

علوم و تکنولوژی محیط زیست، دوره بیست و یکم، شماره شش، شهریورماه ۹۸

ارزیابی فرآیند انعقاد و لخته سازی در حذف فلزات سنگین از پساب شیمیایی

مجتمع فولاد مبارکه

مسعود طاهریون^{*۱}

taheriyoun@cc.iut.ac.ir

علیرضا معماری پور^۲

تاریخ دریافت: ۹۳/۸/۱۳

تاریخ پذیرش: ۹۵/۶/۲۱

چکیده

زمینه و هدف: پساب حاصل از صنایع فولاد به عنوان یکی از منابع آلاینده فلزات سنگین نقش به سزایی در آلوده‌سازی محیط ایفا می‌نماید. لذا تصفیه بهینه و حذف این آلاینده‌ها جهت حفظ محیط‌زیست و رسیدن به استانداردهای تخلیه بسیار اهمیت دارد. در مجتمع فولاد مبارکه طی فرآیند تولید ورق‌های فولادی گالوانیزه و قلع اندود، پسابی تولید می‌شود که حاوی غلظت‌های بالایی از فلزات آهن و کروم می‌باشد. در این تحقیق به ارزیابی کارایی فرآیند انعقاد و لخته سازی در حذف این فلزات از پساب تصفیه‌خانه شیمیایی مجتمع فولاد مبارکه پرداخته می‌شود.

روش بررسی: جهت طراحی آزمایش‌ها از روش طراحی مرکب مرکزی که متداول‌ترین نوع طراحی در روش رویه پاسخ است، استفاده می‌شود. متغیرهای مورد بررسی در این تحقیق چهار عامل pH، کدورت ورودی، غلظت منعقدکننده و غلظت کمک منعقدکننده می‌باشد که هر یک در پنج سطح مورد مطالعه قرار گرفته است. برای هر یک از فلزات مورد بررسی یک مدل رگرسیونی درصد حذف بر حسب عوامل موثر به دست آمده است.

یافته‌ها: نتایج مرحله مدل‌سازی نشان می‌دهد pH تاثیرگذارترین عامل بر غلظت آهن خروجی و کدورت ورودی تاثیرگذارترین عامل بر درصد حذف کروم بوده است. نتایج مرحله بهینه‌سازی نشان می‌دهد غلظت بهینه منعقدکننده مورد استفاده (کلرور فریک) ۳۹۷ میلی‌گرم بر لیتر، غلظت کمک منعقدکننده (پلی‌الکترولایت) ۰/۰۶ میلی‌گرم بر لیتر، pH بهینه ۱۰/۲۵ و کدورت ورودی بهینه ۱۰۳ NTU می‌باشد

بحث و نتیجه‌گیری: رویه پاسخ روش موثری در طراحی آزمایش‌ها است که با ساخت مدل رگرسیونی مرتبه دوم از فرآیند انعقاد و لخته سازی، امکان پیش بینی شرایط مختلف بهره برداری و تاثیر هم‌زمان عوامل بر پاسخ فراهم می‌شود.

واژه‌های کلیدی: انعقاد و لخته سازی، فلزات سنگین، روش رویه پاسخ، طراحی مرکب مرکزی، بهینه سازی.

۱- استادیار دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی اصفهان^{*} (مسئول مکاتبات).

۲- دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی عمران محیط زیست، دانشکده فنی دانشگاه خوارزمی

Evaluation of Coagulation and Flocculation Process in Removal of Heavy Metals from Chemical Wastewater of Mobarakeh Steel Complex

Masoud Taheriyoun^{1*}

taheriyoun@cc.iut.ac.ir

Alireza Memaripour²

Admission Date: September 11, 2016

Date Received: November 4, 2014

Abstract

Background and Objective: Wastewater from the steel industry as one of the heavy metal pollution sources plays an important role in environmental pollution. Therefore, the optimal treatment and removal of these pollutants are very important to protect the environment and achieve discharge standards. In the Mobarakeh Steel Complex, wastewater is produced during the production of galvanized steel and tin-plated steel, containing high concentrations of ferrous and chromium metals. In this study, the efficiency of the coagulation and flocculation process in removing these metals from the wastewater of Mobarakeh Steel chemical treatment plant is investigated.

Method: To design the experiments, the central composite design method, which is the most common design type in response surface methodology (RSM), is used. The variables studied in this study are four factors of pH, inlet turbidity, coagulant and coagulant aid concentrations that each is studied at five levels. For each of the studied metals, a regression model of removal percentage is obtained based on the effective factors.

Findings: Results of the modeling stage shows that pH is the most effective factor on the effluent iron concentration and inlet turbidity is the most effective factor on chromium percent removal. The optimization results show the optimum coagulant dose (ferric chloride) 397 mg/L, coagulant aid concentration (polyelectrolyte) 0.06 mg/L, optimum pH of 10.25 and optimum inlet turbidity of 103 NTU.

Discussion & Conclusion: RSM is an effective method in experimental design that by developing a second-order regression model of the coagulation-flocculation process, it is possible to predict different operating conditions and simultaneous effect of factors on the response.

Keywords: coagulation and flocculation, heavy metals, response surface method (RSM), central composite design, optimization

1- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran
*(Corresponding author).

2- Department of Engineering, Kharazmi University, Tehran, Iran.

مقدمه

بسیاری از فاضلاب های صنعتی حاوی فلزات سنگین هستند که در صورت تخلیه بدون تصفیه به محیط سبب آسیب رساندن به محیط زیست و به خطر انداختن سلامت انسان ها می شوند (۱). پساب صنایع فولادی حاوی مقادیر بالایی از فلزات سنگین است که در مراحل مختلف فرآیند تولید فولاد مانند آهک پزی، گندله سازی، تولید و پرداخت شمش (تختال) و نیز عملیات خنک کاری، ریخته گری مداوم و واحدهای تولید ورق گالوانیزه، قلع اندود و رنگی تولید می شود (۲ و ۳ و ۴). سرب، کادمیوم، کروم، آهن، مس، جیوه، نیکل و روی از جمله مهم ترین فلزات سنگین می باشند که به عنوان آلاینده در محیط زیست شناخته می شوند. در حال حاضر روش های متنوعی جهت حذف فلزات سنگین از محیط آبی وجود دارد که از جمله می توان به روش هایی چون فیلتراسیون، جذب سطحی، اکسیداسیون، اسمز معکوس، انعقاد و لخته سازی و ترسیب شیمیایی اشاره نمود (۵-۱۰).

