JARC

علمی-پژوهشی

بهینه‌سازی فرایند انعقاد شیمیایی و انعقاد الکتریکی در تصفیه پساب پتروشیمی شهید تندگویان

حمیدرضا نورایی‌نیا[1] و سمیه طورانی[2و*]

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی شیمی، واحد ماهشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، ماهشهر، ایران.

۲. استادیار گروه مهندسی شیمی، واحد ماهشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، ماهشهر، ایران.

دریافت: دی ۱۴۰۱ بازنگری: فروردین ۱۴۰۲ پذیرش: اردیبهشت ۱۴۰۲

10.30495/JACR.2023.1974259.2070

چکیده

در این پژوهش با روش سطح‌پاسخ، کارایی فرایند انعقاد شیمیایی و انعقاد الکتریکی در تصفیه پساب پتروشیمی شهید تندگویان، مدل‌سازی و بهینه‌سازی شد. ترکیب پساب پتروشیمی شهید تندگویان به‌کار رفته در این پژوهش، ۲۰ تا ۶۰ ppm کبالت و منگنز داشت. طراحی آزمایش با نرم‌افزار دیزاین اکسپرت انجام شد و همخوانی بسیار خوبی بین مدل و مشاهده‌های تجربی در بازده حذف کبالت و منگنز به‌دست آمد. بهترین کارایی حذف، با روش انعقاد شیمیایی در دما ۲۵ °C، سرعت هم‌زدن برابر با ۱۲۰ rpm، pH برابر با ۶ و غلظت اولیه کبالت و منگنز برابر با ۲۰ ppm و در زمان ۹۰ دقیقه به‌دست آمد. در شرایط یادشده حدود ۵۹٫۸ درصد کبالت و ۵۷٫۲ درصد منگنز حذف شد. فرایند انعقاد الکتریکی برای تکمیل فرایند تصفیه پساب پتروشیمی شهید تندگویان پس از انعقاد شیمیایی به‌کارگرفته شد. عامل‌های بهینه در فرایند انعقاد الکتریکی برای حذف کبالت و منگنز شامل زمان تعادل ۴۶ دقیقه، pH معادل با ۶ و ولتاژ ۲۵٫۸ ولت بود که تحت این شرایط بازده حذف با دو فرایند پی‌درپی انعقاد شیمیایی و انعقاد الکتریکی، ۹۸٫۳ و ۹۶٫۴ درصد به‌ترتیب برای کبالت و منگنز به‌دست آمد.

واژه‌های کلیدی: کبالت، منگنز، انعقاد شیمیایی، انعقاد الکتریکی.

مقدمه

با صنعتی‌شدن کشورهای متفاوت در سراسر جهان، آلودگی به سرعت افزایش یافت. در نتیجه آلاینده‌ها وارد منابع آب شدند و کیفیت آن را تحت تأثیر قرار دادند. از این‌رو، توجه ویژه‌ای به تخریب پساب در دهه اخیر در سطح ملی و بین‌المللی شده است [۱]. پساب‌های صنعتی بسته به نوع فعالیت و فراورده‌هایشان از گستردگی بالایی برخوردارند. بعضی از این پساب‌ها بسیار پایدارند، به آسانی باعث تخریب محیط‌زیست می‌شوند، مواد آلی بالایی دارند. این بدان معناست که مقادیر کل ذره‌های جامد تعلیقه‌ای، اکسیژن زیستی موردنیاز

* عهده‌دار مکاتبات: stourani@mhriau.ac.ir

(BOD[1]) و همچنین، اکسیژن شیمیایی موردنیاز (COD[2]) در حدود چند ده هزار میلی‌گرم بر لیتر هستند. افزون‌برآن، دارای یون‌های فلزی سنگین نیز هستند که اثرات زیان‌بار و جبران ناپذیری به محیط‌زیست وارد می‌کنند. از این‌رو، پژوهشگران به دنبال یافتن فناوری‌های جدید برای تصفیه پساب‌های صنعتی هستند. با توجه به اثرات مضر فلزهای سنگین، آلودگی آب‌های زیرزمینی و سطحی، گسترش انواع متفاوت بیماری‌ها، عدم وجود بازده رضایت‌بخش در روش‌های متداول تصفیه و امکان توسعه این روش‌ها در کاهش فلزهای سنگین، به‌کارگیری روش‌های کاربردی اهمیت دارد [۲]. تصفیه پساب نیاز به زمان، انرژی و هزینه دارد. هر روشی که بتواند فرایند تصفیه پساب را بهینه کند، بسیار مهم است زیرا یکی از اهداف توسعه پایدار، کاهش مصرف انرژی در سراسر جهان است. تصفیه پساب می‌تواند به روش‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی انجام شود [۱]. همه پژوهشگران به‌دنبال روش‌های جدید برای کاهش بسیاری از مراحل تصفیه شیمیایی هستند و یا امیدوارند با مقدار بهینه مواد شیمیایی (آلودگی) بهترین نتیجه‌ها را به‌دست آورند.

