

Regression Modeling of Heavy Metals Removal from Oily Wastewater Using Electro-fenton Process

Amir Hossein Manavi

Ph.D Candidate, Dept. of Environment,
Ha.C., Islamic Azad University,
Hamedan, Iran.

Mehrdad Cheraghi

*Professor, Dept. of Environment,
Ha.C., Islamic Azad University,
Hamedan, Iran. **(Corresponding
Author)** cheraghi_m@iau.ac.ir

Ali Mahdinia

Professor, Dept. of Ocean Science,
Iranian National Institute for
Oceanography and Atmospheric
Science, Tehran, Iran.

Bahareh Lorestani

Professor, Dept. of Environment, Ha.C.,
Islamic Azad University, Hamedan,
Iran.

Soheil Sobhanardakani

Professor, Dept. of Environment, Ha.C.,
Islamic Azad University, Hamedan,
Iran.

Abstract

Background and Objective: Heavy metals are among the most critical pollutants in industrial wastewater due to their toxicity, bioaccumulation, and persistence in the food chain. This study aimed to evaluate the efficiency of the Electro-Fenton process in removing heavy metals (Ni, V, Cd, and Pb) from petroleum wastewater of the Abadan refinery.

Materials and Methods: Experiments were designed using Response Surface Methodology (RSM) with Design-Expert software. The investigated variables included pH (4–6), reaction time (20–70 min), current density (20–60 mA/cm²), and electrode type (Fe-Fe and Al-Al). Final metal concentrations were measured using Atomic Absorption Spectroscopy (AAS), and regression modeling was applied to predict removal performance.

Results: The findings revealed that the highest removal efficiencies were obtained under optimal conditions (pH=6, reaction time =30min, current density=60 mA/cm², and aluminum electrodes). Under these conditions, removal efficiencies for nickel, vanadium, cadmium, and lead were 81%, 81.3%, 81.8%, and 86.7%, respectively. Statistical analysis showed that pH, reaction time, and electrode type had the most significant effects on the process, and the RSM model accurately predicted the variations ($R^2 \approx 0.9$).

Conclusion: The results demonstrate that the Electro-Fenton process using aluminum electrodes under controlled conditions is an effective method for removing heavy metals from petroleum wastewater and can be applied as an efficient and eco-friendly technology for industrial wastewater treatment.

Keywords: Electro-Fenton, Toxic Elements, Petroleum Wastewater, Response Surface Methodology, Atomic Absorption Spectroscopy

Open Access Policy: This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited. To view a copy of this licence, visit <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Received: 2025/03/25

Accepted: 2025/06/26

Doi:10.22038/jreh.2025.91569.1731

► **Citation:** Manavi A.H, Cheraghi M, Mahdinia A, Lorestani B, Sobhanardakani S. Regression Modeling of Heavy Metals Removal from Oily Wastewater Using Electro-fenton Process. *Journal of Research in Environmental Health*. 11(3):48-68.

مدل سازی رگرسیونی حذف فلزات سنگین از پساب نفتی با استفاده از فرآیند الکتروفتون

امیرحسین معنوی

دانشجوی دکتری تخصصی علوم و مهندسی محیط زیست، گروه محیط زیست، واحد همدان، دانشگاه آزاد اسلامی، همدان، ایران.

مهرداد چراغی

* استاد گروه محیط زیست، واحد همدان، دانشگاه آزاد اسلامی، همدان، ایران. (نویسنده مسئول)
cheraghi_m@iau.ac.ir

علی مهدی نیا

استاد پژوهشکده علوم اقیانوسی، پژوهشگاه ملی اقیانوس شناسی و علوم جوی، تهران، ایران.

بهاره لرستانی

استاد گروه محیط زیست، واحد همدان، دانشگاه آزاد اسلامی، همدان، ایران.

سهیل سبحان اردکانی

استاد گروه محیط زیست، واحد همدان، دانشگاه آزاد اسلامی، همدان، ایران.

چکیده

زمینه و هدف: ایران یکی از کشورهای دارای نخلستان های فراوان است و بایستی به دنبال راهکارهای مناسب در جهت استفاده از ضایعات لیگنوسلولزی درخت نخل باشیم. در این راستا پتانسیل تولید بیوگاز از ضایعات برگ درخت نخل به عنوان یک منبع در دسترس و بومی کشور بسیار ضروری است.

مواد و روش ها: اثر ترکیبی درصد اسیدسولفوریک در چهار سطح و زمان پیش فرآوری در دو سطح مورد بررسی قرار گرفت. همچنین اثر ترکیبی زمان ازن دهی در سه سطح و میزان رطوبت برگ درخت نخل در دو سطح بررسی گردید. تمامی آزمایشات در میزان بیوگاز و متان تولیدی بر مبنای فاکتوریل انجام شد و اثرات ساده و ترکیبی عوامل با نرم افزار SPSS 22 و آزمون دانکن تجزیه و تحلیل گردید.

یافته ها: حداکثر مقدار تولید روزانه بیوگاز با غلظت ۱٪ اسید ۵۴۰ میلی لیتر در لیتر و با ۴ ساعت ازن زنی ۴۴۰ میلی لیتر در لیتر به دست آمد. بر طبق مقدار متان جمععی تولید شده و مقدار مواد جامد فرار کاهش می توان گفت که با بهترین پیش فرآوری اسیدی می توان حدود ۳۷۴ میلی لیتر در گرم VS و ۱۷۳ میلی لیتر در گرم VS بیوگاز و متان خالص تولید کرد. در مقایسه با بهترین پیش فرآوری ازن می توان حدود ۱۷۵ میلی لیتر در گرم VS و ۶۴ میلی لیتر در گرم VS بیوگاز و متان خالص دست یافت.

نتیجه گیری: از منابع لیگنوسلولزی برگ های درخت نخل به خوبی می توان با پیش فرآوری مناسب در جهت تولید انرژی اقدام نمود. تحقیقات بیشتری در جهت ارزیابی روش های دیگر پیش فرآوری نیز ضروری است تا بهترین روش با بالاترین بازده تولید بیوگاز از این منبع ارزان و در دسترس به دست آید.

کلیدواژه ها: بیوگاز، متان، هضم بی هوازی، ضایعات لیگنوسلولزی، انرژی تجدیدپذیر، درخت نخل

◀ **استناد:** معنوی ا.ح، چراغی م، مهدی نیا ع، لرستانی ب، سبحان اردکانی س. مدل سازی رگرسیونی حذف فلزات سنگین از پساب نفتی با استفاده از فرآیند الکتروفتون. فصلنامه ی پژوهش در بهداشت محیط. پاییز ۱۴۰۴؛ ۱۱(۳): ۴۸-۶۸.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۰۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۰۵

نوع مقاله: پژوهشی

مقدمه

آلودگی محیط‌زیست ناشی از فلزات سنگین در پساب‌های صنعتی یکی از چالش‌های جدی محیط‌زیستی و بهداشتی محسوب می‌شود (۱). فلزات سنگینی مانند سرب^۱، کادمیوم^۲، نیکل^۳ و کروم^۴ به دلیل پایداری بالا و قابلیت تجمع در اکوسیستم‌های آبی و خاکی، تهدیدی جدی برای سلامت انسان، حیات‌وحش و اکوسیستم‌های طبیعی هستند (۲ و ۳). این فلزات در غلظت‌های بالا سمی بوده و ورود آن‌ها به زنجیره‌ی غذایی می‌تواند منجر به بروز مشکلات جدی بهداشتی از جمله بیماری‌های عصبی، نارسایی‌های کلیوی و انواع سرطان‌ها شود (۴). با توجه به مقاومت طبیعی این فلزات در برابر تجزیه، حذف آن‌ها از پساب‌های صنعتی، به ویژه پساب‌های نفتی، امری ضروری و پیچیده است (۵).

پساب‌های نفتی علاوه بر فلزات سنگین، حاوی ترکیبات آلی پیچیده و پایدار مانند هیدروکربن‌ها، فنل‌ها و دیگر مواد آلی مقاوم هستند که تجزیه و حذف آن‌ها از محیط‌زیست به سادگی امکان‌پذیر نیست (۶). روش‌های سنتی تصفیه، از جمله ترسیب شیمیایی، فیلتراسیون و جذب سطحی، با محدودیت‌هایی مانند تولید حجم زیاد لجن، هزینه‌های بالا و کارایی پایین در غلظت‌های کم آلاینده‌ها مواجه هستند (۵).

در این راستا، روش‌های الکتروشیمیایی، به ویژه فرآیند الکتروفتون، به دلیل توان بالای اکسیداسیون و تولید رادیکال‌های آزاد هیدروکسیل ($OH^\bullet$) که قدرت بالایی در تجزیه‌ی آلاینده‌ها دارند، به عنوان یک گزینه مؤثر برای حذف آلاینده‌های آلی و معدنی مطرح شده‌اند (۷). مطالعات نشان داده‌اند که رادیکال‌های هیدروکسیل می‌توانند پیوندهای شیمیایی پیچیده ترکیبات آلی و فلزات سنگین را شکسته و آن‌ها را به ترکیبات ساده‌تر و بی‌ضرر تبدیل کنند (۸). برای مثال، تحقیقات اخیر بیانگر موفقیت این روش در حذف آلاینده‌های پیچیده مانند فنول و فلزات سنگین از پساب‌های صنعتی است (۹ و ۱۰). این روش ترکیبی از فرآیند الکترولیز و استفاده از پراکسید هیدروژن^۵ است که به تولید رادیکال‌های

هیدروکسیل می‌پردازد. این رادیکال‌ها می‌توانند فلزات سنگین موجود در پساب‌ها را اکسید و حذف کنند. روش‌های مختلف شیمیایی، زیستی و فیزیکی برای حذف فلزات سنگین از پساب‌ها توسعه یافته‌اند (۱۱)، اما فرآیند الکتروفتون به دلیل مزایایی مانند کارایی بالا، توانایی حذف همزمان آلاینده‌های آلی و فلزی و قابلیت تنظیم شرایط عملیاتی، توجه بیشتری را به خود جلب کرده است (۱۲ و ۱۳). به عنوان مثال، مطالعه‌ای توسط نیدش و همکاران (۲۰۲۳) نشان داد که این روش قادر است بیش از ۹۰٪ فلزات سنگین را از پساب‌های صنعتی حذف کند (۱۳). با این حال، هم‌چنان نیاز به تحقیقات بیشتر برای بهینه‌سازی شرایط عملیاتی و ارائه مدل‌های دقیق پیش‌بینی عملکرد فرآیند احساس می‌شود.

با توجه به افزایش حجم تولید پساب‌های صنعتی، به ویژه در صنایع نفت و گاز، توسعه و بهبود روش‌های تصفیه کارآمد، پایدار و مقرون به صرفه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (۱۴). فرآیند الکتروفتون با توانایی اکسیداسیون پیشرفته و تولید رادیکال‌های هیدروکسیل، روشی کارآمد و اقتصادی برای حذف همزمان آلاینده‌های فلزی و آلی محسوب می‌شود.

این تحقیق با هدف مدل‌سازی رگرسیونی و بهینه‌سازی شرایط عملیاتی فرآیند الکتروفتون برای حذف فلزات سنگین از پساب نفتی انجام شده است. انتظار می‌رود نتایج آن بتواند به ارائه‌ی راهکاری مؤثرتر، اقتصادی‌تر و سازگار با محیط‌زیست برای تصفیه پساب‌های صنعتی کمک کند و اثرات مخرب این آلاینده‌ها را کاهش دهد.