روش انعقاد و لخته سازی یکی از مهم ترین و پرکاربرد ترین روش ها جهت تصفیه پساب صنعتی می باشد که در آن با کنترل عوامل مختلفی نظیر دما، pH و زمان ماند غلظت منعقدکننده می توان راندمان فرآیند را تا میزان زیادی افزایش داد. در آزمایش های متداول در صورت وجود چند عامل موثر در یک فرآیند، در هر نوبت از آزمایش، یکی از عوامل به صورت متغیر و سایر عوامل به صورت ثابت در نظر گرفته می شوند که این شکل از انجام آزمایش در صورت تعدد عامل ها و سطوح تعریف شده، باعث ایجاد تعداد بسیار زیاد آزمایش شده و انجام آن منجر به صرف هزینه و زمان زیادی خواهد شد (۱۱ و ۱۲ و ۱۳). در چنین شرایطی روش های طراحی آزمایش (DOE) می تواند با بهره گیری از روش های آماری، تعداد آزمایش ها را به طور قابل توجهی کاهش دهد. طراحی آزمایش شامل یک سری از آزمایش ها است که در آن به طور آگاهانه در متغیرهای ورودی فرآیند، تغییراتی ایجاد می گردد تا از این طریق میزان تغییرات حاصل در پاسخ خروجی فرآیند مشاهده و شناسایی شود. روش رویه پاسخ (RSM) یکی از کارآمدترین

روش های طراحی آزمایش می باشد که با انجام اصلاحاتی در روش مشهور تاگوچی، اولین بار توسط دو محقق به نام های باکس و ویلسون در سال ۱۹۵۱ ابداع گردید. از جمله مهم ترین مزایای استفاده از این روش می توان به صرفه جویی در وقت و هزینه از طریق کاهش چشمگیر تعداد آزمایش ها، قابلیت تعیین حالت بهینه برای هر پارامتر و نیز تهیه مدل رگرسیونی فرآیند مورد بررسی اشاره کرد (۱۴ و ۱۵). مهمترین تحقیقات انجام شده در این زمینه شامل به موارد زیر می باشند:

خلیل مقدم و گشتیل (۱۳۹۱) روش های حذف فلزات سنگین از پساب های صنعتی شامل فرآیندهای جذب زیستی و جاذب پوکه معدنی طبیعی، استخراج شکل جامد با استفاده از فوم پلیمری، ترسیب الکتروشیمیایی و فیلتراسیون را بررسی کردند. نتایج نشان می دهد روش جذب با پوکه معدنی روش ارزانی نسبت به دیگر روش هاست، اما برای غلظت های بالای فلزات سنگین روش ترسیب الکتروشیمیایی مناسب تر می باشد (۱۶). Charemtanyarak (1999) راندمان فرآیند انعقاد و لخته سازی پساب سنتزی حاوی فلزات سنگین Zn، Cd، Mn و Mg را بررسی نمود. نتایج نشان داد pH بهینه جهت حذف، در صورت استفاده از آهک به عنوان منعقدکننده برابر ۹/۵ بوده و در صورت استفاده از ۲۵۰ میلی گرم بر لیتر سدیم سولفات میزان راندمان فرآیند به طور قابل ملاحظه ای افزایش می یابد (۱۷).

El Samrani et al (2008) استفاده از دو منعقدکننده کلورفریک و پلی آلومینیوم کلراید را برای حذف کدورت و فلزات سنگین Cr، Pb، Zn و Cu بررسی کردند. نتایج نشان داد که غلظت نهایی فلزات رابطه مستقیمی با کدورت نهایی پساب در هر دو نوع منعقدکننده دارد (۱۸). Heredia et al. (2009) میزان تاثیرگذاری منعقدکننده جدید ساخته شده از جوهر مازو (تانین) را در حذف فلزات Ni، Zn، و Cu مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد در صورت استفاده از ۱۵۰ میلی گرم بر لیتر جوهر مازو، ۷۵ درصد از غلظت عناصر مذکور کاهش می یابد (۱۹).

مواد و روش ها

مواد و وسایل

وسایل و دستگاه‌های مورد استفاده در این تحقیق در جدول (۱) نشان داده شده است.

جدول ۱- وسایل و دستگاه‌های مورد استفاده در این

تحقیق

Table1. Devices and equipment used in this study

نام وسیله	کارخانه سازنده و مدل
جارتست	Phipps & Bird 7790
pH متر	Metrohm 692
ترازو دیجیتال	Mettler AE240
کدورت سنج	Orbeco Hellige
دستگاه جذب اتمی	FAAF 5000
کلیه ظروف شیشه ای	Schot

پساب مورد استفاده در این تحقیق از تصفیه‌خانه‌ی پساب گالوانیزه و قلع اندود مجتمع فولاد مبارکه اصفهان نمونه‌برداری شده است. پساب مورد نظر از ترکیب چهار نوع پساب کرومی، فنلی، روغنی و اسیدی-قلیایی تشکیل شده که پیش از ترکیب، هریک به صورت جداگانه پیش تصفیه می‌گردد. مشخصات پساب ورودی به تصفیه‌خانه مطابق جدول (۲) می‌باشد. طبق این جدول از میان فلزات سنگین مورد مطالعه تنها دو فلز آهن و کروم در محدوده‌ی خارج از استاندارد تخلیه به آب‌های سطحی قرار دارد.