در فرایندهای انعقاد الکتریکی (EC[3])، مواد معدنی با کمپلکس‌شدن و یا با رسوب‌شدن هیدروکسیدهای فلزی حذف می‌شوند، درحالی‌که ترکیب‌های آلی با رسوب هم‌زمان، کمپلکس‌شدن و یا جذب الکترواستاتیک بر سطح هیدروکسیدهای فلزی حذف می‌شوند. ماده آلی همچنین، می‌تواند در سامانه EC در نتیجه تشکیل کلر در آند اکسید شود. با این حال، شدت تشکیل کلر به غلظت اولیه سدیم کلرید بستگی دارد. EC همچنین به‌عنوان یک روش تصفیه مقرون به‌صرفه برای حذف فلزهای سنگین از فاضلاب صنعتی در مقایسه با انعقاد شیمیایی (CC[4]) گزارش شده است. مطالعه‌های زیادی در رابطه با ادغام EC با سایر فناوری‌ها مانند واکنشگاه‌های زیستی و انعقاد شیمیایی پیشنهاد و انجام شده است. به‌کارگیری یک فرایند ترکیبی می‌تواند منجر به صرفه‌جویی در هزینه و انرژی شود و در عین حال عملکرد تصفیه را بهبود ببخشد. ترکیب فرایندهای EC و CC می‌تواند منجر به کاهش زمان جداسازی و بهبود محتوای پساب تولیدشده، شود [۳]. واپایش و بهینه‌سازی سامانه روشی عملی برای مدیریت فرایندهای تصفیه پساب است و می‌تواند کیفیت پساب را بهبود بخشد و هزینه‌ها را نیز کاهش دهد [۴]. پریکا[5] و همکارانش به بررسی حذف فلزهای سنگین با روش انعقاد الکتریکی پرداختند. برپایه نتیجه‌های به‌دست آمده و با روش سطح‌پاسخ (RSM[6])، عامل‌های بهینه‌سازی‌شده برای پساب آلوده به کاتیون‌های فلزهای سنگین با روش انعقاد الکتریکی–شناورسازی شامل فاصله الکترود آهن (–) و آلومینیم (+) برابر با ۱/۵ سانتی‌متر، مدت زمان تماس برابر با ۶۰ دقیقه و چگالی جریان برابر با ۸ میلی‌آمپر معین شد [۵]. داود و همکارانش، به بررسی کارایی فرایند انعقاد–لخته‌سازی برای تصفیه فاضلاب بیودیزل پرداختند. منعقدکننده‌های آلومینیم سولفات، پلی آلومینیم کلرید، آهن کلرید و آهن سولفات در فرایند انعقاد بیودیزل تصفیه فاضلاب بیودیزل با یک دستگاه آزمون استاندارد جار بررسی شد. نتیجه نشان می‌دهد که در چنده[7] مطلوب پلی آلومینیم کلرید (ppm ۳۰۰)، درصد حذف SS، رنگ، COD و روغن به ترتیب ۹۷ ، ۹۵، ۷۵ و ۹۷ درصد، در چنده مطلوب آلومینیم سولفات (ppm ۵۰۰)، ۹۲، ۹۲، ۵۳ و ۹۹ درصد، در چنده مطلوب آهن کلرید (ppm ۳۵۰)، ۹۵ ، ۹۳، ۶۳ و ۹۷ درصد، در چنده مطلوب آهن سولفات (ppm ۴۵۰)، ۸۸، ۸۸، ۵۴ و ۹۴ درصد است. اثر چنده‌های انعقادی بر جامد تعلیقه (SS)، رنگ، COD و حذف روغن و گریس روند مشابهی را نشان داد و PAC[8] به‌عنوان برترین منعقدکننده شناخته شد [۶].

1. Biochemical oxygen demand (BOD)
2. Chemical oxygen demand (COD)
3. Electrocoagulatio
4. Chemical Coagulation
5. Prica
6. Response surfacemethod (RSM)
7. Dose
8. Poly aluminium chloride (PAC)

پاتل و پریخ در سال ۲۰۲۰ کروم (VI) را از پساب، با الکترودهای مس در یک واکنشگاه EC حذف کردند. بیشترین حذف کروم ۹۸/۱۵ درصد در چگالی جریان ۴۱/۳۲ A/m^2، pH برابر با ۷ و فاصله بین الکترودها ۱/۴ سانتی‌متر به‌دست آمد [۷]. الجابری و همکارانش، آرایش جدیدی از الکترودهای آلومینیمی را در یک واکنشگاه EC برای حذف فلزهای سمی از فاضلاب تنظیم کردند .آرایش آن‌ها در واکنشگاه به‌صورت، چهار الکترود هم‌مرکز مکعبی بود که با حالت دوقطبی به منبع تغذیه DC متصل شده بودند. نتیجه‌ها نشان داد که بیشترین حذف سرب، کادمیم و مس به‌ترتیب ۹۹/۷۳، ۹۸/۵۴ و ۹۸/۹۲ در pH برابر با ۱۰، شدت جریان برابر با ۱/۴ A و زمان واکنش ۶۰ دقیقه به‌دست آمد [۸].

در بیشتر پژوهش‌ها به دلیل محدودیت‌های ناشی از تعداد عوامل، هزینه و زمان، تعداد آزمایش‌ها به‌صورت تصاعدی افزایش می‌یابد. بنابراین، باید از روشی استفاده کرد که در آن بتوان با کمترین هزینه و زمان، بیشترین اطلاعات را در مورد فرایند به‌دست آورد، نتیجه‌های منطقی گرفت و شواهد مستندی در مورد فرایند به‌دست آورد. روش‌های بسیاری برای بهینه‌سازی عامل‌های مؤثر در فرایندها وجود دارد، یکی از این روش‌ها، روش سطح‌پاسخ (RSM) است [۹]. روش طراحی آزمایش یکی از روش‌های بهبود کیفیت پساب است. استفاده صحیح از روش‌های طراحی آزمایش‌های آماری می‌تواند مراحل طراحی، بهینه‌سازی و کنترل آلودگی را تسهیل کرده و تعداد آزمایش‌ها را کاهش دهد [۱۰]. افزون بر تفکر طراحی، درک روشن ماهیت پساب و آلاینده‌های موجود در آن بسیار مهم است و تا زمانی‌که ماهیت مشکل به‌روشنی تعریف نشده باشد، هرگز نمی‌توان روش صحیح را انتخاب کرد.

براین‌پایه، این پژوهش با هدف ارزیابی توانایی فرایند CC–EC در تصفیه پساب پتروشیمی شهید تندگویان ارائه شده است. مطالعه‌های پیشین نشان داده که فرایندهای CC و EC در تصفیه فلزهای سنگین مؤثر است، ولی تاکنون مطالعه‌ای در مورد ترکیب دو روش مذکور انجام نشده است. طراحی دی–اپتیمال[1] با روش سطح‌پاسخ برای تعیین شرایط بهینه و مقدار تأثیر هر متغییر مستقل، به‌کارگرفته شد. در واقع هدف از این مطالعه، مدل‌سازی فرایند انعقاد شیمیایی و انعقاد الکتریکی برای تصفیه پساب پتروشیمی شهید تندگویان است. از دیگر اهداف این پژوهش به‌دست آوردن شرایط بهینه برای حذف هم‌زمان کبالت و منگنز با دو فرایند پی‌درپی CC و EC است.