روش کار

فلزات سنگین مانند نیکل، وانادیوم، کادمیوم و سرب به دلیل ویژگی‌های سمی و تجمع‌پذیری خود در محیط‌زیست و سیستم‌های زیستی، به یکی از معضلات مهم در تصفیه پساب‌های صنعتی تبدیل شده‌اند. این تحقیق به بررسی اثرات روش‌های نوین الکتروفتون^۶ برای حذف این فلزات سنگین از پساب نفتی پالایشگاه آبادان می‌پردازد. در این مطالعه به منظور حذف فلزات سنگین نیکل، وانادیوم، کادمیوم و سرب از پساب نفتی، از روش الکتروفتون استفاده شده است. این روش به دلیل قابلیت

^۱ Pb

^۲ Cd

^۳ Ni

^۴ Cr

^۵ H₂O₂

^۶ Electro-Fenton

فاضلاب (۳) انجام شد تا صحت و دقت داده ها در تحلیل های بعدی تضمین شود.

اجرای فرآیند الکتروفتون

فرآیند الکتروفتون به عنوان روشی کارآمد برای تولید رادیکال های هیدروکسیل با قابلیت اکسیداسیون بالا استفاده شد. در این روش، الکترودهای آند و کاتد به محلول پساب اضافه شدند و جریان الکتریکی از سیستم عبور داده شد.

آماده سازی الکترولیت: محلول حاوی یون های Fe^{2+} به عنوان کاتالیست به محلول اضافه شد. در پایلوت مورد نظر الکترودهای آلومینیوم در فرآیند انعقاد الکتریکی و الکترودهای آهن و آلومینیوم برای الکتروفتون به ترتیب با ابعاد $50 \times 10 \times 0.1$ سانتی متر استفاده می شود. آند و کاتد به صورت عمودی و موازی با یکدیگر با فاصله بین دو سانتی متر قرار گرفت. در هر مرحله آهن به عنوان آند و کاتد، آهن آند و آلومینیوم کاتد و آلومینیوم به صورت آند و آهن به عنوان کاتد چهار مرحله از متغیر الکترودها را تعیین می کند.

در این تحقیق، مقدار تزریق پراکسید هیدروژن بر اساس شرایط بهینه ی فرآیند الکتروفتون و به منظور دستیابی به بیشترین کارایی حذف فلزات سنگین تنظیم شد. دوز تزریق H_2O_2 توسط دوزینگ پمپ به صورت پیوسته به راکتور افزوده شد و غلظت آن در محدوده ۵۰ تا ۱۵۰ میلی مول در لیتر متغیر بود. در آزمایش های اولیه، نسبت مولی پراکسید هیدروژن به آهن برابر ۱۰:۱ در نظر گرفته شد و به تدریج تا نسبت ۲۰:۱ افزایش یافت تا شرایط بهینه تولید رادیکال های هیدروکسیل حاصل شود.

استفاده از الکترودهای آهن-آهن (Fe-Fe)

در این تحقیق، یکی از ترکیب های الکترودی مورد استفاده، الکترودهای آهن به عنوان آند و کاتد بود. این انتخاب به دلیل ویژگی های اکسیدکنندگی آهن و قابلیت تولید یون های Fe^{2+} و Fe^{3+} در محلول پساب است که به شکل کارآمدی می توانند با رادیکال های هیدروکسیل واکنش داده و آلاینده های فلزی را اکسید و حذف کنند. الکترودهای آهن به ویژه در شرایطی که نیاز به افزایش نرخ واکنش اکسیداسیون وجود دارد، مناسب هستند و با تولید هیدروکسید های آهن باعث انعقاد و رسوب گذاری فلزات سنگین می شوند.

بالا در تولید رادیکال های هیدروکسیل، به عنوان یک راهکار نوین در تصفیه پساب صنعتی به کار گرفته شده است. این بخش شامل توصیف مراحل تحقیق از جمله آماده سازی نمونه ها، فرآیند الکتروفتون و اندازه گیری کارایی حذف فلزات است.

آماده سازی نمونه های پساب نفتی

نمونه های پساب مورد استفاده در این پژوهش از پالایشگاه آبادان و از پساب خروجی نهایی واحد تصفیه جمع آوری شدند تا نمونه هایی نماینده از وضعیت واقعی آلاینده های فلزی در جریان های مختلف پالایشگاهی به دست آید. در این فرآیند، نمونه برداری به صورت ترکیبی جریان تناسبی ۲۴ ساعته برای جریان های متغیر و به صورت نمونه گیری لحظه ای برای نقاط خاص فرایندی انجام شد. برای هر نقطه سه تکرار نمونه برداری به منظور افزایش دقت و اطمینان از قابلیت تکرار نتایج در نظر گرفته شد. تجهیزات نمونه برداری شامل بطری های پلی اتیلن اسیدشویی شده، پمپ نمونه گیر و فیلترهای $0.45 \mu m$ میکرون برای جداسازی بخش محلول فلزات بود و نمونه ها بلافاصله پس از برداشت با دقت کدگذاری و در فرم زنجیره نگهداری ثبت شدند.

در مرحله ی آماده سازی، نمونه ها پس از فیلتر شدن برای حذف ذرات معلق، با اسیدنیتریک غلیظ^۱ تا pH کمتر از ۲ پایدارسازی شدند تا از رسوب یا تغییر شیمیایی فلزات جلوگیری شود. سپس در دمای حدود چهار درجه ی سلسیوس در کول باکس حاوی یخ نگهداری و حداکثر طی سه ساعت به آزمایشگاه منتقل گردیدند. بخشی از پارامترهای فیزیکی از جمله pH، دما و کدورت بلافاصله در محل اندازه گیری شد تا از تغییرات احتمالی ناشی از زمان و دما جلوگیری گردد. برای کنترل کیفیت نمونه برداری، از نمونه های تکراری و نمونه های بلانک میدانی برای اطمینان از عدم آلودگی در حین برداشت استفاده شد.

در آزمایشگاه، نمونه ها ثبت و کدگذاری شده و بخشی از آن ها برای سنجش فلزات سنگین سرب، کادمیوم، نیکل، وانادیوم و سایر ویژگی های فیزیکی و شیمیایی مورد استفاده قرار گرفتند. تمامی مراحل نمونه برداری، نگهداری و انتقال مطابق با استانداردهای روش های آزمون آب و

^۱ HNO_3

استفاده از الکترودهای آلومینیوم-آلومینیوم (Al-Al)

ترکیب دیگر الکترودی مورد استفاده، آلومینیوم به‌عنوان آند و کاتد بود. الکترودهای آلومینیوم با انتشار یون‌های Al^{3+} در محلول، باعث تشکیل هیدروکسیدهای آلومینیوم می‌شوند که نقش منعقدکننده طبیعی را ایفا کرده و ذرات معلق و فلزات سنگین را جذب و حذف می‌کنند. این فرآیند نه‌تنها باعث حذف شیمیایی فلزات می‌شود، بلکه به کنترل pH و افزایش شفافیت پساب نیز کمک می‌کند. استفاده از آلومینیوم به‌ویژه در شرایطی که نیاز به کاهش کدورت و تثبیت فلزات حل شده وجود دارد، مزیت قابل توجهی دارد و ترکیب آن با فرآیند الکتروفتون می‌تواند کارایی کلی حذف فلزات سنگین را افزایش دهد.

سیم‌های مسی در یک انتها به منبع برق مستقیم^۱ و در انتهای دیگر توسط گیره‌های الکتریکی به الکترودها متصل خواهد شد. سپس جریان پیش‌بینی‌شده به آند و کاتد غوطه‌ور در مخزن اعمال خواهد شد. جریان و جریان سلول به‌صورت دوره‌ای با استفاده از مولتی‌متر اندازه‌گیری خواهد شد. محلول با استفاده از یک همزن مغناطیسی با سرعت ثابت به‌طور مداوم هم زده شد. pH فاضلاب با استفاده از pH متر اندازه‌گیری و با استفاده از محلول سدیم هیدروکسید ۰/۱ نرمال و اسید سولفوریک تنظیم شد. بازه pH به‌صورت خنثی، اسیدی و بازی آزمایش خواهد شد. در شرایط آزمایشی مورد نیاز، نمونه‌ها از راکتور EC جمع‌آوری و با استفاده از کاغذ صافی واتمن ۴۲ فیلتر شدند. از دوزینگ پمپ برای تزریق پراکسید هیدروژن (H_2O_2) استفاده خواهد شد. صفحات الکترودها قبل از هر بار اجرا با شستشو با آب مقطر به‌صورت فیزیکی تمیز شده و به‌دلیل کاهش کیفیت و همچنین پس از هر دو بار اجرا تعویض خواهد شد. کارایی حذف فلزات سنگین و مصرف انرژی راکتور EC به‌ترتیب تحت شرایط مختلف مانند pH، فاصله بین الکترودها و زمان واکنش مورد بررسی قرار گرفت. بازه‌ی pH شامل بازه ۴ تا ۶ بود.

زمان و جریان: زمان واکنش در چهار سطح مختلف (۲۰، ۳۰، ۵۰، ۷۰ دقیقه) و جریان در سه سطح (۲۰، ۴۰ و ۶۰ میلی‌آمپر بر سانتی‌مترمربع) تنظیم شد.

نوع الکترودها: دو نوع الکترودها Fe-Fe و Al-Al به‌طور

جداگانه و ترکیبی در فرآیند EC استفاده می‌شود. برای طراحی آزمایش با روش‌شناسی سطح پاسخ^۲، میزان متغیرهای مورد آزمایش استخراج شد. در جدول ۱ نتایج خروجی نرم‌افزار Design-Expert نشان شده است. جریان برق مستقیم با جریان ۲۰، ۴۰ و ۶۰ میلی‌آمپر بر سانتی‌مترمربع به الکترودها اعمال می‌شود. در طول آزمایش، محلول تحت همزن مغناطیسی با سرعت ثابت قرار خواهد گرفت. شکل (۱) نحوه عملکرد فرایند الکتروفتون با الکترودهای فلزی را نشان می‌دهد. این شکل شماتیک پیلوت آزمایشگاهی تحقیق بود.

۲-۱- اندازه‌گیری کارایی حذف فلزات سنگین

برای ارزیابی کارایی حذف فلزات سنگین، پس از پایان فرآیند الکتروفتون، نمونه‌های پساب برای اندازه‌گیری نهایی آماده شدند. در این بخش، از تکنیک‌های زیر استفاده شد:

اسپکتروفتومتری جذب اتمی: در این پژوهش، به‌منظور اندازه‌گیری دقیق غلظت فلزات سنگین Ni، V، Cd و Pb در نمونه‌های پساب نفتی، از دستگاه اسپکتروفتومتر جذب اتمی مدل شعله‌ای استفاده شد. روش اسپکتروفتومتری جذب اتمی شعله‌ای بر پایه اندازه‌گیری میزان جذب نور توسط اتم‌های آزاد شده از عنصر مورد نظر در یک شعله استوار است. در این روش، نمونه مایع پس از رقیق‌سازی و آماده‌سازی مناسب، به درون شعله هوا - استیلن تزریق می‌شود؛ در اثر دمای بالای شعله، فلزات موجود به اتم‌های آزاد تبدیل می‌شوند و هر عنصر در طول موج ویژه خود تابش جذب می‌کند. شدت جذب نوری که در طول موج اختصاصی هر عنصر (۲۳۲ نانومتر برای Ni، ۲۸۳/۳ نانومتر برای Pb، ۲۲۸/۸ نانومتر برای Cd و ۳۱۸/۵ نانومتر برای V) اندازه‌گیری می‌شود، متناسب با غلظت آن در نمونه است. برای هر عنصر از لامپ‌های کاتدی ویژه استفاده شد و پیش از اندازه‌گیری نمونه‌ها، منحنی استاندارد با محلول‌های استاندارد مرجع در محدوده غلظتی مشخص تهیه گردید. با توجه به ماهیت پساب نفتی و غلظت نسبتاً متوسط فلزات، روش شعله‌ای به‌دلیل دقت مناسب، هزینه‌ی

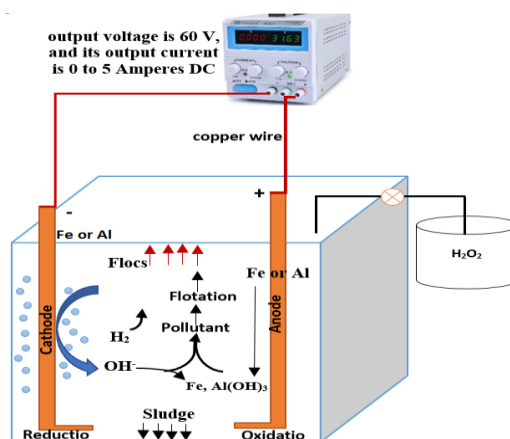
² Response Surface Methodology (RSM)

¹ Direct current

پایین تر و سهولت کاربری نسبت به روش کوره گرافیتی
انتخاب شد. تمامی اندازه گیری ها مطابق با آزمایشگاهی انجام گرفت.