جدول ۲- مشخصات پساب مورد مطالعه

Table2. Studied wastewater characteristics

ردیف	آلاینده	محدوده‌ی تغییرات در پساب (mg/L)	استاندارد تخلیه به آب‌های سطحی (mg/L)
۱	کدورت	۱۲۰-۵۰	۵۰
۲	اکسیژن مورد نیاز شیمیایی	۴۰۰-۱۵۰	۶۰
۳	سولفات	< ۱۰	۴۰۰
۴	غلظت یون آهن	۸-۳	۳
۵	کروم	۰/۳-۶/۴	۲
۶	کادمیوم	۰/۰-۰۲/۰۴	۰/۱
۷	روی	۰/۰-۲/۴۲	۱

(Liu et al. (2012 کاربرد منعقدکننده‌های پلی سولفات فریک، کلروفریک و سولفات فریک را در تصفیه پساب شیرابه یک مرکز دفن با استفاده از روش طراحی آزمایش «رویه پاسخ» بررسی نمودند. در حالت بهینه استفاده از پلی سولفات فریک با غلظت ۸ میلی گرم بر لیتر در pH برابر ۶، کلروفریک با غلظت ۱۰ میلی گرم بر لیتر در pH برابر ۸ و سولفات فریک با غلظت ۱۲ میلی گرم بر لیتر در pH برابر ۷/۵ بیشترین میزان حذف هیومیک اسید را دارند (۲۰).

(Shahzad et al. (2014 به بررسی استفاده از دو منعقدکننده‌ی آلوم و پودر گیاه اولیفر در حذف فلزات سنگین کروم و سرب پرداختند. سه عامل pH، غلظت منعقدکننده و هدایت الکتریکی به عنوان عوامل موثر در بهینه‌سازی در نظر گرفته شده‌اند. شرایط بهینه برابر ۲ گرم بر لیتر پودر گیاه اولیفر، ۲۰ میلی گرم بر لیتر آلوم در pH برابر ۶/۶ و هدایت الکتریکی برابر ۳ میلی زیمنس بر سانتی متر می‌باشد (۲۱).

هدف از انجام این تحقیق، بهینه‌سازی فرآیند انعقاد و لخته‌سازی پساب تصفیه‌خانه گالوانیزه مجتمع فولاد مبارکه با هدف حذف دو فلز سنگین آهن و کروم می‌باشد. مراحل طراحی آزمایش با استفاده از مدل طراحی آزمایش «رویه پاسخ» انجام گرفته است. متغیرهای تاثیرگذار در این تحقیق چهار عامل غلظت منعقدکننده (کلروفریک)، غلظت کمک منعقدکننده (پلی الکترولیت)، pH و کدورت اولیه در نظر گرفته شده که در مرحله بهینه‌سازی مقدار بهینه هریک مشخص می‌شود.

۲	۰/۱-۲/۴	Pb	سرب	۸
۱۰۰	۰/۴-۵	Mg	منیزیم	۹
۲	بسیار ناچیز	Ni	نیکل	۱۰
۷۵	۱۰-۲	Ca	کلسیم	۱۱
۵	بسیار ناچیز	Al	آلومینیوم	۱۲

اندازه‌گیری عنصر کروم با این روش، مجموع کروم سه ظرفیتی و شش ظرفیتی محاسبه می‌شود (۲۳).

آنالیز کدورت

برای اندازه‌گیری کدورت از دستگاه Digital Direct – Reading Turbidimeter ساخت شرکت Metrohm سوییس استفاده شده است. این آنالیز مطابق با دستورالعمل ۲۱۳۰ کتاب روش‌های استاندارد انجام شده است. در این روش ابتدا دستگاه کدورت‌سنج با استفاده از محلول‌های فرمازین (استانداردهای مرجع) تنظیم و کالیبره می‌شود. برای کار با دستگاه پس از روشن کردن، سلول حاوی نمونه‌ی استاندارد را درون دستگاه قرار می‌دهیم. سپس دکمه‌ی Read را فشار داده و مقدار آن را می‌خوانیم. اگر این عدد محدوددهی درست را به ما نشان دهد، دستگاه کالیبره می‌شود و ما می‌توانیم سل حاوی نمونه را درون دستگاه گذاشته و دکمه‌ی Read را فشار دهیم. عدد قرائت شده میزان کدورت را بر حسب NTU بیان می‌کند (۲۴).

طراحی آزمایش

آزمایش‌های طراحی شده در این تحقیق توسط نرم افزار Design Expert 8 و به روش استاندارد رویه پاسخ که روش «طراحی مرکب مرکزی» می‌باشد، انجام گرفته است. مزیت اصلی این روش نسبت به سایر روش‌ها کاهش خطای تصادفی مدل به دلیل تکرار آزمایش‌ها و قابلیت پیش بینی بهتر مدل در اطراف نقاط مرکزی بازه‌ها می‌باشد. در این روش هر عامل در پنج سطح تعریف می‌گردد و دارای سه گروه نقطه طراحی شامل نقاط فاکتوریل، محوری و مرکزی می‌باشد. نقاط فاکتوریل در بردارنده بازه‌ی اصلی تغییرات یک متغیر (عامل) می‌باشد و توسط کاربر به مدل داده می‌شود. نقاط محوری در بردارنده نقاط محدودی خارج از بازه‌ی اصلی تغییرات عامل

منعقدکننده‌ی مورد استفاده از نوع کلرورفریک با درصد خلوص ۴۱ درصد و کمک منعقدکننده‌ی مصرفی، پلی الکترولایت PERROCRYL 8723 محصول شرکت هنکل آلمان می‌باشد.

روش آزمایش

آزمایش جارتست

آنالیز جارتست براساس روش استاندارد ASTM 2035 انجام شده است. آزمایش جار در واقع مدلی کوچک از واحدهای اختلاط سریع، انعقاد، لخته‌سازی و ته نشینی می‌باشد. بر این اساس از بشرهای ۱ لیتری استاندارد به عنوان ظروف آزمایش استفاده می‌گردد. نمونه‌ها براساس برنامه آزمایش ابتدا به مدت دو دقیقه با سرعت ۸۰ تا ۱۲۰ دور بر دقیقه و پس از آن به مدت ۲۰ دقیقه با سرعت ۲۰ دور بر دقیقه، مخلوط می‌گردند. سپس ظروف از زیر دستگاه آزمایش جار خارج شده و مدت ۳۰ دقیقه جهت ته‌نشینی، ساکن نگه داشته می‌شود. پس از مرحله ته نشینی، میزان مورد نیاز نمونه از حدود ۲ سانتی متری سطح ظرف توسط سرنگ برداشته شده و جهت انجام آزمایش جذب اتمی مورد استفاده قرار می‌گیرد (۲۲).