بخش تجربی

جمع‌آوری نمونه‌ها

پساب مورداستفاده در این پژوهش از یک واحد پتروشیمی شهیدتندگویان، با پساب تولیدی روزانه ۳۰۰ مترمکعب در شهرستان بندر ماهشهر در طی یک سال جمع‌آوری شده است. نمونه‌ها در بطری‌های پلی‌اتیلنی به حجم ۱۰۰ میلی‌لیتر در شرایط استاندارد به آزمایشگاه شیمی پتروشیمی شهیدتندگویان منتقل و در کمترین زمان ممکن به‌منظور کاهش خطاهای احتمالی با دستگاه جذب اتمی (AA240 به همراه مولد تولید هیدرید (VGA 77) ساخت شرکت Varian استرالیا) برای سنجش غلظت فلزهای سنگین پساب استفاده شد. پساب‌های خروجی با COD اولیه ۷۸۱۱، ۱۵۷۵۲ و ۴۶۸۲۷ ppm و به‌ترتیب شامل غلظت اولیه کبالت و منگنز برابر با ۲۰، ۴۰ و ۶۰ ppm بودند.

1. D-optimal

انعقادشیمیایی (CC) پساب پتروشیمی شهیدتندگویان (مرحله اول)

آزمایش انعقادشیمیایی (CC) در ظروف شیشه‌ای ویژه جام‌آزمون[1] (مدل FP4 PORTABLE) برپایه روش استاندارد ASTM 2035 انجام شد. نمونه‌ها برپایه برنامه آزمایش در بشرهای یک لیتری آماده شدند. سپس منعقدکننده پلی‌آلومینیم کلرید ساخت چین با چنده معین افزوده شد و هم‌زدن سریع نمونه‌ها (به مدت ۲ دقیقه) و به دنبال آن هم‌زدن کند (به مدت ۲۰ دقیقه) انجام شد. سپس، ظروف از زیر دستگاه آزمایش جام‌آزمون خارج و برای ته‌نشینی و تشکیل لخته‌ها، ۳۰ دقیقه در شرایط سکون قرار داده شدند. پس از مرحله ته‌نشینی، مقدار موردنیاز از نمونه‌ها از میانه ظروف (در حدود ۲ سانتی‌متر) با سرنگ برداشته شدند و مقدار کبالت و منگنز آن‌ها اندازه‌گیری شد. مایع رویی عبوری از مرحله اول (CC) برای تکمیل فرایند تصفیه به مرحله دوم تصفیه (انعقاد الکتریکی (EC)) و به واکنشگاه مربوط منتقل شد.

انعقاد الکتریکی (EC) پساب پتروشیمی شهیدتندگویان (مرحله دوم)

در ادامه تکمیل فرایند تصفیه پساب پتروشیمی شهید تندگویان از روش انعقاد الکتریکی (EC) بهره گرفته شد. واکنشگاه از جنس شیشه‌نشکن و مقاوم در برابر خوردگی اسید به شکل مکعب مستطیل با طول، عرض و ارتفاع به‌ترتیب برابر با ۱۶، ۱۶ و ۲۶ سانتی‌متر با حجم مؤثر ۱٫۵ لیتر انجام پذیرفت. واکنشگاه موردنظر از نوع دو قطبی، دارای چهار عدد الکترود آلومینیمی مشبک (به‌منظور جریان بهتر پساب موردمطالعه بین دو الکترود برای افزایش کارایی فرایند انعقاد) با طول و عرض به‌ترتیب برابر با ۱۶ و ۱۰ سانتی‌متر به ضخامت حدود ۲ میلی‌متر و مساحت هر صفحه ۱۶۰ سانتی‌مترمربع (مساحت مفید سطح هر الکترود مشبک ۱۳۶٫۰۵ سانتی‌مترمربع) با فاصله ثابت ۱٫۵ cm بود. یک منبع تأمین برق (DC power supply long WEI) ساخت کشور تایوان برای تبدیل جریان برق شهری (AC) به جریان مستقیم (DC) با ورودی ۲۲۰ V و خروجی متغییر (۱۰، ۲۰ و ۳۰V) با بیشینه جریان ۵ A به‌عنوان منبع جریان مستقیم به‌کارگرفته شد. برای چیرگی بر غیرفعال-شدن الکترودها، الکترودها پس از انجام هر آزمایش با آب مقطر به مدت ۱ دقیقه شسته و سپس ۳۰ دقیقه در محلول هیدروکلریک اسید (wt ۱۵ درصد) برای تمیزشدن سطح الکترودها پیش از به‌کارگیری دوباره، قرار داده شدند. آزمایش‌ها به صورت دو بار تکرار انجام پذیرفت که نتیجه‌های گزارش‌شده میانگین نتیجه‌های آزمون‌های انجام شده است.

طراحی دی-اپتیمال و سطح‌پاسخ

رویکرد کامپیوتری، طراحی ایده‌ال را از یک طراحی آزمایش معتبر برپایه تعداد کل مجموعه‌های تحلیلی برای یک آزمون و یک مدل مشخص انتخاب می‌کند. این مجموعه آزمایشی، به‌طور معمول شامل تمام ترکیب‌های قابل تصور از سطوح متفاوت عامل‌هایی است که باید بررسی شود. به عبارت دیگر، مجموعه انتخاب شده؛ مجموعه‌ای از ترکیب‌های آزمایشی است که الگوریتم دی-اپتیمال از بین آن‌ها انتخاب می‌کند که کدام مورد در طرح گنجانده شود. برنامه کامپیوتری بیشتر از یک روش پله و مبادله برای انتخاب مجموعه‌ای از آزمایش‌ها استفاده می‌کند [۱۱].

در پژوهش حاضر از ۶ متغیر دما، سرعت هم‌زدن، زمان، مقدار ماده منعقدکننده، pH و غلظت اولیه آلاینده در مرحله اول (CC) و ۳ متغیر زمان تعادل، ولتاژ و pH در مرحله دوم (EC)، برای حذف کبالت و منگنز پساب استفاده شد. سه سطح متفاوت عامل‌ها در طول مطالعه تجربی در هر دو مرحله درنظرگرفته شد. تأثیر تغییر در عامل‌ها بر پاسخ، درصد حذف کبالت و منگنز پساب در طول آزمایش‌های تجربی بررسی شد. مطالعه تجربی با رویکرد طراحی آزمایش‌ها با به‌کارگیری روش سطح‌پاسخ مبتنی بر طرح دی-اپتیمال با تحلیل وردایی (ANOVA)[2]

1. Jar test

2. Analysis of variance (ANOVA)

انجام شد [۱۲]. نرم‌افزار طراحی آزمایش‌ها (Design Expert) نسخه ۱۰ برای طراحی سطوح آزمایش به‌کارگرفته شد. برای جلوگیری از خطای سامانمند، آزمایش‌ها به‌صورت تصادفی انجام شد [۱۳]. پیش‌بینی سطح‌پاسخ فرایند CC و EC با توجه به متغییرهای موردبررسی از چندجمله‌ای توصیف‌شده با معادله ۱ به‌دست‌آمد [۱۴].