جدول ۱. نتایج طراحی آزمایش بر اساس متغیرهای تحقیق

ردیف	pH	زمان (دقیقه)	جریان (mA/Cm ²)	الکترو
۱	۶	۲۰	۴۰	Fe-Fe
۲	۵	۵۰	۴۰	Fe-Fe
۳	۴	۵۰	۶۰	Al-Al
۴	۵	۷۰	۲۰	Fe-Fe
۵	۴	۲۰	۲۰	Fe-Fe
۶	۶	۳۰	۶۰	Al-Al
۷	۶	۷۰	۲۰	Al-Al
۸	۴	۷۰	۴۰	Fe-Fe
۹	۶	۷۰	۶۰	Fe-Fe
۱۰	۴	۲۰	۶۰	Al-Al
۱۱	۴	۲۰	۲۰	Al-Al



شکل ۱. واکنش های الکتروفتون و فرآیند تولید رادیکال های هیدروکسیل و نقش الکترودها

در این روش، فرض بر آن است که رابطه ای خطی بین متغیرهای مستقل و متغیر وابسته وجود دارد که به صورت زیر بیان می شود: معادله (۱)

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \varepsilon$$

که در آن:

- Y: متغیر وابسته (مانند درصد حذف فلز)
- $X_1, X_2, \dots, X_n$: متغیرهای مستقل (مانند pH، زمان، نوع الکترو، جریان)
- β_0 : عرض از مبدأ
- $\beta_1, \dots, \beta_n$: ضرایب رگرسیون که نشان دهنده ی تأثیر هر متغیر مستقل بر متغیر وابسته اند
- ε : خطای تصادفی مدل

اندازه گیری pH و کدورت: برای بررسی تغییرات pH و کاهش کدورت پساب در طی فرآیند، اندازه گیری های لازم انجام شد.

برای تحلیل روابط میان متغیرهای فرایندی و کارایی حذف فلزات سنگین، از مدل رگرسیون چندگانه خطی استفاده شد. این مدل آماری امکان بررسی تأثیر همزمان چندین متغیر مستقل (از جمله pH، زمان و واکنش، نوع الکترو و چگالی جریان الکتریکی) بر یک یا چند متغیر وابسته (مانند درصد حذف فلزات سنگین Ni، V، Cd و Pb) را فراهم می کند.

به‌طور گسترده‌ای مورد توجه قرار گرفته است. در این تحقیق، تأثیر چهار متغیر مهم بر فرآیند حذف فلزات سنگین شامل نیکل، وانادیوم، کادمیوم و سرب از پساب‌های صنعتی با استفاده از روش الکتروفتون و الکترودهای مختلف Fe-Fe و Al-Al بررسی شد. متغیرهای آزمایشی عبارت بودند از pH (۴ الی ۶)، زمان واکنش (۲۰، ۳۰، ۵۰، ۷۰ دقیقه)، جریان (۲۰، ۴۰، ۶۰ میلی‌آمپر بر سانتی‌مترمربع) و نوع الکترودها (Al- و Fe-Fe). (Al)

تحلیل‌های آماری

در این بخش، نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده برای حذف فلزات سنگین در شرایط مختلف ارائه می‌شود. برای هر فلز، غلظت اولیه و نهایی در شرایط مختلف آزمایش مشخص شده است. **جدول ۲** به تفکیک درصد حذف هر فلز تحت شرایط مختلف نشان داده می‌شود.

در شرایط pH بالاتر (۶)، کارایی حذف فلز نیکل نسبت به pH پایین‌تر (۴) افزایش یافته است که بیانگر تأثیر مثبت محیط قلیایی بر فرآیند حذف است. همچنین، زمان‌های واکنش طولانی‌تر مانند ۵۰ و ۷۰ دقیقه در مقایسه با زمان‌های کوتاه‌تر (۲۰ دقیقه)، عملکرد بهتری در کاهش غلظت نیکل داشته‌اند. استفاده از الکترودهای Al-Al نیز به‌طور کلی موجب افزایش کارایی حذف نسبت به الکترودهای Fe-Fe شده است. علاوه بر این، اعمال جریان بالاتر (۶۰ میلی‌آمپر بر سانتی‌مترمربع) منجر به بهبود قابل توجهی در کارایی حذف نیکل گردیده است.

شکل ۲ نمودار پراکنش رگرسیونی حذف فلز نیکل را برای تمامی متغیرهای مدل نشان می‌دهد. در این نمودار، محور افقی بیانگر باقیمانده‌های استاندارد رگرسیونی و محور عمودی نشان‌دهنده درصد حذف نیکل از پساب است. معادله‌ی خط رگرسیونی $y = 70.21 + 3.8x$ و مقدار ضریب تعیین $R^2 = 0.142$ بیانگر وجود رابطه‌ای مثبت اما بسیار ضعیف بین متغیرهای مدل و میزان حذف نیکل است.

پیش از اجرای مدل، فرضیات اصلی مدل رگرسیون از جمله نرمال بودن باقی‌مانده‌ها، نبود هم‌خطی چندگانه و یکنواختی واریانس خطاها بررسی می‌شوند (۱۵). برای تحلیل داده‌ها، از نرم‌افزار SPSS 26 استفاده شد و سطح معنی‌داری $p < 0.05$ به‌عنوان معیار پذیرش اثرگذاری متغیرها در نظر گرفته شد.

استفاده از رگرسیون چندگانه به دلیل سادگی، قابلیت تفسیر آسان و توانایی در مدل‌سازی داده‌های تجربی رایج بوده و در مطالعات مشابه در حوزه‌ی حذف آلاینده‌های آب نیز مورد استفاده قرار گرفته است (۱۶ و ۱۷).

محاسبه کارایی حذف

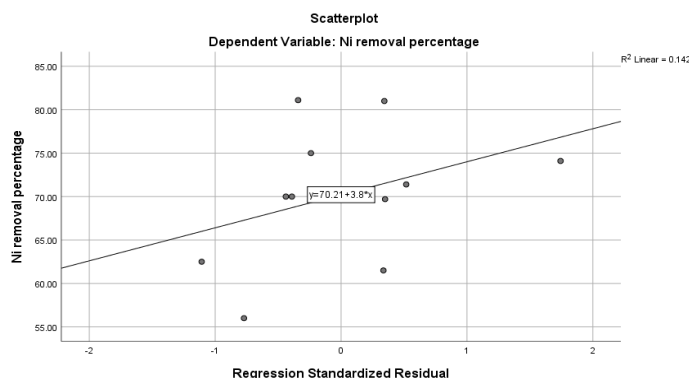
فرضیات اصلی مدل (نرمال بودن باقی‌مانده‌ها، نبود هم‌خطی، یکنواختی واریانس خطاها) قبل از اجرای مدل بررسی شدند. تحلیل داده‌ها با نرم‌افزار SPSS 26 انجام شد و سطح معنی‌داری $p < 0.05$ در نظر گرفته شد. تکرار آزمایش‌ها و خطا: تمامی آزمایش‌ها حداقل سه تکرار مستقل داشتند تا قابلیت اطمینان نتایج افزایش یابد. کارایی حذف فلزات سنگین: کارایی حذف فلزات سنگین از طریق مقایسه غلظت فلزات در پساب ورودی و خروجی محاسبه خواهد شد. همچنین تأثیر هر یک از عوامل pH، زمان، جریان ورودی و نوع الکترودها بر میزان حذف فلزات بررسی خواهد شد. انتظار می‌رود که استفاده از روش‌های الکتروفتون به‌طور مؤثری فلزات سنگین مورد مطالعه را از پساب‌های صنعتی حذف کند. همچنین، پیش‌بینی می‌شود که شرایط pH، زمان واکنش و نوع الکترودها تأثیر قابل توجهی بر میزان حذف فلزات سنگین داشته باشند.

یافته‌ها

حذف فلزات سنگین از پساب‌های صنعتی یکی از چالش‌های بزرگ در حوزه محیط‌زیست است که تأثیر زیادی بر سلامت انسانی و اکوسیستم‌های آبی دارد. استفاده از روش‌های نوین مانند الکتروفتون در فرایندهای تصفیه‌ی پساب‌های آلوده به فلزات سنگین

جدول ۲. درصد حذف عنصر نیکل

شرایط آزمایشی	pH	زمان (دقیقه)	جریان (میلی آمپر بر سانتیمتر مربع)	نوع الکترود	غلظت اولیه (mg/L)	غلظت نهایی (mg/L)	نرخ حذف (%)	میانگین	انحراف معیار	انحراف از میانگین
۱	۶	۲۰	۴۰	Fe-Fe	۱۰	۲/۵	۷۵	۷۰/۲	۷/۸	۲/۳۵
۲	۵	۵۰	۴۰	Fe-Fe	۱۲	۳/۶	۷۰			
۳	۴	۵۰	۶۰	Al-Al	۱۴	۴	۷۱/۴			
۴	۵	۷۰	۲۰	Fe-Fe	۱۱/۵	۳	۷۴/۱			
۵	۴	۲۰	۲۰	Fe-Fe	۱۳	۵	۶۱/۵			
۶	۶	۳۰	۶۰	Al-Al	۱۰/۵	۲	۸۱			
۷	۶	۷۰	۲۰	Al-Al	۱۰	۳	۷۰			
۸	۴	۷۰	۴۰	Fe-Fe	۱۲	۴/۵	۶۲/۵			
۹	۶	۷۰	۶۰	Fe-Fe	۹/۵	۱/۸	۸۱/۱			
۱۰	۴	۲۰	۶۰	Al-Al	۱۳/۲	۴	۶۹/۷			
۱۱	۴	۲۰	۲۰	Al-Al	۱۲/۵	۵/۵	۵۶			



شکل ۲. نمودار رگرسیونی حذف نیکل برای همه متغیرها

نیکل می شود. بنابراین، بهینه سازی زمان واکنش و انتخاب مناسب نوع الکترود می توانند به طور قابل توجهی کارایی حذف نیکل را افزایش دهند، در حالی که تنظیم جریان و pH به عنوان عوامل مکمل نقش مهمی ایفا می کنند. در نهایت معادله رگرسیونی حذف نیکل با توجه به جدول ۳ به صورت زیر بود.