آنالیز جذب اتمی

جهت اندازه‌گیری غلظت عناصر کروم و آهن از روش اسپکتروفتومتری جذب اتمی مطابق با دستورالعمل ASTM E1812 استفاده شده است. برای آنالیز با این روش، نمونه باید در اسیدهای معدنی حل شده و به دستگاه داده شود. در یک تجزیه جذب اتمی توسط دستگاه، عنصر مورد اندازه‌گیری توسط شعله تبخیر می‌شود و به حالت عنصری کاهش می‌یابد. دقت این روش در حد ppm بوده و برای هر عنصر نیاز به لامپ مخصوص آن عنصر می‌باشد. لازم به ذکر است در

داده‌ها، درجه اطمینان محاسبه می‌شود. هدف اصلی از این آنالیز، استخراج واریانس هریک از عوامل نسبت به واریانس کل است. نتایج آنالیز واریانس شامل درجه آزادی هریک از عوامل (DOF)، واریانس هر عامل (V)، مجموعه مربعات (SS)، نسبت واریانس هر عامل به واریانس خطا (F) و درصد تاثیر هر عامل بر تابع هدف (P) می‌باشد. پس از تحلیل واریانس، امکان تعیین ضریب برازش (R^2) و نیز نسبت سیگنال به نویز (S/N) فراهم می‌شود. ضریب برازش عددی در بازه صفر و یک بوده و نشان‌دهنده‌ی میزان موفقیت مدل در برازش داده‌ها می‌باشد. نسبت سیگنال به نویز نیز نشان‌دهنده‌ی حساسیت مدل به عوامل غیر قابل کنترل می‌باشد و مقادیر بالاتر آن کفایت هرچه بیشتر مدل را نشان می‌دهد. در حالت کلی مقدار سیگنال به نویز بالاتر از ۴ قابل قبول می‌باشد (۲۵).

نتایج

آزمایش‌های اولیه برای تعیین محدوده عوامل

عامل غلظت منعقدکننده

همان‌گونه که بیان شد منعقدکننده‌ی مورد استفاده در این آزمایش، کلرور فریک با خلوص ۴۰/۵۷ درصد $FeCl_3$ می‌باشد. آزمایش‌های اولیه جهت تعیین محدوده مناسب این عامل به عنوان عامل ورودی به مدل سطح رویه، در شکل (۱) نشان داده شده است. در آزمایش‌های مذکور غلظت کمک منعقدکننده بر حسب میلی‌گرم بر لیتر، کدورت ورودی بر حسب NTU و pH به ترتیب برابر ۰/۱، ۶۰ و ۱۱ می‌باشد. با توجه به نتایج آزمایش‌های اولیه بازه تغییرات این عامل در محدوده ۳۵۰ تا ۷۵۰ میلی‌گرم بر لیتر در نظر گرفته شده است.

مورد نظر می‌باشد و توسط مدل مشخص می‌شود و نقاط مرکزی برابر میانگین کمترین و بیشترین مقدار هر عامل می‌باشد (۲۵).

تعداد آزمایش‌ها در روش طراحی مرکب مرکزی به صورت رابطه (۱) محاسبه می‌شود:

$$N = K^2 + 2K + C_p \quad \text{رابطه (۱)}$$

در رابطه بالا K تعداد عوامل و C_p بیانگر تعداد نقاط تکرار می‌باشد.

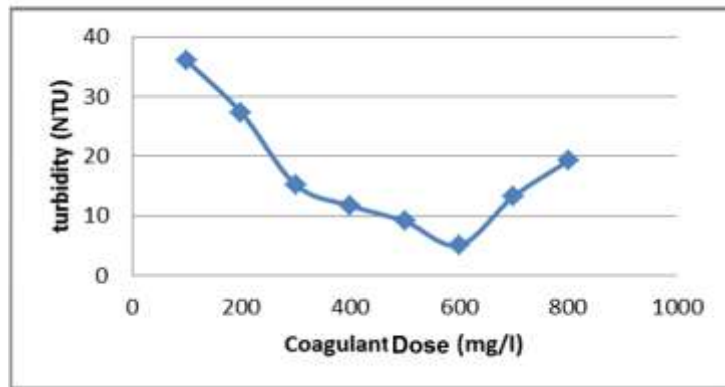
در روش طراحی آزمایش به روش رویه پاسخ، به دلیل وجود متغیرهای فراوان، داده‌ها به صورت کد شده تبدیل می‌شوند. این کار باعث می‌شود مقایسه متغیرها با یکدیگر به راحتی انجام گیرد. روش تبدیل داده‌ها به کد مطابق رابطه (۲) می‌باشد:

$$x_i = \frac{Z_i - Z_0}{Z_{max} - Z_{min}/2} \quad \text{رابطه (۲)}$$

که در آن x_i مقدار کدشده متغیر، Z_i مقدار واقعی متغیر، Z_0 مقدار میانگین متغیر در بازه‌ی اصلی تغییرات و Z_{max} و Z_{min} به ترتیب کران بالا و پایین بازه‌ی اصلی تغییرات می‌باشد.

آنالیز واریانس

در طراحی آزمایش به دلیل این‌که تنها بخشی از آزمایش‌ها انجام می‌شود، باید از نتایج اطمینان حاصل شود. آنالیز واریانس روش استاندارد آماری است که به بررسی کمی و کیفی داده‌ها پرداخته و میزان معنی‌دار بودن تاثیر هر عامل را بر پاسخ مورد نظر بررسی می‌نماید. در این روش، تحلیل اطلاعات به صورت مستقیم انجام نمی‌گیرد، بلکه با تحلیل و بررسی تغییرات



