایج حاصل از انجام این تحقیق که بر روی خاک شالیزارهای دشت سیلاخور لرستان انجام گرفت، حاکی از موفقیت فرایند اصلاح الکتروکینتیک (EKR) بوده که منجر به جابجایی و حذف بخشی از آلاینده در حدود استاندارد سازمان حفاظت محیط زیست ایران از نمونه خاک شده است. با توجه به نتایج به‌دست آمده، بهترین راندمان حذف فلز سنگین نیکل در راکتور شماره ۱ و در ناحیه کاتد و آند به ترتیب برابر با ۹۰/۸۴ و ۹۳/۷۵ درصد حاصل شد. فرایند EKR به دلیل ویژگی‌های منحصر به فردی همچون ارزان بودن، مصرف کم انرژی الکتریکی، عدم استفاده از مواد شیمیایی در تماس مستقیم با خاک -که منجر به تغییر ویژگی و ساختار اصلی خاک شود-، هزینه اجرا، راهبری و نگهداری پایین، عدم نیاز به نیروی انسانی مستقر در محل و همچنین راندمان بالای حذف آلاینده‌ها، نسبت به سایر روش‌های اصلاح خاک برتری دارد. نتایج این آزمایش نشان داد که فرایند EKR می‌تواند سبب جابجایی فلز سنگین نیکل از محیط خاک‌های کشاورزی که ارتباط مستقیمی با سلامت انسان و سایر موجودات زنده دارد، گردد.

ملاحظات اخلاقی

نویسندگان کلیه نکات اخلاقی شامل عدم سرقت ادبی، انتشار دوگانه، تحریف داده‌ها و داده‌سازی را در این مقاله رعایت کرده‌اند.

تشکر و قدردانی

این مقاله حاصل بخشی از پایان نامه با عنوان "حذف فلز سنگین از خاک شالیزارهای دشت سیلاخور لرستان با استفاده از فرایند اصلاح الکتروکینتیک" در مقطع کارشناسی ارشد در سال ۱۳۹۹ است که با حمایت آزمایشگاه مهندسی عمران موسسه آموزش عالی آفرینش بروجرد و همچنین آزمایشگاه مهندسی محیط زیست دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل اجرا شده است.

References

1. Mohammadi Galangash M, Ghasemi Zolpirani R, Naimi Joubani M. Evaluation of roadside soils pollution with heavy metals (Pb, Ni, Cu, Zn) in the Rasht-Qazvin old road (Guilan province). Iranian Journal of Health and Environment. 2020;13(3):409-20 (in Persian).
2. Razavi M, Yousefi Kebria D, Ebrahimi A. Microbial fuel cell-enhanced electrokinetic process for remediation of chromium from marine sediments. Environmental Progress & Sustainable Energy. 2021;40(1):e13469.
3. Liu L, Li W, Song W, Guo M. Remediation techniques for heavy metal-contaminated soils: principles and applicability. Science of the Total Environment. 2018;633:206-19.
4. Virkutyte J, Sillanpää M, Latostenmaa P. Electrokinetic soil remediation—critical overview. Science of the Total Environment. 2002;289(1-3):97-121.
5. Almeira J, Peng C-S, Abou-Shady A. Simultaneous removal of cadmium from kaolin and catholyte during soil electrokinetic remediation. Desalination. 2012;300:1-11.
6. Buchireddy PR, Bricka RM, Gent DB. Electrokinetic remediation of wood preservative contaminated soil containing copper, chromium, and arsenic. Journal of Hazardous Materials. 2009;162(1):490-97.
7. Reddy KR, Parupudi US. Removal of chromium, nickel and cadmium from clays by in-situ electrokinetic

[Downloaded from ijhe.tums.ac.ir on 2026-11-04]