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^{k} \beta_0 X_i + \sum_{i=1}^{k} \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=2}^{k} \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon \quad (i \neq j) \qquad (۱)$$

در معادله ۱، Y متغییر پاسخ (درصد حذف کبالت و منگنز پساب)، X_i و X_j متغییرهای مستقل کدشده، k تعداد متغییرهای مستقل، ε باقیمانده‌های مدل (تفاوت بین مقادیر مشاهده‌ای و برآورده شده مدل) و β_o ،β_i ،β_{ii} ،β_{ij} نیز به‌ترتیب نشان‌دهنده اثر عرض از مبدأ، توابع خطی، توابع درجه دوم و برهم‌کنش بین متغییرها است.

ارزیابی آماری

ارزیابی مدل به‌دست آمده مبتنی بر RSM با به‌کارگیری شاخص‌های آماری مانند ضریب تعیین (R^2) بررسی می‌شود. R یک معیار عاملی از همبستگی است که تعیین می‌کند، رابطه خطی بین جفت متغیرهای متناظر وجود دارد. R^2 معیار پراکندگی نقاط داده را در اطراف خط وایازش[1] اندازه‌گیری می‌کند. بالابودن مقدار ضریب تعیین نشان می‌دهد که تفاوت‌های کمتری بین مقادیر مشاهده‌شده و برآوردشده برای مجموعه‌ای از داده‌های مشابه وجود دارد [۱۵]. میانگین مربع‌های خطا در مدل‌های آماری مقدار عدم دقت را تعیین می‌کند. میانگین مجذور تفاوت بین مقدارهای مشاهده‌شده و موردانتظار محاسبه می‌شود. هنگامی‌که هیچ خطایی در یک مدل وجود ندارد، مقدار آن برابر صفر و با افزایش عدم دقت مدل، مقدار آن نیز افزایش می‌یابد [۱۶].

شایان ذکر است، یکی از اهداف این پژوهش به دست‌آوردن شرایط بهینه برای کاهش هم‌زمان کبالت و منگنز پساب است.

نتیجه‌ها و بحث

نتیجه‌های تصفیه پساب پتروشیمی شهیدتندگویان

در این مطالعه، آزمایش‌های طراحی‌شده با نرم‌افزار برای فرایند CC در جدول ۱ نشان داده شده است. همان‌گونه که در این جدول مشخص است برپایه داده‌های ورودی نرم‌افزار، ۱۳ آزمایش طراحی شده است. با توجه به ثبت غلظت اولیه کبالت و منگنز پساب موجود در نمونه‌ها و محاسبه مقدار باقی‌مانده، درصد حذف کبالت و منگنز پساب در هر مرحله از آزمایش محاسبه شد.

با توجه به نتیجه‌های به‌دست آمده از جدول ۱ می‌توان دریافت که بالاترین درصد جداسازی برای کبالت و منگنز در شرایط pH برابر با ۶، مقدار ماده منعقدکننده برابر با ۱۵ ppm، غلظت اولیه کبالت و منگنز برابر با ۲۰ ppm، دمای ۲۵ °C، سرعت هم‌زدن برابر با ۱۲۰ rpm و زمان ۹۰ دقیقه به‌دست آمد که به‌ترتیب برای کبالت و منگنز برابر با ۵۹٫۸ و ۵۷٫۲ درصد بود. همچنین، جدول ۱ نشان می‌دهد. غلظت اولیه یون کبالت (۸٫۰۴ ppm) و منگنز (۸٫۵۶ ppm) در پساب که مربوط به حذف بیشینه در مرحله اول (CC) است، وارد مرحله دوم (EC) می‌شود (جدول ۲).

در مرحله دوم (فرایند EC) با شرایط زمان تعادل ۶۰ دقیقه، ولتاژ ۳۰ ولت و pH برابر با ۶ بیشینه درصد حذف برای کبالت و منگنز پساب به‌دست آمد. به بیان‌دیگر، بازده حذف کبالت و منگنز از پساب با دو فرایند پی‌درپی انعقاد شیمیایی و الکتریکی به ترتیب معادل با ۹۷٫۱ و ۹۵٫۵ درصد تعیین شد.

1. Regression

جدول ۱ آزمایش‌های طراحی‌شده در سطوح متفاوت متغیرها و بازده تجربی حذف کبالت و منگنز در فرایند انعقاد شیمیایی

آزمایش	زمان : X_1 (دقیقه)	X_2 : pH	سرعت هم‌زدن : X_3 (rpm)	X_4 : PAC (ppm)	غلظت اولیه هریک از آلاینده‌ها : X_5 (ppm)	دما : X_6 (°C)	درصد حذف	
					Co و Mn		Co	Mn
۱	۹۰	۶	۸۰	۱۰	۲۰	۴۵	۵۸٫۰	۵۵٫۴
۲	۶۰	۵	۱۰۰	۱۰	۴۰	۳۵	۵۱٫۰	۴۸٫۴
۳	۱۵	۵	۱۲۰	۵	۲۰	۴۵	۳۹٫۰	۳۶٫۴
۴	۹۰	۳	۱۲۰	۱۵	۲۰	۳۵	۳۵٫۴	۳۲٫۸
۵	۱۵	۳	۸۰	۱۵	۴۰	۴۵	۲۰٫۴	۱۷٫۸
۶	۱۵	۶	۸۰	۵	۶۰	۳۵	۳۲٫۰	۲۹٫۴
۷	۹۰	۶	۱۲۰	۱۵	۲۰	۲۵	۵۹٫۸	۵۷٫۲
۸	۶۰	۳	۸۰	۵	۴۰	۲۵	۱۵٫۶	۱۳٫۰
۹	۱۵	۶	۱۰۰	۱۵	۲۰	۲۵	۵۳٫۰	۵۰٫۴
۱۰	۶۰	۶	۱۲۰	۱۵	۶۰	۴۵	۴۳٫۰	۴۰٫۴
۱۱	۹۰	۵	۸۰	۵	۶۰	۲۵	۳۹٫۵	۳۶٫۹
۱۲	۹۰	۳	۱۰۰	۵	۶۰	۴۵	۲۱٫۰	۱۸٫۴
۱۳	۱۵	۳	۱۲۰	۱۰	۶۰	۲۵	۱۷٫۶	۱۵٫۰