تحلیل نتایج نشان داد که زمان واکنش و نوع الکترود قوی ترین تأثیر را بر کارایی حذف نیکل دارند، به طوری که ۹۲/۸٪ و ۹۹/۵٪ از تغییرات مربوطه را توضیح می دهند. جریان نیز با توضیح ۶۴/۷٪ از تغییرات، تأثیر متوسطی دارد و افزایش آن باعث بهبود کارایی می شود. در مقابل، pH با ضریب تعیین ۴۲/۱٪ کمترین تأثیر را داشت اما افزایش آن هم چنان موجب بهبود نسبی کارایی حذف

جدول ۳. نتایج معادلات رگرسیونی حذف نیکل

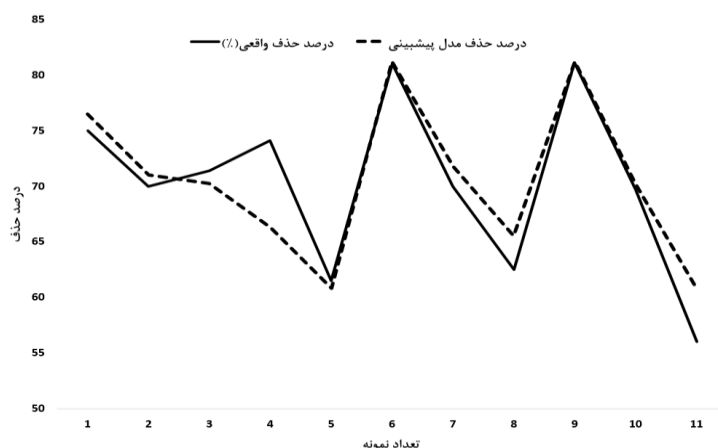
	B	Sig.
(Constant)	۳۴/۱۵	۰/۰۰۵
pH	۵/۴۸۴	۰/۰۱۵
Time(minute)	۰/۰۳۵	۰/۵۵۱
Voltage (mA/cm2)	۰/۲۳۶	۰/۰۱۵
Electrode	-۱/۲۹	۰/۶۱۸

جریان در حدود ۶۰ میلی‌آمپر بر سانتی‌مترمربع بوده، خطای مدل بسیار کمتر شده است.

در نتیجه مقادیر Sig معادله به‌صورت زیر است:

$$Y_{Ni} = pH(5.484) + voltage(0.236) + 34.149$$

با توجه به شکل ۳ در بررسی خطای مدل در فلز نیکل، در نقاط ۱، ۲، ۵، ۶، ۹ و ۱۰ مقادیر پیش‌بینی بسیار نزدیک مقادیر واقعی است. در نقاطی که مقادیر $pH = 6$ و



شکل ۳. نمودار مقایسه درصد حذف بین داده واقعی و مدل پیش‌بینی در فلز نیکل

استفاده شده است. پارامترهای کلیدی شامل مجموع مربعات، درجات آزادی (df)، میانگین مربعات، آماره F و سطح معنی‌داری (Sig.) هستند.

جدول ۴ نتایج آنالیز واریانس (ANOVA) را برای مدل رگرسیونی چندگانه خطی نشان می‌دهد که برای بررسی تأثیر متغیرهای فرایندی شامل pH، زمان واکنش، جریان و نوع الکترود بر کارایی حذف فلز نیکل در پساب نفتی

جدول ۴. نتایج آنالیز واریانس برای مدل رگرسیونی پیش‌بینی حذف عنصر نیکل با استفاده از فرآیند الکتروفتون

ANOVA ^a (Ni)					
	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Regression	۵۲۵/۳۸	۴	۱۳۱/۳۵	۹/۰۸۹	۰/۰۱
Residual	۸۶/۷۰۴	۶	۱۴/۴۵		
Total	۶۱۲/۰۸۹	۱۰			

وانادیوم در متغیرهای مختلف به همراه غلظت نهایی و انحراف معیار داده‌ها را نشان می‌دهد. مشابه نتایج مربوط به نیکل، شرایط pH بالا (۶) به‌طور کلی بهترین کارایی را در حذف وانادیوم نشان داده‌اند که بیانگر تأثیر مثبت محیط قلیایی بر فرآیند حذف این فلز نیز است. همچنین، افزایش مدت زمان واکنش به ۷۰ دقیقه موجب بهبود قابل توجه در درصد حذف وانادیوم گردیده است. استفاده از الکترود آلومینیومی در اغلب شرایط نسبت به الکترود آهنی عملکرد بهتری از خود

نتایج ANOVA نشان می‌دهد که مدل رگرسیونی برای پیش‌بینی کارایی حذف نیکل معنادار است. این مقدار سطح معنی‌داری کمتر از ۰/۰۵ است، که بیانگر آن است که حداقل یکی از متغیرهای مستقل تأثیر قابل توجهی بر کارایی حذف نیکل دارد. مجموع مربعات رگرسیون نسبت به مجموع مربعات خطا بالاتر است، که نشان‌دهنده‌ی تناسب خوب مدل با داده‌های تجربی است. بنابراین، می‌توان گفت که متغیرهای pH، زمان واکنش، جریان و نوع الکترود نقش مهمی در بهبود عملکرد حذف نیکل در فرآیند الکتروفتون دارند. **جدول ۵** درصد حذف فلز

نشان داده و کارایی حذف را افزایش داده است. به علاوه، بهبود عملکرد سیستم و افزایش بازده حذف وانادیوم شده جریان بالاتر (۶۰ میلی آمپر بر سانتی مترمربع) نیز باعث است.

جدول ۵. درصد حذف عنصر وانادیوم

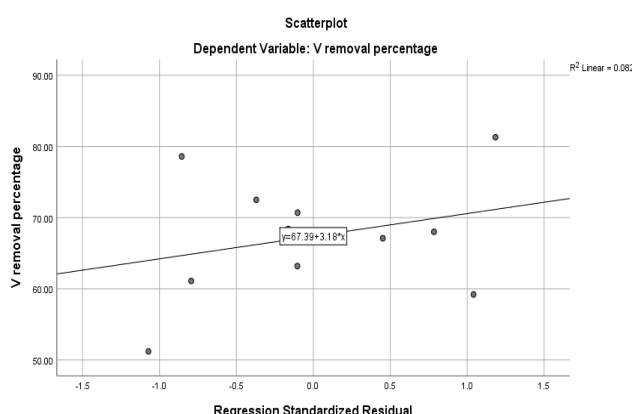
شرایط آزمایشی	pH	زمان (دقیقه)	جریان (میلی آمپر بر سانتی متر مربع)	نوع الکتروود	غلظت اولیه (mg/L)	غلظت نهایی (mg/L)	نرخ حذف (%)	میانگین	انحراف معیار	انحراف از میانگین
۱	۶	۲۰	۴۰	Fe-Fe	۸	۲/۲	۷۲/۵	۶۷/۴	۸/۶	۲/۶
۲	۵	۵۰	۴۰	Fe-Fe	۹/۵	۳	۶۸/۴			
۳	۴	۵۰	۶۰	Al-Al	۱۰	۳/۲	۶۸			
۴	۵	۷۰	۲۰	Fe-Fe	۸/۲	۲/۷	۶۷/۱			
۵	۴	۲۰	۲۰	Fe-Fe	۹/۸	۴	۵۹/۲			
۶	۶	۳۰	۶۰	Al-Al	۸/۳	۱/۵	۸۱/۳			
۷	۶	۷۰	۲۰	Al-Al	۷/۵	۲/۲	۷۰/۷			
۸	۴	۷۰	۴۰	Fe-Fe	۹/۵	۳/۵	۶۳/۲			
۹	۶	۷۰	۶۰	Fe-Fe	۷	۱/۵	۷۸/۶			
۱۰	۴	۲۰	۶۰	Al-Al	۹	۳/۵	۶۱/۱			
۱۱	۴	۲۰	۲۰	Al-Al	۸/۶	۴/۲	۵۱/۲			

حذف وانادیوم توسط متغیرهای ورودی مدل قابل تبیین است، در حالی که سایر عوامل مؤثر در حذف فلز احتمالاً ماهیت غیرخطی یا تعاملی دارند. این موضوع می تواند ناشی از پیچیدگی رفتار شیمیایی وانادیوم در محیط پساب نفتی، تغییرات pH، زمان تماس، ولتاژ اعمال شده و تأثیر هم زمان واکنش های اکسایش-احیا در فرآیند الکتروفتون باشد.

با توجه به جدول ۶ معادله رگرسیونی حذف وانادیوم به صورت زیر بود.

شکل ۴ نمودار پراکنش رگرسیونی حذف فلز وانادیوم را برای تمامی متغیرهای مدل نشان می دهد. در این نمودار، محور افقی بیانگر باقیمانده های استاندارد رگرسیونی و محور عمودی نشان دهنده درصد حذف وانادیوم است. معادله ی خط رگرسیونی

$y = 67.39 + 3.18x$ و مقدار ضریب تعیین $R^2 = 0.082$ بیانگر وجود رابطه ای مثبت اما بسیار ضعیف بین متغیرهای مدل و میزان حذف وانادیوم است. مقدار پایین R^2 نشان می دهد که تنها حدود ۸/۲٪ از تغییرات درصد



شکل ۴. نمودار رگرسیونی حذف وانادیوم برای همه ی متغیرها

جدول ۶. نتایج معادلات رگرسیونی حذف وانادیوم

	B	Sig.
(Constant)	۲۴/۸۴۲	۰/۰۰۹
pH	۶/۶۴۱	۰/۰۰۱

Time(minute)	۰/۰۶۳	۰/۲۲۹
Voltage (mA/cm ²)	۰/۲۲۵	۰/۰۰۸
Electrode	-۱/۲۷۹	۰/۵۵۶

نشان‌دهنده‌ی نقش مؤثر محیط قلیایی در فرآیند حذف این فلز است. همچنین، استفاده از الکتروکاتالیز آلومینیومی و اعمال جریان بالاتر موجب افزایش چشمگیر کارایی حذف کادمیوم گردید.

شکل ۶ رابطه‌ی میان باقیمانده‌های استاندارد رگرسیون^۳ و درصد حذف کادمیوم را در فرآیند الکتروفتون نشان می‌دهد. همان‌گونه که در نمودار مشاهده می‌شود، روند تغییرات داده‌ها دارای شیب مثبت با معادله‌ی رگرسیونی $y = 68.75 + 5.12x$ و ضریب تعیین $R^2 = 0.143$ است. این مقدار بیانگر آن است که حدود ۱۴/۳٪ از تغییرات درصد حذف کادمیوم توسط متغیرهای مستقل مدل قابل تبیین است. گرچه مقدار R^2 نسبتاً پایین است، اما شیب مثبت خط رگرسیون نشان می‌دهد که با افزایش مقادیر پیش‌بینی‌شده (یا اثر متغیرهای فرآیندی نظیر pH، زمان و ولتاژ)، درصد حذف کادمیوم نیز روند افزایشی دارد. به‌طور کلی، توزیع نقاط در اطراف خط رگرسیون نشان می‌دهد که رابطه‌ی میان متغیرهای فرآیندی و حذف کادمیوم از نوع خطی ضعیف ولی مثبت است. پراکندگی نسبتاً یکنواخت داده‌ها در دو طرف محور افقی نشانگر عدم وجود واریانس ناهمسان و عدم بروز خطاهای سیستماتیک در مدل است. این موضوع بیانگر آن است که مدل رگرسیونی مورد استفاده از اعتبار آماری مناسبی برخوردار بوده و می‌تواند در سطح اطمینان متوسط، رفتار حذف کادمیوم را در شرایط مختلف فرآیند الکتروفتون پیش‌بینی نماید. در مجموع، نتایج **شکل ۶** نشان می‌دهد که اگرچه تأثیر عوامل فرآیندی بر حذف کادمیوم محدود است، اما جهت‌گیری رابطه‌ی مثبت حاکی از آن است که با بهینه‌سازی پارامترهای عملیاتی، امکان افزایش بازده حذف فلز کادمیوم وجود دارد.

با توجه به **جدول ۹** معادله رگرسیونی حذف کادمیوم محاسبه شد.