remediation. Soil and Sediment Contamination. 1997;6(4):391-407.
8. Sharma HD, Reddy KR. Geoenvironmental Engineering: Site Remediation, Waste Containment, and Emerging Waste Management Technologies. New York: John Wiley & Sons; 2004.
9. Acar YB, Alshawabkeh AN. Principles of electrokinetic remediation. Environmental Science & Technology. 1993;27(13):2638-47.
10. Ammami MT, Portet-Koltalo F, Benamar A, Duclairoir-Poc C, Wang H, Le Derf F. Application of biosurfactants and periodic voltage gradient for enhanced electrokinetic remediation of metals and PAHs in dredged marine sediments. Chemosphere. 2015;125:1-8.
11. Suanon F, Tang L, Sheng H, Fu Y, Xiang L, Herzberger A, et al. TW80 and GLDA-enhanced oxidation under electrokinetic remediation for aged contaminated-soil: Does it worth? Chemical Engineering Journal. 2020;385:123934.
12. Singh J, Kalamdhad AS. Effects of heavy metals on soil, plants, human health and aquatic life. International journal of Research in Chemistry and Environment. 2011;1(2):15-21.
13. Jaishankar M, Tseten T, Anbalagan N, Mathew BB, Beeregowda KN. Toxicity, mechanism and health effects of some heavy metals. Interdisciplinary toxicology. 2014;7(2):60-72.
14. Jan A, Azam M, Siddiqui K, Ali A, Choi I, Haq Q. Heavy metals and human health: mechanistic insight into toxicity and counter defense system of antioxidants. International Journal of Molecular Sciences. 2015;16(12):29592-630.
15. Tang J, He J, Tang H, Wang H, Sima W, Liang C, et al. Heavy metal removal effectiveness, flow direction and speciation variations in the sludge during the biosurfactant-enhanced electrokinetic remediation. Separation and Purification Technology. 2020;246:116918.
16. Bolan N, Kunhikrishnan A, Thangarajan R, Kumpiene J, Park J, Makino T, et al. Remediation of heavy metal (loid) s contaminated soils–to mobilize or to immobilize? Journal of Hazardous Materials. 2014;266:141-66.
17. Chen C, Zhang X, Chen J, Chen F, Li J, Chen Y, et al. Assessment of site contaminated soil remediation based on an input output life cycle assessment. Journal of Cleaner Production. 2020;263:121422.
18. Chen Z, Zhu B-K, Jia W-F, Liang J-H, Sun G-X. Can electrokinetic removal of metals from contaminated paddy soils be powered by microbial fuel cells? Environmental Technology & Innovation. 2015;3:63-67.
19. Falamaki A. Artificial neural network application for predicting soil distribution coefficient of nickel. Journal of Environmental Radioactivity. 2013;115:6-12.
20. Jewell CM, Hensley P, Barry D, Ackworth I. Site Investigation and Monitoring Techniques for Contaminated Sites and Potential Waste Disposal Sites. Boca Raton: CRC Press; 1993.
21. Kebria DY, Taghizadeh M, Camacho JV, Latifi N. Remediation of PCE contaminated clay soil by coupling electrokinetics with zero-valent iron permeable reactive barrier. Environmental Earth Sciences. 2016;75(8):699.
22. Razavi M, Yousefi Kebria D, Ebrahimi A. Microbial fuel cell-enhanced electrokinetic process for remediation of chromium from marine sediments. Environmental Progress & Sustainable Energy. 2020:e13469.
23. Razavi M, Yousefi Kebria D, Ebrahimi A. Electrokinetic and sediment remediation in microbial fuel cell. International Journal of Engineering. 2019;32:489-94.
24. Acar YB, Gale RJ, Alshawabkeh AN, Marks RE, Puppala S, Bricka M, et al. Electrokinetic remediation: basics and technology status. Journal of Hazardous Materials. 1995;40(2):117-37.
25. Khodadadi A, Yousefi D, Ganjidoust H, Yari M. Bioremediation of diesel-contaminated soil using Bacillus sp.(strain TMY-2) in soil by uniform and non-uniform electro kinetic technology field. Journal of Toxicology and Environmental Health Sciences. 2011;3(15):376-84.
26. Li H, Tian Y, Liu W, Long Y, Ye J, Li B, et al. Impact of electrokinetic remediation of heavy metal contamination on antibiotic resistance in soil. Environmental Science and Pollution Research International. 2020;400:125866.
27. Taghizadeh M, Yousefi Kebria D, Taghipor V. Effect of Electrokinetic Technology Integrated with Surfactants on the Chlorinated Hydrocarbons from Soil. Journal of Petroleum Research. 2015;25(81):158-68.

[Downloaded from ijhe.tums.ac.ir on 2026-11-04]

Available online: https://ijhe.tums.ac.ir

Orginal Article

Removal of nickel from paddy soil by electrokinetic reclamation process, a case study of Silakhor plain (Lorestan)

Mohsen Shaban[1], Daryoush Yousefi Kebria[2], Marzie Razavi[1,*]

1- Geotechnical Group, School of Civil Engineering, Borujerd Afarinesh Institute of Higher Education, Borujerd, Iran
2- Environmental Engineering Group, School of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of technology, Babol, Iran

ARTICLE INFORMATION:

Received: 03 April 2020
Revised: 02 June 2021
Accepted: 08 June 2021
Published: 21 June 2021

Keywords: Electrokinetic remediation, Anode and cathode electrodes, Agricultural soil, Nickel

***Corresponding Author:**
Marzie.Razavi@gmail.com

ABSTRACT

Background and Objective: Application of chemical fertilizers in agricultural industry is known as one of the methods of crop enhancement. However, chemical fertilizers application can lead to an increased risk of chemical pollutants entering the human food cycle. The aim of current research was feasibility study and evaluation of nickel from paddy soils in Lorestan province.

Materials and Methods: Sampling was done from 15 stations and randomly from rice cultivation areas in Silakhor plain of Lorestan province. Then, electrokinetic modification method was carried out in three reactors with lengths of 5, 10 and 15cm. After sample preparation, the initial and final concentration of nickel were measured and calculated using inductively coupled plasma - optical emission spectrometry (ICP-OES).

Results: The results showed that electrokinetic modification method was effective in reducing the concentration of heavy metals in agricultural soil samples and reduced the amount of nickel in soil to the permissible limits of the Iranian soil national standards (50 mg/kg). The initial values of nickel in paddy soil of composite samples were 108 mg/kg. Nickel maximum removal efficiency of 90.84% and 93.75% were observed in cathode and anode regions, respectively.

Conclusion: The health and quality of agricultural products depend on the use of safe soil within the limits of environmental standards. The results of this study showed that the EKR process is able to remove nickel from soil. As a result of the present process, nickel concentration has reached the permissible amount and even lower than the soil quality standard set by the Iranian Environmental Protection Agency.

Please cite this article as: Shaban M, Yousefi Kebria D, Razavi M. Removal of nickel from paddy soil by electrokinetic reclamation process, a case study of Silakhor plain (Lorestan). Iranian Journal of Health and Environment. 2021;14(1):35-50.

Copyright © 2021 Iranian Association of Environmental Health, and Tehran University of Medical Sciences. Published by Tehran University of Medical Sciences. This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/). Noncommercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.

[Downloaded from ijhe.tums.ac.ir on 2026-11-04]