جدول ۲ آزمایش‌های طراحی‌شده در سطوح متفاوت متغییرها در مرحله دوم (فرایند انعقاد الکتریکی) و بازده تجربی حذف کبالت و منگنز در فرایند انعقاد شیمیایی-انعقاد الکتریکی

آزمایش	زمان : X_1 (دقیقه)	X_2 : pH	ولتاژ : X_3 (ولت)	درصد حذف	
				Co	Mn
۱	۱۰	۵	۲۰	۶۷٫۰	۶۴٫۴
۲	۶۰	۶	۱۰	۶۱٫۶	۵۹٫۰
۳	۳۰	۵	۱۰	۵۳٫۱	۵۰٫۵
۴	۱۰	۶	۳۰	۸۲٫۷	۸۰٫۱
۵	۶۰	۵	۲۰	۶۸٫۰	۶۵٫۴
۶	۶۰	۶	۳۰	۹۷٫۱	۹۵٫۵
۷	۳۰	۶	۲۰	۹۵٫۹	۹۳٫۳
۸	۳۰	۳	۱۰	۳۹٫۸	۳۷٫۲
۹	۶۰	۵	۳۰	۷۶٫۱	۷۳٫۵
۱۰	۶۰	۳	۲۰	۶۸٫۴	۶۵٫۸
۱۱	۳۰	۳	۳۰	۶۸٫۸	۶۶٫۲
۱۲	۱۰	۶	۱۰	۴۷٫۰	۴۴٫۴
۱۳	۱۰	۳	۲۰	۶۲٫۰	۵۹٫۴

توسعه مدل و تجزیه و تحلیل آماری مرحله انعقاد شیمیایی

مراحل تحلیل آماری نتیجه‌ها شامل مراحل زیر است:

۱. ابتدا همه متغیرهای شش‌گانه (زمان، pH، سرعت هم‌زدن، مقدار ماده منعقدکننده، غلظت اولیه آلاینده و دما) مرحله انعقاد شیمیایی در بازه $\{۱ \quad ۱-\}$ با معادله ۲ بدون بعد می‌شوند.

$$S_i = 2\left((X_i - X_{i,min})/X_{i,max}\right) - X_{i,max} - 1 \qquad (۲)$$

که در معادله ۲، X_i متغیر بعددار i ام در مرحله انعقاد شیمیایی، S_i متغیر بی‌بعد i ام در مرحله انعقاد شیمیایی، $X_{i,max}$ مقدار بیشینه متغیر بعددار i ام در مرحله انعقاد شیمیایی، $X_{i,min}$ مقدار کمینه متغیر بعددار i ام در مرحله انعقاد شیمیایی، i شماره متغیر از ۱ تا ۶ در مرحله انعقاد شیمیایی است.

۲. پس از بی‌بعدکردن متغیرها و با درنظرگرفتن ستون‌های درصد حذف Co و Mn از جدول ۱ و با انجام وایازش خطی،

جدول تجزیه وردایی و ضرایب مدل برای پیش‌بینی درصد بازده برای کبالت و منگنز به‌دست آمد (جدول ۳).

جدول ۳ نتیجه تحلیل وردایی (ANOVA) در فرایند انعقاد شیمیایی برای حذف کبالت*

ضریب‌ها		خطای استاندارد	مقدار P
عرض از مبداء	۳۶٫۱۵۵۱۳۱	۱٫۵۴۵۸۹۷	۰٫۰۰۰۰۰۰۴
S1	۴٫۶۴۰۱۷۹	۱٫۷۵۱۹۳۵	۰٫۰۳۸۱۰۰
S2	۱۲٫۴۷۹۱۹۳	۷۷۳۰۲۱	۰٫۰۰۰۴۱۱
S3	۰٫۹۴۸۰۲۲	۱٫۹۱۹۳۳۸	۰٫۶۳۸۹۱۳
S4	۲٫۳۰۹۷۱۶	۲٫۰۵۴۵۵۶	۰٫۳۰۳۸۸۶
S5	−۵٫۲۳۵۴۵۶	۱٫۹۴۸۴۳۳	۰٫۰۳۶۱۹۷
S6	−۰٫۴۰۷۰۰۰	۱٫۷۵۳۱۹۸	۰٫۸۲۴۱۳۹

* تعداد آزمایش‌ها برابر با ۱۳، R^2 برابر با ۰٫۹۴، R_{adj}^2 برابر با ۰٫۸۷ و خطای استاندارد برابر با ۵٫۵۴ بود.

جدول ۴ نتیجه تحلیل وردایی (ANOVA) در فرایند انعقاد شیمیایی برای حذف منگنز*

ضریب‌ها		خطای استاندارد	مقدار P
عرض از مبداء	۳۳٫۵۵۷۱۵۸	۱٫۵۴۶۱۱۴	۰٫۰۰۰۰۰۰۶
S1	۴٫۶۴۲۷۶۲	۱٫۷۵۲۱۸۱	۰٫۰۳۸۰۴۴
S2	۱۲٫۴۸۱۲۹۰	۱٫۷۷۳۲۶۹	۰٫۰۰۰۴۱۱
S3	۰٫۹۴۴۴۳۵	۱٫۹۱۹۶۰۷	۰٫۶۴۰۲۰۴
S4	۲٫۳۰۹۶۲۰	۲٫۰۵۴۸۴۴	۰٫۳۰۳۹۶۶
S5	−۵٫۲۳۸۵۸۶	۱٫۹۴۸۷۰۶	۰٫۰۳۶۱۳۷
S6	−۰٫۴۰۴۰۰۰	۱٫۷۵۳۴۴۴	۰٫۸۲۵۴۳۳

* تعداد آزمایش‌ها برابر با ۱۳، R^2 برابر با ۰٫۹۳، R_{adj}^2 برابر با ۰٫۸۷ و خطای استاندارد برابر با ۵٫۵۴ بود.