در نتیجه مقادیر Sig معادله به‌صورت زیر است:

$$Y_{Cd} = pH (7.852) + voltage (0.283) + (18.107)$$

در نتیجه مقادیر Sig معادله به‌صورت زیر است:

$$Y_v = pH (6.641) + voltage (0.225) + 24.842$$

با توجه به **شکل ۵** شش و نه کمترین خطای دل‌پیش‌بینی را دارا بوده‌اند. با توجه به مقادیر متغیرهای این دو نقطه و سایر نقاط دیگر با کمترین خطای پیش‌بینی می‌توان نتیجه گرفت pH و جریان دو متغیر تأثیر گذار هستند.

این جدول نتایج آنالیز واریانس برای مدل رگرسیونی چندگانه خطی را نشان می‌دهد که برای بررسی تأثیر متغیرهای فرآیندی شامل pH، زمان واکنش، جریان و نوع الکتروکاتالیز بر کارایی حذف فلز وانادیوم در پساب نفتی به کار رفته است. پارامترهای کلیدی شامل مجموع مربعات^۱، درجات آزادی، میانگین مربعات^۲، آماره‌ی F و سطح معنی‌داری هستند.

جدول ۷ نتایج آنالیز واریانس مدل رگرسیونی مربوط به پیش‌بینی میزان حذف فلز وانادیوم در فرآیند الکتروفتون را نشان می‌دهد.

نتایج آزمون ANOVA نشان می‌دهد که مدل رگرسیونی برای پیش‌بینی کارایی حذف وانادیوم معنادار است. مقدار سطح معنی‌داری کمتر از ۰/۰۵ نشان می‌دهد که حداقل یکی از متغیرهای مستقل تأثیر قابل توجهی بر کارایی حذف وانادیوم دارد. مجموع مربعات رگرسیون به‌طور قابل توجهی بیشتر از مجموع مربعات خطا است، که نشان‌دهنده تناسب خوب مدل با داده‌های تجربی است. بنابراین، متغیرهای pH، زمان واکنش، جریان و نوع الکتروکاتالیز نقش مهمی در بهبود عملکرد حذف وانادیوم از پساب‌های نفتی دارند.

جدول ۸ غلظت نهایی، انحراف معیار داده‌ها و همچنین درصد حذف فلز کادمیوم و میانگین آن را از پساب نسبت به متغیرهای مختلف به همراه آن نشان می‌دهد.

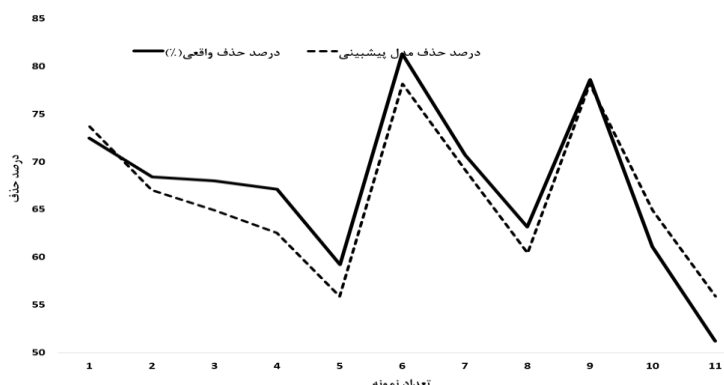
مشابه سایر فلزات مورد بررسی، شرایط pH بالاتر باعث بهبود قابل توجهی در عملکرد حذف کادمیوم شد که

^۱ Sum of Squares

^۲ Mean Square

^۳ Regression Standardized Residual

شکل ۷. نمودار مقایسه‌ی درصد حذف بین داده واقعی و مدل پیشبینی در فلز کادمیوم را نشان می‌دهد.



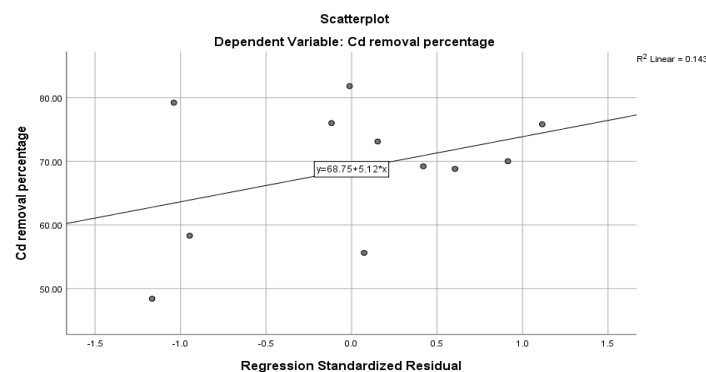
شکل ۵. نمودار مقایسه درصد حذف بین داده واقعی و مدل پیشبینی در فلز وانادیوم

جدول ۷. نتایج آنالیز واریانس برای مدل رگرسیونی پیش‌بینی حذف عنصر وانادیوم با استفاده از فرآیند الکتروفتون

ANOVA ^a (V)					
	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Regression	۶۸۳/۳۰۲	۴	۱۷۰/۸۲۶	۱۶/۸۸۴	۰/۰۰۲
Residual	۶۰/۷۰۷	۶	۱۰/۱۱۸		
Total	۷۴۴/۰۰۹	۱۰			

جدول ۸. درصد حذف عنصر کادمیوم

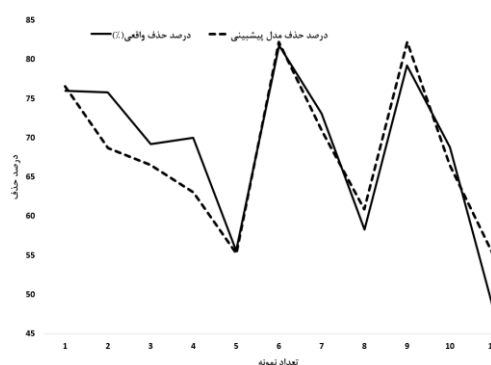
شرایط آزمایشی	pH	زمان (دقیقه)	جریان (میلی آمپر بر سانتیمتر مربع)	نوع الکترود	غلظت اولیه (mg/L)	غلظت نهایی (mg/L)	نرخ حذف (%)	میانگین	انحراف معیار	انحراف از میانگین
۱	۶	۲۰	۴۰	Fe-Fe	۵	۱/۲	۷۶	۶۷/۸	۱۰/۴۸	۳/۱۶
۲	۵	۵۰	۴۰	Fe-Fe	۶/۲	۱/۵	۷۵/۸			
۳	۴	۵۰	۶۰	Al-Al	۶/۵	۲	۶۹/۲			
۴	۵	۷۰	۲۰	Fe-Fe	۶	۱/۸	۷۰			
۵	۴	۲۰	۲۰	Fe-Fe	۶/۳	۲/۸	۵۵/۶			
۶	۶	۳۰	۶۰	Al-Al	۵/۵	۱	۸۱/۸			
۷	۶	۷۰	۲۰	Al-Al	۵/۲	۱/۴	۷۳/۱			
۸	۴	۷۰	۴۰	Fe-Fe	۶	۲/۵	۵۸/۳			
۹	۶	۷۰	۶۰	Fe-Fe	۴/۸	۱	۷۹/۲			
۱۰	۴	۲۰	۶۰	Al-Al	۶/۴	۲	۶۸/۸			
۱۱	۴	۲۰	۲۰	Al-Al	۶/۲	۳/۲	۴۸/۴			



شکل ۶. نمودار رگرسیونی حذف کادمیوم برای تمامی متغیرها

جدول ۹. نتایج معادلات رگرسیونی حذف کادمیوم

	B	Sig.
(Constant)	۱۸/۱۰۷	۰/۰۱۴
pH	۷/۸۵۲	۰/۰۰۵
Time(minute)	۰/۰۴۵	۰/۵۷۲
Voltage (mA/cm2)	۰/۲۸۳	۰/۰۲۳
Electrode	-۰/۸۵۹	۰/۸۰۳



شکل ۷. نمودار مقایسه‌ی درصد حذف بین داده‌ی واقعی و مدل پیش‌بینی در فلز کادمیوم

در پیش‌بینی عملکرد حذف کادمیوم است. همچنین نمودار نشان می‌دهد که مدل توانسته تأثیر متغیرهای pH، زمان واکنش، جریان و نوع الکترود را به‌درستی در روند حذف فلز منعکس کند، به‌طوری که نقاط پیش‌بینی شده‌ی تغییرات مشابه روند واقعی دارند.

جدول ۱۰ نتایج آنالیز واریانس برای مدل رگرسیونی چندگانه خطی را نشان می‌دهد که برای بررسی تأثیر متغیرهای فرایندی شامل pH، زمان واکنش، جریان و نوع الکترود بر کارایی حذف فلز کادمیوم در پساب نفتی به کار رفته است. پارامترهای ارائه‌شده شامل مجموع مربعات،

نمودار نشان می‌دهد که مدل توانسته است روند کلی حذف کادمیوم در پساب‌های صنعتی را به‌خوبی پیش‌بینی کند و مقادیر پیش‌بینی شده به‌طور کلی نزدیک به مقادیر واقعی قرار دارند. بیشترین انحراف مدل از داده‌ی واقعی در برخی شرایط مانند $pH = 5$ ، زمان ۵۰ دقیقه و جریان میلی آمپر بر سانتیمتر مربع ۴۰ با الکترود Fe-Fe مشاهده می‌شود که مدل مقدار حذف را کمتر از مقدار واقعی پیش‌بینی کرده است (۶۸/۷٪ در برابر ۷۵/۸٪). در مقابل، در شرایط $pH = 5$ و زمان ۳۰ دقیقه با الکترود Al-Al، مدل تقریباً دقیق‌ترین پیش‌بینی را ارائه داده است (۸۲/۲٪ در برابر ۸۱/۸٪).

به‌طور کلی، اختلاف بین درصد حذف واقعی و پیش‌بینی مدل کمتر از ۶٪ است، که نشان‌دهنده‌ی دقت بالای مدل

درجات آزادی، میانگین مربعات، آماره‌ی F و سطح معنی‌داری است.

جدول ۱۰. نتایج آنالیز واریانس برای مدل رگرسیونی پیش‌بینی حذف عنصر کادمیوم با استفاده از فرآیند الکتروفتون

ANOVA ^a (Cd)					
	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Regression	۹۴۱/۷۰۶	۴	۲۳۵/۴۲۷	۸/۹۹۷	۰/۰۱
Residual	۱۵۷/۰۰۱	۶	۲۶/۱۶۷		
Total	۱۰۹۸/۷۰۷	۱۰			

الکتروفتون نقش مهمی در بهینه‌سازی فرآیند حذف Cd از پساب‌های نفتی دارند.

جدول ۱۱ نتایج آزمایش‌های مربوط به درصد حذف فلز سرب را در شرایط مختلف عملیاتی فرآیند الکتروفتون نشان می‌دهد. در این جدول، اثر پارامترهایی نظیر pH، زمان واکنش، چگالی جریان، نوع الکتروفتون (آهن یا آلومینیوم) و غلظت اولیه فلز بر غلظت نهایی و درصد حذف سرب مورد بررسی قرار گرفته است.