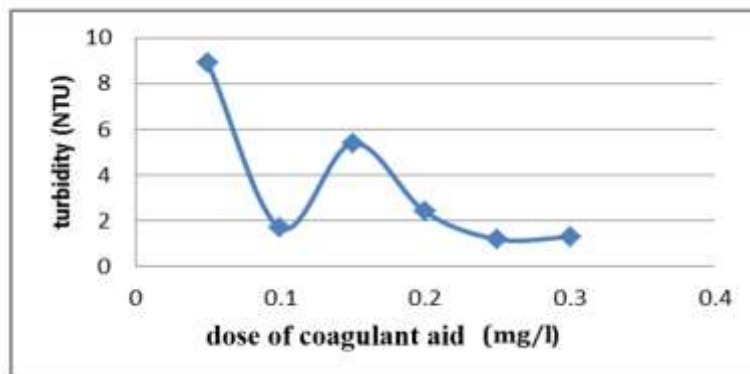
شکل ۱- نتایج آزمایش‌های اولیه جهت تعیین محدوده مناسب دوز منعقدکننده

Figure 1. Results of primary tests to find the appropriate range of coagulant dose

عامل غلظت کمک منعقدکننده

اولیه بر حسب NTU و pH به ترتیب برابر ۵۰، ۴۰۰ و ۱۱/۵ می‌باشد. باتوجه به نتایج آزمایش‌های اولیه و ملاحظات اقتصادی، بازه تغییرات این عامل نیز در محدوده ۰/۵ تا ۰/۲۵ میلی گرم بر لیتر در نظر گرفته شده است.

کمک منعقدکننده مورد استفاده در این آزمایش پلی الکتروالیت مدل PERROCRYL 8723 ساخت شرکت هنکل می‌باشد. آزمایش‌های اولیه جهت تعیین محدوده مناسب این عامل در شکل (۲) نشان داده شده است. در آزمایش‌های مذکور غلظت منعقدکننده برحسب میلی‌گرم بر لیتر، کدورت



شکل ۲- نتایج آزمایش‌های اولیه جهت تعیین محدوده مناسب کمک منعقدکننده

Figure 2. Results of primary tests to find the appropriate range of dose of coagulant aid

عامل کدورت ورودی

با توجه به ماهیت متغیر پساب این واحد، بازه تغییرات عامل کدورت ورودی در یک بازه زمانی دو هفته ای مورد بررسی قرار گرفته و با توجه به نتایج به دست آمده، بازه تغییرات این عامل در محدوده ۴۰ تا ۱۲۰ NTU در نظر گرفته شده است. در جدول (۳) چهار عامل مورد بررسی در این تحقیق به همراه بازه تغییرات هر یک نشان داده شده است.

عامل pH

از آنجایی که محدوده تغییرات pH پساب در هنگام ورود به واحد انعقاد و لخته‌سازی تصفیه‌خانه مورد نظر به صورت آنالین پایش و ثبت می‌شود، بازه تغییرات مورد نظر برای این عامل با توجه به تغییرات pH پساب در محدوده ۹/۵ تا ۱۲/۵ در نظر گرفته شده است.

جدول ۳- عوامل در نظر گرفته شده در آزمایش و بازه تغییرات آن ها

Table 2. Assumed factors in the experiment and their range of variations

بازه‌ی تغییرات بادر نظر گرفتن ضریب آلفا برابر ۲		بازه‌ی اصلی تغییرات		واحد	علامت اختصاری	متغیر(عامل)
کران بالا	کران پایین	کران بالا	کران پایین			
۷۵۰	۳۵۰	۶۵۰	۴۵۰	میلی گرم بر لیتر/mg/L	A	غلظت منعقدکننده (کلورفریک)
۰/۲۵	۰/۰۵	۲/۰	۰/۱	میلی گرم بر لیتر/mg/L	B	غلظت کمک منعقدکننده (پلی الکترولایت)
۱۲/۵	۹/۵	۱۱/۷۵	۱۰/۲۵	-	C	pH
۱۲۰	۴۰	۱۰۰	۶۰	میلی گرم بر لیتر/mg/L	D	کدورت ورودی

مدل سازی

درصد حذف استفاده نشده است، افزایش غلظت این یون در برخی از نمونه‌ها پس از انجام آزمایش می‌باشد. این امر به دلیل وجود یون آهن در ماده منعقدکننده کلورفریک می‌باشد. در این تحقیق برای هر دو پاسخ مورد بررسی، مدل مرتبه دوم (Quadratic) داده‌ها را به نحو مناسب تری برازش می‌نماید. معادله‌های رگرسیونی حاصل از این برازش مطابق رابطه (۳) و (۴) می‌باشد که در آن مقادیر متغیرها باید بر اساس رابطه (۲) به صورت کد شده وارد شود.

آزمایش‌های طراحی شده توسط نرم‌افزار در جدول (۴) نشان داده شده است. همان گونه که در این جدول مشخص است، بر اساس داده‌های ورودی، نرم افزار تعداد ۳۰ سری آزمایش طراحی نموده است که از این تعداد ۶ آزمایش به صورت تکراری می‌باشد. در جدول (۲) هم‌چنین نتایج آزمایش جذب اتمی هر یک از نمونه‌ها نشان داده شده است. پاسخ اول مربوط به غلظت آهن خروجی و پاسخ دوم مربوط به درصد حذف یون کروم کل می‌باشد. دلیل این‌که در مورد پاسخ یون آهن از

Output Fe =

$$2.61429 + 3.46708 A + 0.317917 B - 6.09125 C - 1.37125 D + 0.405074 A*A - 0.0399256 B*B + 3.00757 C*C + 1.76757 D*D + 0.560625 A*B - 5.96313 A*C - 0.100625 A*D - 0.764375 B*C - 0.934375 B*D + 0.641875 C*D$$

رابطه (۳)

Chromium Removal =

$$97.0842 - 0.518042 A - 0.407933 B + 1.13397 C + 3.25949 D + 0.186963 A*A + 0.185226 B*B - 0.239212 C*C - 2.09990 D*D - 1.80801 A*B + 2.59972 A*C - 0.219550 A*D + 0.601725 B*C + 0.895825 B*D - 0.504112 C*D$$

رابطه (۴)

جدول ۴- آزمایش‌های طراحی شده و نتایج پاسخ‌های مربوطه بر اساس روش طراحی مرکب مرکزی

Table 4. Designed experiments and relevant responses based on central composite design method