مقدارهای پایین انحراف استاندارد در جدول‌های ۳ و ۴ نشان‌دهنده قابل‌اعتمادبودن بالای نتیجه‌های به‌دست آمده است. نتیجه‌ها نشان داد یافته‌ها با پیش‌بینی مدل در یک راستا قرار دارند و با یکدیگر هم‌خوانی دارند. به‌بیان‌دیگر، برپایه مدل سطح‌پاسخ که نشان‌دهنده ارتباط کارایی فرایند CC با متغیرهای وابسته بود، نتیجه‌های مدل به‌خوبی با نتیجه‌های آزمایشگاهی هماهنگ بود. معادله اصلاح‌شده نهایی مدل در فرایند انعقاد شیمیایی برای درصد حذف کبالت و منگنز به‌ترتیب به‌صورت معادله‌های ۳ و ۴ به‌دست آمد.

$$\%\ Y_{Co} = +\ ۳۶٫۱۵ + ۴٫۶۴\ X_1 + ۱۲٫۴۸\ X_2 + ۰٫۹۵\ X_3 + ۲٫۳۱\ X_4 - ۵٫۲۴\ X_5 - ۰٫۴۱\ X_6 \qquad (۳)$$

$$\%\ Y_{Mn} = +\ ۳۳٫۵۶ + ۴٫۶۴\ X_1 + ۱۲٫۴۸\ X_2 + ۰٫۹۴\ X_3 + ۲٫۳۱\ X_4 - ۵٫۲۴\ X_5 - ۰٫۴۰\ X_6 \qquad (۴)$$

در معادله‌های ۳ و ۴، X_1، X_2، X_3، X_4، X_5 و X_6 به‌ترتیب مربوط به مقادیر کدشده زمان ته‌نشینی، pH، سرعت هم‌زدن، مقدار منعقدکننده پلی‌آلومینیم کلرید، غلظت ورودی کبالت و منگنز، دما و Y_{Co} و Y_{Mn} نشانگر متغیر پاسخ برای حذف کبالت و منگنز هستند. در این معادله همه جمله‌های یادشده در انتخاب مدل مشاهده می‌شوند. این موضوع نشان می‌دهد که همه عامل‌ها در روند حذف کبالت و منگنز اثرگذار هستند. از طرفی علامت مثبت نشان‌دهنده این است که افزایش عامل سبب افزایش بازده جداسازی می‌شود این‌درحالی است که علامت منفی نتیجه عکس این موضوع را نشان می‌دهد [۱۷]. بیشینه بازده برای هر دو فلز در شرایط جدول ۵ به‌دست خواهد آمد. در شرایط جدول ۵ آزمایش انجام شد و مقدار بیشینه بازده که با مدل تخمین زده شده بود برای مرحله انعقاد شیمیایی به‌دست آمد. با توجه به جدول ۵، می‌توان دید که نقطه بیشینه تخمین‌زده‌شده به‌وسیله مدل با مقدار بیشینه آزمایش انجام‌شده (جدول ۱) همخوانی دارد.

توسعه مدل و تجزیه و تحلیل آماری مرحله انعقاد الکتریکی

ابتدا همه متغیرهای سه گانه (زمان تعادل، pH و ولتاژ) مرحله انعقاد الکتریکی در بازه $\{۱\ \ -۱\}$ با معادله ۲ بی‌بعد - شدند. سپس، با در نظر گرفتن ستون‌های درصد حذف کبالت و منگنز در جدول ۲، با انجام وایازش و تحلیل وردایی، ضرایب

مدل سطح پاسخ برای پیش‌بینی درصد بازده برای دو فلز کبالت و منگنز به‌دست آمد (جدول‌های ۶ و ۷).

جدول ۵ درصد بازده حذف کبالت و منگنز در فرایند انعقاد شیمیایی در شرایط بیشینه بازده پیش‌بینی‌شده با مدل سطح‌پاسخ

زمان : X_1 (دقیقه)	X_2 : pH	سرعت همزدن : X_3 (rmp)	X_4 : PAC (ppm)	غلظت اولیه هر آلاینده: X_5 (ppm)	دما : X_6 (°C)	درصد حذف	
				Co و Mn		Co	Mn
۹۰	۶	۱۲۰	۱۵	۲۰	۲۵	۵۹٫۸	۵۷٫۲

جدول ۶ نتیجه تحلیل وردایی (ANOVA) در فرایند انعقاد الکتریکی برای حذف کبالت*

ضریب‌ها		خطای استاندارد	مقدار P
عرض از مبداء	۷۵٫۱۲۳۸۱	۵٫۲۸۳۸۰۲	۰٫۰۰۰۷۵۴
S1	۱۵٫۳۷۵۸۴	۲٫۴۲۹۳۱۴	۰٫۰۰۷۹۷۴
S2	۳٫۹۹۶۷۶۳	۲٫۳۰۰۷۲۱	۰٫۱۸۰۷۵۱
S3	۱۲٫۲۷۸۱۸	۲٫۳۰۲۸۵۹	۰٫۰۱۲۸۹۵
S1S2	۰٫۱۹۲۱۳۱	۲٫۹۱۳۵۷۲	۰٫۹۵۱۵۷۱
S1S3	۱٫۶۳۴۵۳۷	۲٫۶۹۴۳۲۵	۰٫۵۸۶۹۰۸
S2S3	۱٫۷۶۳۷۲۰	۲٫۶۷۰۵۰۹	۰٫۵۵۶۱۵۳
S1S1	−۱۵٫۰۲۳۶۰۰	۳٫۹۳۲۸۹۰	۰٫۰۳۱۵۷۴
S2S2	−۱۰٫۱۶۰۴۰۰	۴٫۳۵۶۰۹۷	۰٫۱۰۱۹۲۱
S3S3	۹٫۹۲۲۸۴۰	۴٫۴۷۷۸۳۵	۰٫۱۱۳۴۶۶

* تعداد آزمایش‌ها برابر با ۱۳، R^2 برابر با ۰٫۹۷، R_{adj}^2 برابر با ۰٫۸۷ و خطای استاندارد برابر با ۶٫۱۹ بود.

داده‌های جدول‌های ۶ و ۷ نشان داد، یافته‌ها با پیش‌بینی مدل همخوانی دارند.