نتایج آزمون ANOVA نشان می‌دهد که مدل رگرسیونی برای پیش‌بینی کارایی حذف کادمیوم معنادار است. مقدار سطح معنی‌داری کمتر از ۰/۰۵ بیانگر این است که حداقل یکی از متغیرهای مستقل به‌طور قابل توجهی بر کارایی حذف کادمیوم اثر دارد. مجموع مربعات رگرسیون نسبت به مجموع مربعات خطا بزرگ‌تر است، که نشان‌دهنده‌ی توانایی مدل در توصیف تغییرات داده‌های تجربی است. بنابراین، متغیرهای pH، زمان واکنش، جریان و نوع

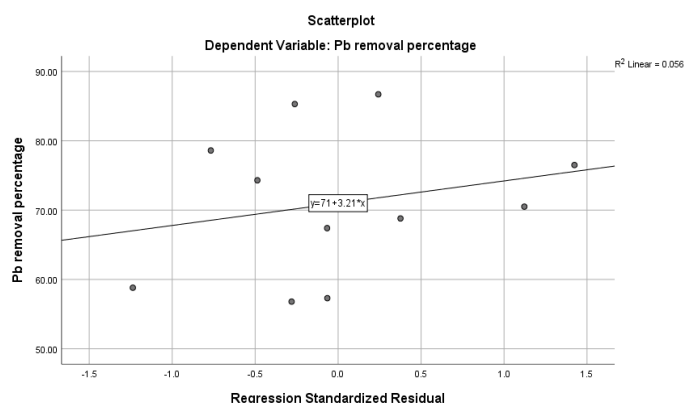
جدول ۱۱. درصد حذف عنصر سرب

شرایط آزمایشی	pH	زمان (دقیقه)	جریان (میلی آمپر بر سانتیمتر مربع)	نوع الکتروفتون	غلظت اولیه (mg/L)	غلظت نهایی (mg/L)	نرخ حذف (%)	میانگین	انحراف معیار	انحراف از میانگین
۱	۶	۲۰	۴۰	Fe-Fe	۷	۱/۵	۷۸/۶	۷۱	۱۰/۵	۳/۱۷
۲	۵	۵۰	۴۰	Fe-Fe	۸/۵	۲	۷۶/۵			
۳	۴	۵۰	۶۰	Al-Al	۹/۲	۳	۶۷/۴			
۴	۵	۷۰	۲۰	Fe-Fe	۷/۸	۲/۳	۷۰/۵			
۵	۴	۲۰	۲۰	Fe-Fe	۸/۱	۳/۵	۵۶/۸			
۶	۶	۳۰	۶۰	Al-Al	۷/۵	۱	۸۶/۷			
۷	۶	۷۰	۲۰	Al-Al	۷	۱/۸	۷۴/۳			
۸	۴	۷۰	۴۰	Fe-Fe	۸/۵	۳/۵	۵۸/۸			
۹	۶	۷۰	۶۰	Fe-Fe	۶/۸	۱	۸۵/۳			
۱۰	۴	۲۰	۶۰	Al-Al	۸	۲/۵	۶۸/۸			
۱۱	۴	۲۰	۲۰	Al-Al	۷/۵	۳/۲	۵۷/۳			

شکل ۸ یک نمودار پراکندگی است که رابطه‌ی بین متغیر وابسته، یعنی درصد حذف سرب، و باقیمانده‌ی استاندارد شده رگرسیون را نشان می‌دهد. محور افقی نشان‌دهنده‌ی باقیمانده‌ی استاندارد شده رگرسیون و محور عمودی درصد حذف سرب است. نقاط پراکنده در نمودار، داده‌های مشاهده‌شده را نشان می‌دهند که در بازه‌ای از حدود ۵۰ تا ۹۰٪ برای حذف سرب و از ۱/۵ تا ۱/۵ برای

با توجه به جدول ۱۱ شرایط pH بالاتر (۶) موجب بهبود قابل توجه در حذف سرب شد، در حالی که شرایط pH پایین‌تر (۴) کمترین میزان حذف را نشان داد. همانند سایر فلزات، افزایش زمان واکنش تا ۷۰ دقیقه تأثیر مثبتی بر عملکرد سیستم در حذف سرب داشت. استفاده از الکتروفتون آلومینیومی نسبت به الکتروفتون آهنی نیز به افزایش کارایی حذف کمک کرد. همچنین، اعمال جریان بالا (۶۰ میلی‌آمپر بر سانتی‌متر مربع) به‌طور کلی نتایج بهتری در حذف سرب ارائه داد.

باقیمانده‌ی استاندارد شده رگرسیون قرار دارند.



شکل ۸. نمودار رگرسیونی حذف سرب برای متغیرها

نسبتاً یکنواخت نقاط اطراف خط رگرسیون می‌تواند نشان‌دهنده‌ی عدم وجود الگوی واضح در باقیمانده‌ها باشد، که ممکن است نیاز به بررسی بیشتر مدل رگرسیون یا اضافه کردن متغیرهای دیگر را ایجاب کند. با توجه به جدول ۱۲ معادله رگرسیونی حذف کادمیوم محاسبه شد.

نمودار نشان می‌دهد که رابطه‌ی بین باقیمانده‌ی استاندارد شده‌ی رگرسیون و درصد حذف سرب بسیار ضعیف است، زیرا ضریب تعیین $R^2 = 0.056$ تنها ۵/۶٪ از تغییرات متغیر وابسته را توضیح می‌دهد. شیب مثبت خط رگرسیون $y = 71.3 + 21.7x$ نشان می‌دهد که با افزایش باقیمانده‌ی استاندارد شده، نرخ حذف سرب به‌طور کلی افزایش می‌یابد، اما پراکندگی زیاد نقاط حاکی از آن است که این رابطه‌ی خطی قوی نیست. همچنین، توزیع

جدول ۱۲. نتایج معادلات رگرسیونی حذف سرب

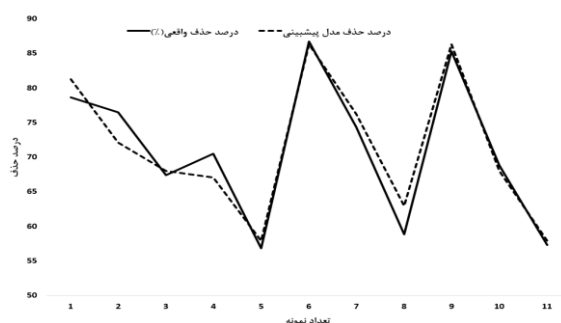
	B	Sig.
(Constant)	۱۶/۱۹۳	۰/۰۴۱
pH	۹/۱۶۱	۰/۰۰۰
Time(minute)	۰/۰۰۱	۰/۹۸۹
Voltage (mA/cm2)	۰/۲۵۲	۰/۰۰۵
Electrode	-۰/۱۹۲	۰/۹۲۹

پیش‌بینی در مقایسه با مشاهدات واقعی طراحی شده است و می‌تواند تفاوت‌ها یا شباهت‌های بین این دو مجموعه داده را به‌صورت بصری به نمایش بگذارد.

در نتیجه مقادیر Sig معادله به صورت زیر است:

$$Y_{Pb} = pH(9.161) + voltage(0.252) + (16.193)$$

شکل ۹ یک نمودار مقایسه‌ای است که درصد حذف فلز سرب را بر اساس داده‌های واقعی و مدل پیش‌بینی شده نشان می‌دهد. این نمودار به‌منظور ارزیابی دقت مدل



شکل ۹. نمودار مقایسه ی درصد حذف بین داده ی واقعی و مدل پیش بینی در فلز سرب

درجات آزادی، میانگین مربعات، آماره F و سطح معنی داری است.

نتایج آزمون واریانس نشان می دهد که مدل رگرسیونی برای پیش بینی کارایی حذف Pb بسیار معنادار است. سطح معنی داری کمتر از ۰/۰۵ نشان می دهد که حداقل یکی از متغیرهای مستقل به طور قابل توجهی بر کارایی حذف سرب تأثیرگذار است. مجموع مربعات رگرسیون نسبت به مجموع مربعات خطا بسیار بیشتر است، که بیانگر توان بالای مدل در توصیف تغییرات داده های تجربی است. این نتیجه نشان می دهد که متغیرهای pH، زمان واکنش، جریان و نوع الکترود نقش تعیین کننده ای در بهینه سازی فرآیند حذف فلز سرب دارند. **جدول ۱۴** نتایج معادلات رگرسیونی نهایی برای هر فلز و ضریب همبستگی آنها را نسبت به همه متغیرها نشان می دهد. نتایج معادلات رگرسیونی نشان داد حذف فلزات سنگین با روش الکتروفتون با متغیر نوع الکترود و زمان همبستگی قوی دارد و با متغیر pH ضعیف ترین همبستگی را دارا است. میزان همبستگی (R^2) با نوع الکترود در فلزات بین ۰/۹۳ الی یک و برای زمان بین ۰/۸۷۹ الی ۰/۹۹۸ بود. همچنین برای جریان ۰/۶۴۷ برای فلز نیکل تا ۰/۷۲۵ برای فلز سرب متفاوت بود. همچنین pH نیز مقادیری بین ۰/۲۳۵ الی ۰/۴۲۱ را نشان داد. بیشترین همبستگی و معناداری برای فلز سرب بود.

نمودار نشان می دهد که مقادیر پیش بینی شده توسط مدل، روند کلی درصد حذف فلز سرب را به خوبی شبیه سازی کرده و نقاط داده مدل در نزدیکی مقادیر واقعی قرار دارند. در برخی شرایط، مانند زمان ۲۰ دقیقه و جریان ۴۰ میلی آمپر بر سانتیمتر مربع با الکترود Fe-Fe، مدل مقدار حذف را کمی بیش تر از مقدار واقعی پیش بینی کرده است (۸۱/۲٪ در برابر ۷۸/۶٪) و در شرایطی دیگر مانند زمان ۵۰ دقیقه و جریان ۴۰ میلی آمپر بر سانتیمتر مربع با همان الکترود، مدل کمی کمتر پیش بینی کرده است (۷۲/۱٪ در برابر ۷۶/۵٪). به طور کلی، بیشترین انحراف مدل از داده ی واقعی کمتر از ۴٪ است که نشان دهنده ی دقت بالای مدل در پیش بینی عملکرد حذف فلز سرب است. همچنین، مدل توانسته است تأثیر متغیرهای زمان، جریان و نوع الکترود را در روند حذف فلزات به درستی منعکس کند، به طوری که نقاط پیش بینی شده همگام با تغییرات درصد حذف واقعی افزایش و کاهش دارند. در جدول (۱۰) معادلات مدل رگرسیونی حذف فلزات سنگین و رابطه آنها با متغیرهای تحقیق به دست آمده است.