پاسخ‌ها		عوامل				شماره آزمایش
درصد حذف کروم %	غلظت آهن خروجی (mg/L)	کدورت ورودی (D) (NTU)	pH (C)	غلظت پلی الکترو لایت (B) (mg/L)	غلظت کلرورفریک (A) (mg/L)	
۹۱/۰۲	۳/۳۱	۶۰	۱۰/۲۵	۰/۱۰	۴۵۰	۱
۹۸/۴۰	۱۹/۷	۶۰	۱۰/۲۵	۰/۱۰	۶۵۰	۲
۹۸/۴۰	۵/۵	۶۰	۱۰/۲۵	۰/۲۰	۴۵۰	۳
۷۶/۹۲	۲۸/۷۵	۶۰	۱۰/۲۵	۰/۲۰	۶۵۰	۴
۸۹/۶۵	۳/۰۸	۶۰	۱۱/۷۵	۰/۱۰	۴۵۰	۵
۹۸/۲۷	۰/۲۵	۶۰	۱۱/۷۵	۰/۱۰	۶۵۰	۶
۹۰/۵۱	۲/۵۵	۶۰	۱۱/۷۵	۰/۲۰	۴۵۰	۷
۹۶/۰۰	۱/۶۴	۶۰	۱۱/۷۵	۰/۲۰	۶۵۰	۸
۹۸/۱۲	۱/۳۷	۱۰۰	۱۰/۲۵	۰/۱۰	۴۵۰	۹
۹۴/۸۳	۲۴/۱۵	۱۰۰	۱۰/۲۵	۰/۱۰	۶۵۰	۱۰
۹۹/۵۳	۲/۳۲	۱۰۰	۱۰/۲۵	۰/۲۰	۴۵۰	۱۱
۹۴/۳۶	۲۲/۷	۱۰۰	۱۰/۲۵	۰/۲۰	۶۵۰	۱۲
۹۷/۶۵	۶/۲۲	۱۰۰	۱۱/۷۵	۰/۱۰	۴۵۰	۱۳
۹۷/۶۵	۰/۴۹	۱۰۰	۱۱/۷۵	۰/۱۰	۶۵۰	۱۴
۹۸/۱۲	۳/۷۵	۱۰۰	۱۱/۷۵	۰/۲۰	۴۵۰	۱۵
۹۱/۰۶	۰/۶۱	۱۰۰	۱۱/۷۵	۰/۲۰	۶۵۰	۱۶
۹۶/۴۷	۲/۵۴	۸۰	۱۱	۰/۱۵	۵۵۰	۱۷
۹۷/۶۷	۲/۵	۸۰	۱۱	۰/۱۵	۵۵۰	۱۸
۹۶/۴۷	۲/۶۴	۸۰	۱۱	۰/۱۵	۵۵۰	۱۹
۹۶/۹۳	۲/۷	۸۰	۱۱	۰/۱۵	۵۵۰	۲۰
۹۸/۹۷	۰/۶۹	۸۰	۱۱	۰/۱۵	۳۵۰	۲۱
۹۸/۵۱	۷/۲	۸۰	۱۱	۰/۱۵	۷۵۰	۲۲
۹۹/۰۱	۲/۵۷	۸۰	۱۱	۰/۰۵	۵۵۰	۲۳
۹۸/۴۶	۱/۷۶	۸۰	۱۱	۰/۲۵	۵۵۰	۲۴
۹۵/۰۷	۲۸/۶	۸۰	۹/۵	۰/۱۵	۵۵۰	۲۵
۹۹/۰۱	۰/۱۱	۸۰	۱۲/۵	۰/۱۵	۵۵۰	۲۶
۸۱/۰۸	۱۶/۸۳	۴۰	۱۱	۰/۱۵	۵۵۰	۲۷
۹۸/۱۲	۱/۹۶	۱۲۰	۱۱	۰/۱۵	۵۵۰	۲۸
۹۸/۰۲	۲/۴۲	۸۰	۱۱	۰/۱۵	۵۵۰	۲۹
۹۷/۵۳	۲/۸۶	۸۰	۱۱	۰/۱۵	۵۵۰	۳۰

و ۲۱/۱۴ می‌باشد و براساس مقدار P-Value هر مدل تنها ۰/۰۱ درصد احتمال دارد که مقدار بالای F-Value مربوط به نویز باشد. به عبارت دیگر بالابودن این ضریب به دلیل تاثیر

نتایج حاصل از تحلیل واریانس داده های این آزمایش در جدول (۵) نشان داده شده است. طبق این جدول مقدار F-Value مدل «آهن خروجی» و «درصد حذف کروم» به ترتیب ۳۳/۳۹

است نزدیک به ۱ بوده و ضرایب همبستگی اصلاح شده و پیش بینی کننده اختلافی بیش از ۰/۲ نداشته باشند. همچنین پارامتر دقت کافی (Adeq Precision)، نسبت سیگنال به نویز را اندازه گیری می کند که در حالت کلی نسبت بزرگ تر از ۴ مطلوب است (۲۴). همان گونه که مشخص است برای هر دو مدل مورد بررسی تمامی ضرایب فوق در محدوده ی مطلوب قرار دارد که نشان دهنده کفایت هر دو مدل می باشد.

بالای عوامل کنترل پذیر (سیگنال) نسبت به عوامل کنترل ناپذیر (نویز) در مدل می باشد. مقدار F-Value مدل وقتی قابل قبول است که از مقدار F critical بیشتر باشد که در این مدل با توجه به درجه آزادی ۱۴ مدل، F critical هر دو مدل برابر ۴/۶ می باشد. در جدول مذکور R-Squared ضریب همبستگی، Adj R-Squared ضریب همبستگی اصلاح شده و Pred R-Squared ضریب همبستگی پیش بینی کننده می باشد. در یک تحلیل آماری مناسب، ضریب همبستگی بهتر