در فرایند انعقاد الکتریکی درصد حذف کبالت و منگنز برپایه مدل سطح‌پاسخ به‌صورت معادله‌های ۵ و ۶ به‌دست آمد.

$$\%\ Y_{Co} = +\ ۷۵٫۱۲ + ۱۵٫۳۷\ A + ۴٫۰۰\ B + ۱۲٫۲۸\ C + ۰٫۱۹\ AB + ۱٫۶۳\ AC + ۱٫۷۶\ BC - ۱۵٫۰۲\ A^2 - ۱۰٫۱۶\ B^2 - ۹٫۹۲\ C^2 \qquad (۵)$$

$$\%\ Y_{Mn} = +\ ۷۲٫۳۷ + ۱۵٫۴۴\ A + ۴٫۰۴\ B + ۱۲٫۳۸\ C + ۰٫۳۷\ AB + ۱٫۷۴\ AC + ۱٫۸۹\ BC - ۱۵٫۰۱\ A^2 - ۱۰٫۱۴\ B^2 - ۱۰٫۱۵\ C^2 \qquad (۶)$$

در معادله‌های ۵ و ۶ عامل‌های A، B و C به‌ترتیب بیانگر ولتاژ، زمان واکنش و pH اولیه محلول است. با توجه به این که ضریب مربوط به عامل A (ولتاژ) در دو معادله بزرگتر از سایر ضریب‌ها است، بیشترین تأثیر را در مقدار پاسخ دارد.

برای پیش‌بینی شرایط بیشینه بازده حذف فلزهای کبالت و منگنز می‌توان از نرم افزار Solver در Microsoft Excel استفاده کرد. با درنظرگرفتن بازه $\{۱\ \ ۱-\}$ برای متغیرهای سه گانه در حالت بدون بعد و نیز تبدیل آن‌ها به حالت اصلی بعددار شرایط بیشینه برای بازده حذف فلزهای کبات و منگنز مطابق با جدول ۸ به‌دست می‌آید. تحت شرایط بیشینه بازده پیش‌بینی-شده با مدل سطح پاسخ، آزمایش انجام شد که نتیجه‌های آن در جدول ۸ گزارش شده است.

با توجه به جدول ۸، می‌توان دید که مقدار بازده حذف کبالت و منگنز در فرایند انعقاد الکتریکی در شرایط بیشینه بازده پیش‌بینی‌شده با مدل سطح‌پاسخ بیشتر از مقدار بیشینه آزمایش انجام‌شده (در زمان تعادل ۶۰ دقیقه، ولتاژ ۳۰ ولت و pH برابر با ۶) است (جدول ۲). در نتیجه در فرایند انعقاد الکتریکی در شرایط زمان تعادل ۴۶ دقیقه، ولتاژ ۲۵٫۸ ولت و pH برابر با ۶

بیشینه درصد حذف برای کبالت و منگنز پساب به‌دست آمد. در نهایت بازده حذف کبالت و منگنز از پساب با دو فرایند پی‌درپی انعقاد شیمیایی و الکتریکی به ترتیب معادل با ۹۸/۳ و ۹۶/۴ درصد تعیین شد.

جدول ۷ نتیجه تحلیل وردایی (ANOVA) در فرایند انعقاد الکتریکی برای حذف منگنز*

ضریب‌ها		خطای استاندارد	مقدار P
عرض از مبداء	۷۲/۳۷۵۷۷۷	۵/۳۸۱۸۴۹	۰/۰۰۰۸۸۹
S1	۱۵/۴۴۱۰۹۰	۲/۴۷۴۳۹۲	۰/۰۰۸۳۰۰
S2	۴/۰۴۱۲۱۶	۲/۳۴۳۴۱۴	۰/۱۸۳۰۸۴
S3	۱۲/۳۸۱۸۵۰	۲/۳۴۵۵۹۱	۰/۰۱۳۲۵۶
S1S2	۰/۳۶۶۸۸۹	۲/۹۶۷۶۳۶	۰/۹۰۹۴۲۶
S1S3	۱/۷۴۲۰۶۱	۲/۷۴۴۳۲۱	۰/۵۷۰۶۷۰
S2S3	۱/۸۹۲۰۰۳	۲/۷۲۰۰۶۳	۰/۵۳۶۷۳۶
S1S1	−۱۵/۰۱۳۷۰۰	۴/۰۰۵۸۶۹	۰/۰۳۳۱۶۳
S2S2	−۱۰/۱۴۳۰۰۰	۴/۴۳۶۹۲۹	۰/۱۰۶۳۴۳
S3S3	۱۰/۱۵۲۲۱۰	۴/۵۶۰۹۲۶	۰/۱۱۲۴۲۳

* تعداد آزمایش‌ها برابر با ۱۳، R^2 برابر با ۰/۹۷، R_{adj}^2 برابر با ۰/۸۶ و خطای استاندارد برابر با ۶/۳۰ بود.

جدول ۸ درصد بازده حذف کبالت و منگنز در فرایند انعقاد الکتریکی در شرایط بیشینه بازده پیش‌بینی‌شده با مدل سطح‌پاسخ

زمان : X_1 (دقیقه)	X_2 : pH	ولتاژ : X_3 (ولت)	درصد حذف	
			Co	Mn
۴۶	۶	۲۵/۸	۹۸/۳	۹۶/۴

نتیجه‌گیری

در این پژوهش هدف کاهش فلزهای سنگین کبالت و منگنز از پساب پتروشیمی شهید تندگویان با دو فرایند پی‌درپی انعقاد الکتریکی و انعقاد شیمیایی است. روش طراحی آزمایشی با نرم‌افزار دیزاین اکسپرت برای بهینه‌سازی عامل‌ها و دستیابی به بهترین نتیجه‌ها به‌کارگرفته شد. مدل خطی برای محاسبه بازده حذف کبالت و منگنز در مرحله انعقاد شیمیایی به‌دست آمد. همچنین، نتیجه‌های تحلیل وردایی فرایند انعقاد الکتریکی نشان می‌دهد که رابطه ریاضی درجه دوم به‌دست‌آمده برای کاهش کبالت و منگنز قابلیت همخوانی با داده‌های تجربی را دارد. نتیجه‌ها نشان داد که بهترین بازده حذف کبالت و منگنز با روش انعقاد شیمیایی، در pH برابر با ۶، مقدار ماده منعقدکننده برابر با ۱۵ ppm، غلظت اولیه کبالت و منگنز برابر با ۲۰ ppm، دما ۲۵ °C، سرعت هم‌زدن برابر با ۱۲۰ rpm و زمان ۹۰ دقیقه، به ترتیب معادل با ۵۹/۸ و ۵۷/۲ درصد به‌دست آمد. عامل‌های بهینه در فرایند انعقاد الکتریکی، برای حذف کبالت و منگنز به‌ترتیب زمان تعادل ۴۶ دقیقه، ولتاژ ۲۵/۸ ولت و pH برابر با ۶، بیشینه درصد حذف برای کبالت و منگنز پساب به‌دست آمد. در نهایت بازده حذف کبالت و منگنز از پساب با دو فرایند پی‌دربی انعقاد شیمیایی و الکتریکی به ترتیب معادل با ۹۸/۳ و ۹۶/۴ درصد تعیین شد.