جدول ۱۳ نتایج آنالیز واریانس را برای مدل رگرسیونی چندگانه خطی نشان می دهد که برای بررسی تأثیر متغیرهای عملیاتی شامل pH، زمان واکنش، جریان و نوع الکترود بر کارایی حذف فلز سرب از پساب نفتی استفاده شده است. پارامترهای ارائه شده شامل مجموع مربعات،

جدول ۱۳. نتایج آنالیز واریانس برای مدل رگرسیونی پیش بینی حذف عنصر سرب با استفاده از فرآیند الکتروفتون

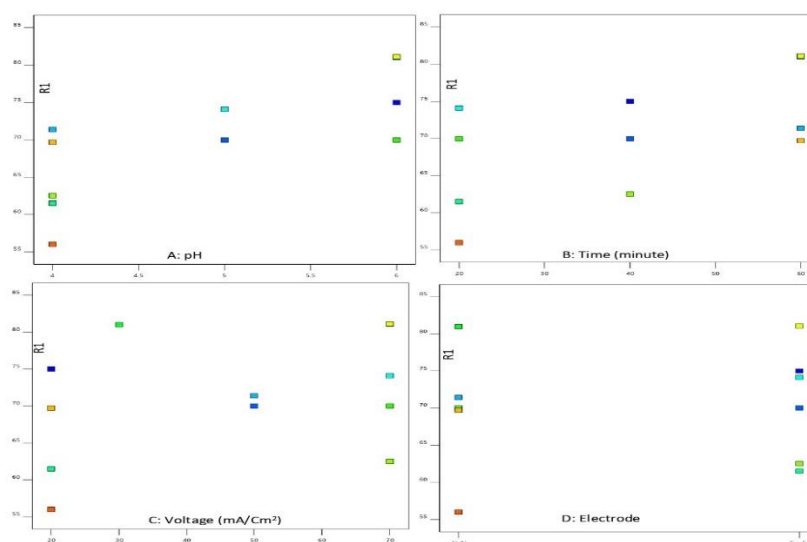
ANOVA ^a (Pb)					
	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Regression	۱۰۴۴/۱۶۲	۴	۲۶۱/۰۴۱	۲۵/۲۸۷	۰/۰۰۱
Residual	۶۱/۹۳۸	۶	۱۰/۳۲۳		
Total	۱۱۰۶/۱۰۰	۱۰			

جدول ۱۴. نتایج معادلات رگرسیون متغیرها در حذف فلزات سنگین

متغیر		نیکل		وانادیوم		کادمیوم		سرب	
		y	R ²	y	R ²	y	R ²	y	R ²
همه متغیرها		$70.21 + 3.8 * X$	۰/۱۴۲	$67.39 + 3.18 * X$	۰/۰۸۲	$68.75 + 5.12 * X$	۰/۱۴۳	$71.3 + 2.1 * X$	۰/۰۵۶

شکل ۱۰ تغییرات کارایی حذف فلزات سنگین (R1) را تحت تأثیر چهار متغیر مستقل شامل pH (A)، زمان واکنش (B)، چگالی جریان (C) و نوع الکترود (D) نشان می‌دهد. داده‌ها از طراحی آزمایش به کمک نرم‌افزار Design Expert استخراج شده و بیانگر روند تغییر کارایی حذف در سطوح مختلف متغیرها هستند. هدف از این بررسی، تعیین شرایط بهینه عملیاتی برای دستیابی به

بالاترین بازدهی حذف فلزات سنگین در پساب‌های صنعتی است. شکل ۱۰ نموداری است که تأثیر متغیرهای عملیاتی بر کارایی حذف فلزات سنگین با استفاده از فرآیند الکتروفتون را به نمایش می‌گذارد. این نمودار به بررسی رابطه‌ی بین پارامترهای کلیدی فرآیند، نظیر pH، ولتاژ، و غلظت مواد اولیه با کارایی حذف فلزات سنگین می‌پردازد و می‌تواند بهینه‌سازی شرایط عملیاتی را برای افزایش کارایی فرآیند تسهیل کند.



شکل ۱۰. نمودار تأثیر متغیرهای عملیاتی بر کارایی حذف فلزات سنگین با استفاده از فرآیند الکتروفتون

جدول ۱۵. مقایسه مقادیر واقعی و پیش‌بینی‌شده و شاخص‌های خطای مدل برای فلزات سنگین

فلزات سنگین	MAD	MSE	RMSE	MAPE
نیکل	۲/۰۵۸	۹/۲۵۶	۳/۰۴۲	۳/۰۷۸
وانادیوم	۲/۷۱۱	۹/۱۷۹	۳/۰۳	۴/۲۵۹
کادمیوم	۳/۱۸۱	۱۶/۲۴۸	۴/۰۳۱	۴/۸۸۵
سرب	۱/۹۰۸	۵/۷۰۱	۲/۳۸۸	۲/۷۴۵

بحث

اثر pH

نتایج نشان داد که pH محیط نقش بسیار مهمی در کارایی حذف فلزات سنگین دارد. در شرایط قلیایی ($pH = 6$)، بیشترین درصد حذف برای Ni، V، Cd و Pb مشاهده شد. این افزایش کارایی می‌تواند به دلیل افزایش تولید رادیکال‌های هیدروکسیل در محیط قلیایی و تسهیل اکسیداسیون فلزات باشد. در مقابل، شرایط اسیدی ($pH = 4$) کمترین کارایی را نشان داد که بیانگر محدودیت فرآیند EC/EF در محیط‌های اسیدی است. این یافته‌ها با مطالعات پیشین (۱۳ و ۱۸) همخوانی دارد، که در آن‌ها pH به عنوان یک متغیر کلیدی در بهینه‌سازی حذف فلزات مطرح شده است.

این یافته‌ها با نتایج مطالعات مشابه همخوانی دارد که نشان می‌دهد pH بالاتر باعث بهبود فرآیندهای حذف فلزات سنگین می‌شود (۱۹). این نتایج در شرایط خاص پساب نفتی پالایشگاه آبادان به‌دست آمده‌اند و ممکن است با تغییر در ویژگی‌های پساب یا پارامترهای عملیاتی متفاوت باشند. علاوه بر این، اثر احتمالی ترکیبات آلی موجود در پساب نفتی بر عملکرد فرآیند الکتروفتون در این مطالعه نادیده گرفته شده است، که می‌تواند در شرایط واقعی منجر به تغییراتی در کارایی حذف فلزات شود. بنابراین، برای تعمیم نتایج و طراحی بهینه فرآیند در سایر پساب‌ها، نیاز به مطالعات تکمیلی و بررسی تعامل فلزات سنگین با ترکیبات آلی و سایر آلاینده‌ها وجود دارد.

اثر زمان واکنش

افزایش زمان واکنش از ۲۰ تا ۷۰ دقیقه تأثیر مثبت قابل توجهی بر کارایی حذف داشت. زمان‌های کوتاه‌تر (> 30 دقیقه) اغلب نتایج کمتر از ۷۰٪ حذف را نشان دادند، در حالی که زمان‌های طولانی‌تر (≤ 50 دقیقه) به‌طور میانگین بیش از ۷۵٪ حذف را به همراه داشتند. این موضوع بیانگر این است که تولید رادیکال‌های OH و واکنش آن‌ها با یون‌های فلزی نیازمند زمان کافی برای رسیدن به تعادل است. این نتایج با تحقیقاتی مانند مطالعه‌ی یانگ و همکاران (۲۰۲۵) (۲۰) همخوانی دارد که نشان داده‌اند زمان طولانی‌تر باعث بهبود کارایی حذف فلزات می‌شود.

اثر جریان

اعمال جریان بالاتر (میلی آمپر بر سانتیمتر مربع ۶۰) باعث افزایش کارایی حذف فلزات شد. جریان بالا باعث افزایش شدت جریان و در نتیجه تولید بیشتر رادیکال‌های اکسیدان می‌شود که واکنش با فلزات را تسریع می‌کند. با این حال، جریان‌های بسیار بالا ممکن است مصرف انرژی را افزایش دهند و از نظر اقتصادی بهینه نباشند. بنابراین، یک بازه جریان بهینه باید در طراحی صنعتی مدنظر قرار گیرد. مشابه این نتایج، تحقیقاتی مانند مطالعه‌ی دسیلوا و همکاران (۲۰۲۵) (۵) نشان داده‌اند که افزایش جریان منجر به کارایی بالاتر در حذف فلزات سنگین می‌شود.

اثر نوع الکتروود

نتایج نشان داد که الکترودهای آلومینیومی به‌طور کلی کارایی بیشتری نسبت به الکترودهای آهنی دارند. دلیل این امر می‌تواند افزایش سرعت اکسیداسیون و تولید هیدروکسیدهای آلومینیوم باشد که به‌صورت طبیعی فلزات را جذب می‌کنند و نقش کمپلکس‌کننده دارند. همچنین، ترکیب Fe-Al در برخی شرایط عملکرد بهینه‌ای نشان داد که بیانگر اثر سینرژیک دو نوع الکتروود است. مقایسه الکترودهای آلومینیومی و آهنی نشان داد که هر چند الکترودهای آلومینیومی به دلیل تولید یون‌های Al^{3+} و تشکیل رسوبات هیدروکسیدی $[Al(OH)_3]$ ، کارایی بالاتری در حذف فلزات سنگین دارند، اما حجم لجن تولیدی در این حالت بیشتر بوده و مدیریت و دفع آن می‌تواند چالش‌زا باشد. در مقابل، الکترودهای آهنی معمولاً رسوب کمتری تولید می‌کنند زیرا بخشی از یون‌های Fe^{2+} و Fe^{3+} در واکنش‌های اکسیداسیون-کاهش و تولید رادیکال‌های هیدروکسیل مصرف می‌شوند و رسوبات پایدارتر $Fe(OH)_2$ و $Fe(OH)_3$ ایجاد می‌گردند که در تخریب آلاینده‌های آلی نیز نقش مؤثری دارند. بنابراین، انتخاب نوع الکتروود باید بر اساس هدف اصلی فرآیند (حذف فلزات یا تخریب آلاینده‌های آلی) و همچنین در نظر گرفتن هزینه‌های مربوط به مدیریت لجن انجام گیرد. الکترودهای Al-Al معمولاً به دلیل تولید یون‌های Al^{3+} ، قابلیت بالاتری در انعقاد و رسوبدهی هیدروکسیدهای فلزی دارند و بنابراین در شرایطی که غلظت فلزات بالاست یا pH نزدیک به قلیایی است، عملکرد بهتری نشان می‌دهند. در مقابل، الکترودهای Fe-Fe به دلیل آزادسازی یون‌های Fe^{2+}/Fe^{3+} در فرآیند الکتروفتون، نقش مؤثرتری در تولید $OH^\bullet$ و اکسیداسیون

اگرچه ترکیب هر دو نوع الکتروود نیز می‌تواند مزایای خاص خود را داشته باشد. مطالعه‌ی حاضر نشان داد pH قلیایی، زمان طولانی‌تر واکنش و جریان بالاتر عملکرد بهتری ایجاد کردند و استفاده از الکتروود Al-Al نسبت به Fe-Fe کارایی حذف را بهبود بخشید. وجود روغن در پساب می‌تواند کارایی فرآیند فنتون و الکتروفنتون را کاهش دهد، زیرا ترکیبات آلی روغنی با رادیکال‌های هیدروکسیل برای واکنش رقابت کرده و بخشی از ظرفیت اکسیداسیون صرف تجزیه ترکیبات آلی می‌شود. علاوه بر این، لایه‌های روغنی ممکن است سطح الکتروودها را پوشش داده و تولید یون‌های فعال (Fe^{2+} یا Al^{3+}) را محدود کنند. همچنین تشکیل کمپلکس‌های آلی-فلزی و تغییر شرایط pH می‌تواند رسوب‌گذاری فلزات را مختل نماید. بنابراین، حضور روغن معمولاً مانع بهبود کارایی حذف فلزات در این فرآیند است و پیش‌تصفیه برای جداسازی روغن پیش از اجرای فرآیند ضروری است. علت یکسان بودن کارایی بهینه برای تمام فلزات را نمی‌توان صرفاً تصادفی دانست، بلکه به شرایط فرآیندی و سازوکار غالب حذف در سیستم بستگی دارد. در روش الکتروفنتون و استفاده از جاذب‌های کربنی، معمولاً عوامل اصلی مانند pH، زمان واکنش، غلظت پراکسید هیدروژن و شدت جریان الکتریکی تعیین‌کننده کارایی نهایی هستند. این شرایط، یک محیط نسبتاً استاندارد برای واکنش‌های اکسیداسیون و رسوب‌گذاری فلزات ایجاد می‌کنند. در نتیجه، تمامی فلزات سنگین موجود در پساب در همان شرایط بهینه واکنش نشان می‌دهند و کارایی مشابهی از خود نشان می‌دهند، چرا که محدودکننده‌ی اصلی، پارامترهای عملیاتی سیستم هستند نه ویژگی فردی هر فلز. از سوی دیگر، ظرفیت جذب سطحی جاذب‌های نانوساختاری و همچنین سازوکار رسوب‌گذاری ناشی از تغییرات pH یا تولید رادیکال‌های فعال، باعث می‌شود تمامی فلزات با کارایی نزدیک به هم حذف شوند. بنابراین، این همگرایی در کارایی نه ناشی از تصادف، بلکه نتیجه‌ی هم‌افزایی میان شرایط واکنشی یکسان و سازوکار مشترک حذف است که بر تمامی فلزات اعمال شده است. مقایسه‌ی مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل RSM با داده‌های تجربی نشان داد که اختلاف بین درصد حذف واقعی و پیش‌بینی کمتر از ۵٪ است. این نشان‌دهنده‌ی