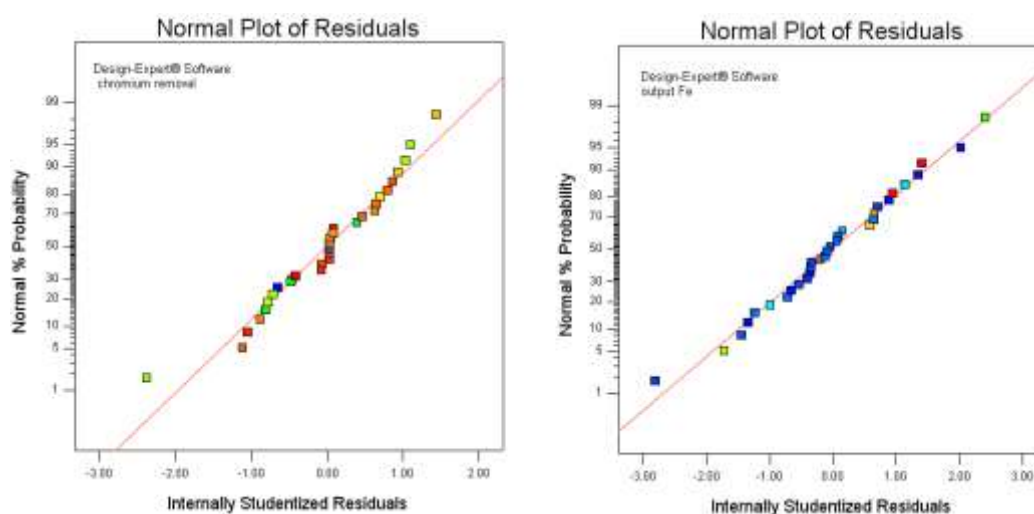
جدول ۵- نتایج حاصل از تحلیل واریانس مدل غلظت آهن خروجی و درصد حذف کروم

Table 5. Results of analysis of variance of effluent iron concentration and percent removal of Chromium

نسبت سیگنال به نویز (Adeq Precision)	ضریب همبستگی پیش بینی کننده (Pred R-Squared)	ضریب همبستگی اصلاح شده (Adj R-Squared)	ضریب همبستگی (R-Squared)	p-value Prob > F	F-Value	مدل
۱۷/۹۴۸	۰/۷۰۹۹	۰/۸۹۳۶	۰/۹۲۱۲	<۰/۰۰۰۱	۳۳/۳۹	غلظت آهن خروجی
۱۷/۸۸۵	۰/۷۶۰۹	۰/۹۳۰۷	۰/۹۷۶۹	<۰/۰۰۰۱	۲۱/۱۴	درصد حذف کروم

طراحی پراکنندگی ناچیزی از خط مورب دارند که حاکی از کفایت دو مدل می باشد.

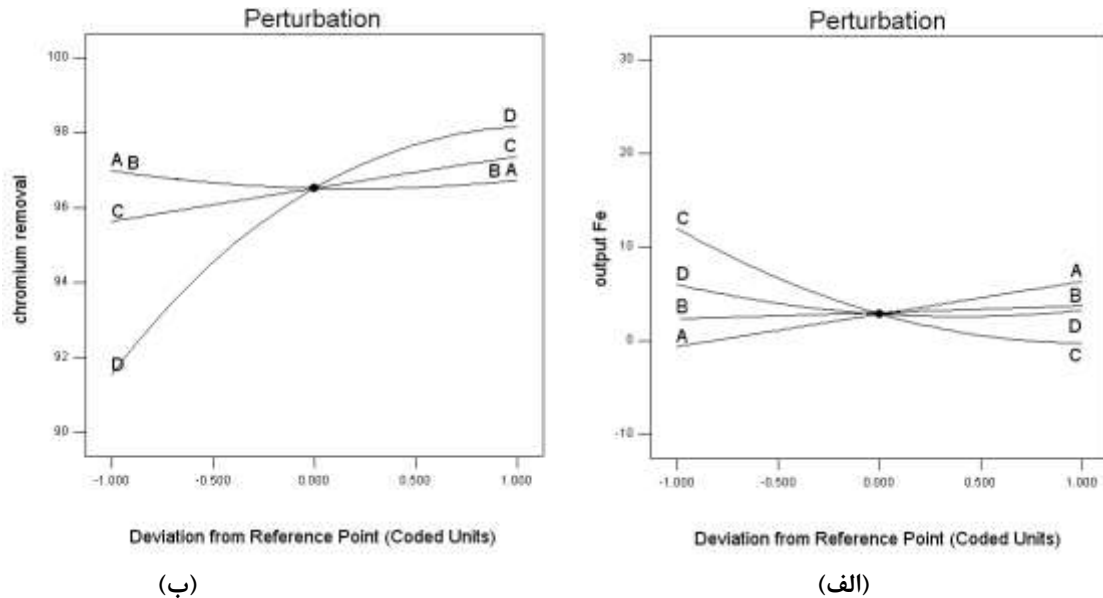
در شکل (۳) نمودارهای احتمال نرمال مدل مربوط به دو پاسخ غلظت آهن خروجی و درصد حذف یون کروم نشان داده شده است. همان گونه که مشخص است در هر دو نمودار، نقاط



شکل ۳- نمودار احتمال نرمال پاسخ غلظت آهن خروجی (سمت راست) و درصد حذف یون کروم (سمت چپ)

Figure 3. Normal probability diagram of response of effluent iron output concentration (right) and percent removal of chromium (left)

نمودار آشفته‌گی (شکل ۴-الف) مشخص شده، عامل (C) pH بیشترین و عامل غلظت کمک منعقدکننده (B)، کمترین تاثیر را بر غلظت آهن خروجی دارد. در خصوص فلز کروم نیز (شکل ۴-ب) عامل کدورت ورودی (D) بیشترین تاثیر و دو عامل غلظت منعقدکننده (A) و غلظت کمک منعقدکننده (B) به طور مشترک کمترین تاثیر را بر درصد حذف کروم دارد.