مراجع

1. Shojaei S, Shojaei S. Optimization of process conditions in wastewater degradation process. Soft Computing Techniques in Solid Waste and Wastewater Management: Elsevier; 2021. doi: org/10.1016/B978-0-12-824463-0.00010-0
2. Bazrafshan E, Mohammadi L, Ansari-Moghaddam A, Mahvi AH. Heavy metals removal from aqueous environments by electrocoagulation process–a systematic review. Journal of environmental health science and engineering. 2015;13:1-16. doi: org/10.1186/s40201-015-0233-8
3. Swain K, Abbassi B, Kinsley C. Combined electrocoagulation and chemical coagulation in treating brewery wastewater. Water. 2020;12(3):726. doi: org/10.3390/w12030726
4. Elazzouzi M, El Kasmi A, Haboubi K, Elyoubi M. A novel electrocoagulation process using

insulated edges of Al electrodes for enhancement of urban wastewater treatment: Techno-economic study. Process Safety and Environmental Protection. 2018;116:506-15. doi: org/10.1016/j.psep.2018.03.006

5. Prica M, Adamovic S, Dalmacija B, Rajic L, Trickovic J, Rapajic S, et al. The electrocoagulation/flotation study: The removal of heavy metals from the waste fountain solution. Process Safety and Environmental Protection. 2015;94:262-73. doi: org/10.1016/ j.psep.2014.07.002
6. Daud Z, Awang H, Nasir N, Ridzuan MB, Ahmad Z. Suspended solid, color, COD and oil and grease removal from biodiesel wastewater by coagulation and flocculation processes. Procedia-Social and Behavioral Sciences. 2015;195:2407-11. doi: org/10.1016/j.sbspro. 2015.06.234
7. Patel SR, Parikh SP. Statistical optimizing of electrocoagulation process for the removal of Cr (VI) using response surface methodology and kinetic study. Arabian Journal of Chemistry. 2020;13(9):7032-44. doi: org/10.1016/j.arabjc.2020.07.009
8. AlJaberi FY, Hawaas ZA. Electrocoagulation removal of Pb, Cd, and Cu ions from wastewater using a new configuration of electrodes. MethodsX. 2023;10:101951. doi: org/10.1016/j.mex.2022.101951
9. Tak B-y, Tak B-s, Kim Y-j, Park Y-j, Yoon Y-h, Min G-h. Optimization of color and COD removal from livestock wastewater by electrocoagulation process: Application of Box–Behnken design (BBD). Journal of industrial and engineering chemistry. 2015;28 :307-15. doi: org/10.1016/j.jiec. 2015.03.008
10. Yang X, Lira CT. Adsorption equilibrium of benzaldehyde and benzyl alcohol onto polymeric resin from supercritical CO_2. Adsorption. 2017;23:63-71. doi: org/10.1007 /s10450-016-9819-4
11. Fidaleo M, Miele NA, Armini V, Cavella S. Design space of the formulation process of a food suspension by D-optimal mixture experiment and functional data analysis. Food and Bioproducts Processing. 2021;127:128-38. doi: org/10.1016/j.fbp.2021.02.007
12. Sharma P, Sharma AK. Application of response surface methodology for optimization of fuel injection parameters of a dual fuel engine fuelled with producer gas-biodiesel blends. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects. 2021:1-18. doi: org/10.1080/15567036.2021.1892883
13. Tiwari A, Sahu O. Treatment of food-agro (sugar) industry wastewater with copper metal and salt: chemical oxidation and electro-oxidation combined study in batch mode. Water resources and industry. 2017;17:19-25. doi: org/10.1016/j.wri.2016.12.001
14. Rosenbaum ME. Dis-integration of communication in healthcare education: Workplace learning challenges and opportunities. Patient education and counseling. 2017;100 (11):2054-61. doi.org/10.1016/j.pec.2017.05.035
15. Alade IO, Abd Rahman MA, Saleh TA. Predicting the specific heat capacity of alumina/ethylene glycol nanofluids using support vector regression model optimized with Bayesian algorithm. Solar Energy. 2019;183:74-82. doi: org/10.1016/j.solener.2019.02.060
16. Esonye C, Onukwuli OD, Ofoefule AU, Ogah EO. Multi-input multi-output (MIMO) ANN and Nelder-Mead's simplex based modeling of engine performance and combustion emission characteristics of biodiesel-diesel blend in CI diesel engine. Applied Thermal Engineering. 2019;151:100-14. doi: org/10.1016/j.applther maleng.2019.01.101
17. Teymoori M, Jamali HA, Ghanbari R. Application of response surface methodology in the modeling of cadmium removal from aqueous environment by electrocoagulation process. The Journal of Qazvin University of Medical Sciences. 2017;21(2):66-78.

Optimizing the process of chemical coagulation and electrocoagulation in the treatment of Shahid Tandgoyan petrochemical wastewater

H.R. Nooraeinia[1] and S. Tourani[2,*]

1. M.Sc. Student of Department of Chemical Engineering, Mahshahr Branch, Islamic Azad University, Mahshahr, Iran.
2. Assistant Prof. of Departmen of Chemical Engineering, Mahshahr Branch, Islamic Azad University, Mahshahr, Iran.

Abstract: In this research, using the response surface method, the efficiency of the chemical coagulation and electrocoagulation processes in the treatment of Shahid Tangyuan petrochemical wastewater was modeled and optimized. The composition of Shahid Tangyuan petrochemical wastewater containing 20-60 ppm of cobalt and manganese was used in this experiment. By employing Design Expert software, an excellent agreement was obtained between the model and experimental observations in the removal efficiency of cobalt and manganese. By using the chemical coagulation method at a temperature of 25 °C, a mixing speed of 120 rpm and time of 90 minutes, pH equal to 6, and initial concentration of 20 ppm for cobalt and manganese, the best removal efficiency of cobalt and manganese was 59.8 and 57.2%, respectively. The optimal parameters in the electrocoagulation process to remove cobalt and manganese were 46 minutes of equilibrium time, pH equal to 6, and voltage of 25.8 volts. The removal efficiency was 98.3% for cobalt and 96.4% for manganese by combined chemical coagulation and electrocoagulation processes.

Keywords: Cobalt, Manganese, Chemical coagulation, Electrocoagulation.

*** Corresponding author Email:**
stourani@mhriau.ac.ir