آلاینده‌ها دارند؛ به همین دلیل در شرایطی که ترکیبات آلی همراه فلزات وجود دارند یا محیط اسیدی‌تر است، کارایی بهتری ایجاد می‌کنند. این یافته‌ها با نتایج مطالعه‌ی گواو و همکاران (۲۰۱۸) (۷) سازگار است که نقش الکتروودهای آلومینیومی در افزایش کارایی فرآیندهای الکتروشیمیایی را تأیید کرده‌اند. این نتایج با یافته‌های نیدش و همکاران (۲۰۲۳) هم‌خوانی دارد، که نشان می‌دهد فرآیند الکتروفنتون در حذف آلاینده‌های فلزی تحت تأثیر پارامترهای عملیاتی و شرایط محیطی قرار دارد و عملکرد بهینه در pH اسیدی تا خنثی حاصل می‌شود. با این حال، مطالعه‌ی حاضر نشان داد که برای پساب نفتی خاص پالایشگاه آبادان، pH قلیایی ($pH = 6$) بهترین کارایی را ایجاد کرده است، در حالی که نیدش و همکاران بیشتر روی پساب‌های صنعتی متنوع و ترکیبات آلی متفاوت تمرکز داشتند. این مقایسه نشان می‌دهد که ویژگی‌های پساب و حضور ترکیبات آلی می‌تواند اثر قابل توجهی بر عملکرد فرآیند الکتروفنتون داشته باشند و مطالعات تکمیلی برای تعمیم نتایج به سایر پساب‌ها ضروری است.

تحلیل تعاملات متغیرها

با استفاده از نمودارهای سطح پاسخ مشاهده شد که تعامل pH جریان بیشترین اثر را بر کارایی حذف دارد. به‌طور خاص، بیشترین حذف فلزات در شرایط $pH = 6$ و جریان میلی‌آمپر بر سانتیمتر مربع ۶۰ حاصل شد. تعامل زمان و نوع الکتروود نیز تأثیر قابل توجهی داشت، به‌طوری که استفاده از Al-Al در زمان‌های طولانی‌تر بیشترین کارایی را ایجاد کرد. این تحلیل نشان می‌دهد که تنها بررسی اثر متغیرهای منفرد کافی نیست و برای طراحی بهینه فرآیند باید تعاملات میان متغیرها نیز لحاظ شود. نتایج حاصل از آزمایش‌های حذف فلزات سنگین Ni، V، Cd و Pb نشان داد که شرایط محیطی و پارامترهای عملیاتی تأثیر قابل توجهی بر کارایی حذف دارند. به‌طور کلی، افزایش pH به سمت محیط قلیایی ($pH = 6$) موجب بهبود قابل توجه عملکرد حذف فلزات شد و شرایط اسیدی ($pH = 4$) کمترین کارایی را نشان داد. همچنین، زمان واکنش طولانی‌تر و اعمال جریان بالاتر ۶۰ میلی‌آمپر بر سانتیمتر مربع عملکرد سیستم را بهبود بخشید. استفاده از الکتروود آلومینیومی نسبت به الکتروود آهنی در اکثر شرایط باعث افزایش کارایی حذف گردید،

مختلف و استفاده از انواع دیگر الکترودها انجام شود تا تأثیرات متقابل متغیرها بهتر مشخص شود.

تشکر و قدردانی: بدین وسیله از همه ی افرادی که ما را در انجام این طرح یاری کردند، تشکر و قدردانی می شود.

تعارض منافع: نویسندگان اعلام می دارند که هیچ گونه تضاد منافع اعم از حقیقی یا مادی با هم ندارند.

حمایت مالی: اجرای این پژوهش از حمایت مالی برخوردار نبوده است.

ملاحظات اخلاقی: این مقاله مستخرج از رساله ی دکترای تخصصی با عنوان "حذف فلزات سنگین و ترکیبات آلی فرار با روش الکتروفتون و جاذب نانولوله های کربنی عامل دار شده از پساب نفتی" مصوب واحد همدان دانشگاه آزاد اسلامی با کد ۱۷۱۲۴۸۹۴۰۵۰۷۶۱۷۷۷۰۰۳۹۱۶۲۹۵۹۶۸۶ است.

نویسندگان تمام نکات اخلاقی شامل عدم سرقت ادبی، انتشار دوگانه، تحریف داده ها و داده سازی را در این مقاله رعایت کرده اند. همچنین، هرگونه تضاد منافع حقیقی یا مادی که ممکن است بر نتایج یا تفسیر مقاله تأثیر بگذارد را رد می کنند.

سهم نویسندگان: نویسندگان به طور برابر در اجرای پژوهش و نگارش برون داد حاصل از آن مشارکت و بر همه مراحل مربوطه نظارت داشته اند.

References

1. Tizro N, Moniri E, Saeb K, Ahmad Panahi H, Sobhanardakani S. Preparation and application of grafted β -Cyclodextrin/thermo-sensitive polymer onto modified $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$ nanoparticles for fenitrothion elimination from aqueous solution. *Microchem J*. 2019;145:59-67. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2018.09.005>
2. Sobhanardakani S, Jamshidi K. Assessment of metals (Co, Ni and Zn) content in the sediments of Mighan Wetland using geo-accumulation index. *Iran J Toxicol*. 2015; 9(30):1386-1390.
3. American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA), & Water

توان بالای مدل RSM در پیش بینی رفتار سیستم و قابلیت استفاده آن برای بهینه سازی شرایط عملیاتی است.

نتیجه گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که فرآیند الکتروفتون در شرایط بهینه شامل pH قلیایی، زمان واکنش طولانی تر و جریان الکتریکی بالاتر، کارایی بسیار بالایی در حذف فلزات سنگین از پساب های صنعتی دارد و مدل RSM توانست رفتار سیستم را با دقت بالایی (کمتر از ۵ درصد خطا) پیش بینی کند. بررسی ها مشخص کرد که نوع الکترودها، به ویژه استفاده از آلومینیوم، نقش مؤثری در بهبود عملکرد حذف داشته و حضور ترکیبات روغنی یکی از عوامل محدود کننده فرایند است که نیازمند پیش تصفیه می باشد. از آنجا که کارایی حذف برای فلزات مختلف تقریباً یکسان بوده است، می توان نتیجه گرفت که سازوکار حذف تحت تأثیر شرایط واکنشی مشترک بوده و نه ویژگی فردی فلزات. در مجموع، بهینه سازی پارامترهای عملیاتی کلید افزایش بازده حذف و کاهش هزینه های تصفیه است. در نهایت، نتایج این مطالعه تأیید می کند که بهینه سازی عوامل عملیاتی مانند pH، جریان و زمان واکنش می تواند به طور قابل توجهی کارایی فرایند حذف فلزات سنگین را افزایش دهد. این یافته ها می تواند به طراحی سیستم های تصفیه کارآمدتر برای کاهش آلودگی فلزات سنگین در پساب های صنعتی کمک کند. برای تکمیل این تحقیق، پیشنهاد می شود مطالعات بیشتری با ترکیب شرایط

- Environment Federation (WEF). (2023). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (24th ed.). Washington, D.C.: APHA Press.
4. Azimi A, Azari A, Rezakazemi M, Ansarpour M. Removal of heavy metals from industrial wastewaters: a review. *ChemBioEng Rev*. 2017;4(1):37-59. <https://doi.org/10.1002/cben.201600010>
5. De Silva M, Cao G, Tam KC. Nanomaterials for the removal and detection of heavy metals: a review. *Environ Sci: Nano*. 2025;12(4):2154-2176. <https://doi.org/10.1039/D4EN01041H>

6. Garrido-Cardenas JA, Esteban-García B, Agüera A, Sánchez-Pérez JA, Manzano-Agugliaro F. Wastewater treatment by advanced oxidation process and their worldwide research trends. *Int J Environ Res Publ Health*. 2020;17(1):170. <https://doi.org/10.3390/ijerph17010170> PMID:31881722 PMCID:PMC6981484
7. Guo W, Zhang J, Xu Y. Efficiency of aluminum electrodes in electrochemical treatment of industrial wastewater. *J Environ Manage*. 2018;227:402-10. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.08.048> PMID:30121459
8. Hosseinpour M, Ghanbari F, Alizadeh R. Optimization of electro-Fenton process for removal of heavy metals using response surface methodology. *Environ Technol Innov*. 2020;17:100563. doi:10.1016/j.eti.2020.100563
9. Huang J, Wang S, Zhang Y. Synergistic effect of carbon nanotubes and electrochemical processes for removal of heavy metals in wastewater. *J Hazard Mater*. 2020;399:123047. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123047> PMID:32937711
10. Iyer S, Deshmukh SM, Tapre RW. Review on removal of heavy metals from industrial effluents by adsorption. *Rev Inorg Chem*. 2024;0. <https://doi.org/10.1515/revic-2024-0079>
11. Kew YN, Lau SY. Review on electrochemical reactors for efficient heavy metals removal from wastewater. *J Ind Eng Chem*. 2025;140:25-40. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2025.03.015>
12. Lu J. A rigorous introduction to linear models. *arXiv preprint* 2021. <https://arxiv.org/abs/2105.04240>
13. Nidheesh PV, Ganiyu SO, Martínez-Huitle CA, Mousset E, Olvera-Vargas H, Trelu C, et al. Recent advances in electro-Fenton process and its emerging applications. *Crit Rev Environ Sci Technol*. 2023;53(8):887-913. <https://doi.org/10.1080/10643389.2022.2093074>
14. Omar BM, Omar BM, Zyadah MA, Ali MY, El-Sonbati MA. Pre-treatment of composite industrial wastewater by Fenton & electro-Fenton processes. *Sci Rep*. 2024;14:27906. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-78846-w> PMID:39537851 PMCID:PMC11561168
15. Pham TD, Tan YW, Ong SA. A critical review on electro-Fenton treatment for organic pollutants in wastewater. *Environ Pollut*. 2021;287:117246. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117246> PMID:33940231
16. Pormazar SM, Dalvand A. Heterogeneous electro-Fenton process using a novel catalytic electrode for the degradation of direct dye from aqueous solutions: modeling, optimization, degradation pathway and toxicity evaluation. *Appl Water Sci*. 2025;15:52. <https://doi.org/10.1007/s13201-025-02394-5>
17. Rayaroth MP, Aravindakumar CT, Shah NS, Boczkaj G. Advanced oxidation processes (AOPs) based wastewater treatment-unexpected nitration side reactions-a serious environmental issue: A review. *Chem Eng J*. 2022;430:133002. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.133002>
18. Wang F. Research on novel heavy metal wastewater treatment methods. *Acad J Environ Earth Sci*. 2023;5(3):13-20. <https://doi.org/10.25236/AJEE.2023.050303>
19. Wu L, Garg S, Waite TD. Progress and challenges in the use of electrochemical oxidation and reduction processes for heavy metals removal and recovery from wastewaters. *J Hazard Mater*. 2024;479:135581. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.135581> PMID:39216250
20. Yang R, Li X, Zhao J, Chen Y. Review on electrochemical processes for the treatment of heavy-metal containing wastewaters. *Chem Eng J*. 2025;495:148293.