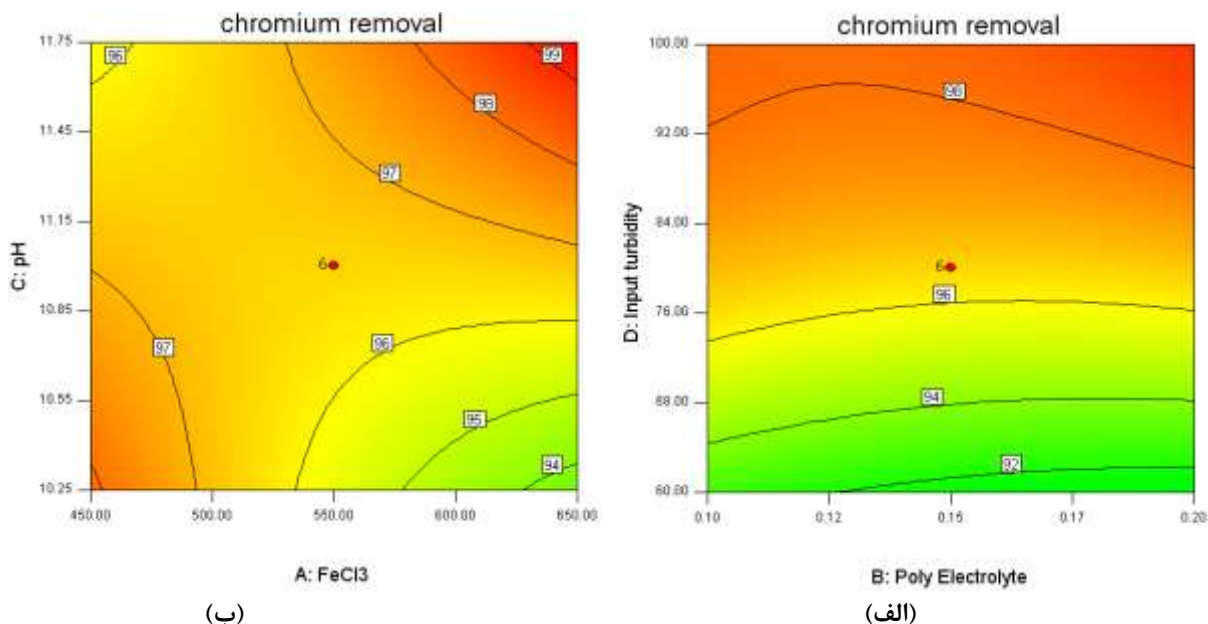


شکل ۴- نمودار آشفته‌گی پاسخ (الف) غلظت آهن خروجی (ب) درصد حذف یون کروم

Figure 4. Response perturbation diagram: response of effluent iron concentration (right) and percent removal of chromium (left)

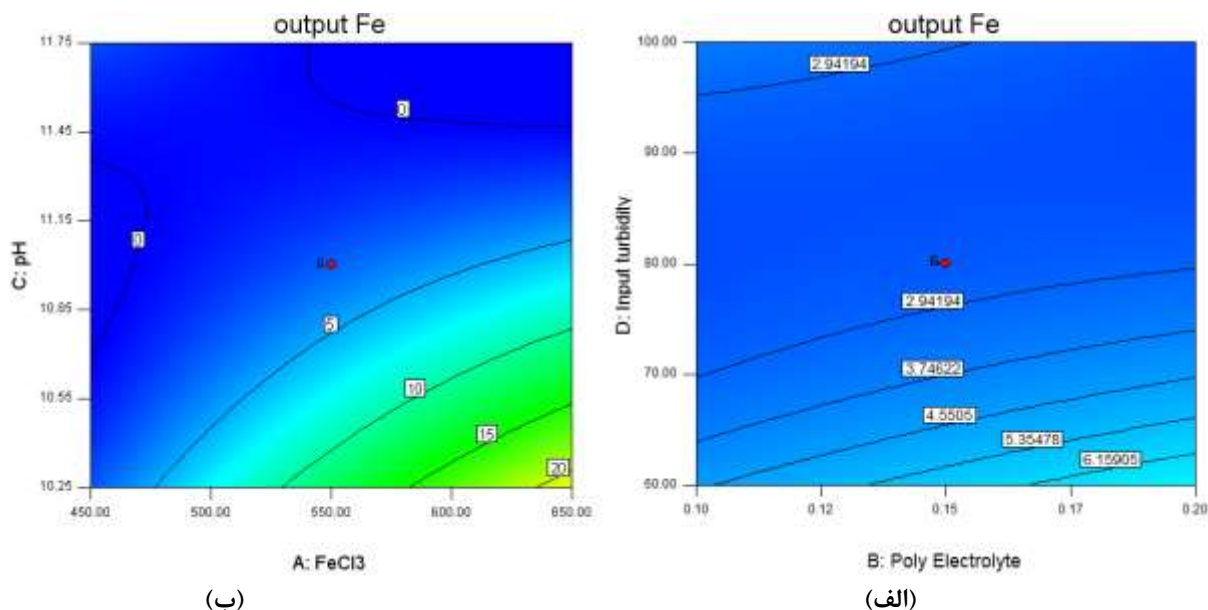
شکل (۶-الف) نیز نشان دهنده تاثیر کم پلی الکترولیت بر غلظت آهن خروجی است. همچنین کدورت بیشتر از ۷۰ NTU نیز بر کاهش آهن خروجی تاثیر محسوسی نداشته است. شکل (۶-ب) نیز نشان دهنده آن است که افزایش pH تاثیر بهتری در کاهش غلظت آهن خروجی در مقایسه با مقادیر مختلف کلرور فریک دارد. تاثیر کلرور فریک در حد پایین بازه تغییرات pH محسوس تر است.

جهت بررسی اثرات هم‌زمان دو پارامتر بر پاسخ، در شکل‌های (۵) و (۶) نمودار کانتور دوبعدی تاثیر متغیرها بر پاسخ درصد حذف کروم و پاسخ غلظت آهن خروجی نشان داده شده است. شکل (۵-الف) اثر متقابل کدورت ورودی و پلی الکترولیت را مشخص می‌کند. همان‌طور که از جهت خطوط کانتور مشخص است، میزان تاثیر غلظت پلی الکترولیت بر حذف کروم در برابر کدورت ورودی ناچیز بوده و از طرفی با افزایش کدورت ورودی درصد حذف تا بالای ۹۸٪ افزایش می‌یابد. مطابق شکل (۵-ب) مقادیر pH و $FeCl_3$ در حد بالای بازه تغییراتشان راندمان حذف ۹۹٪ را نشان داده‌اند.



شکل ۵- نمودارهای کانتور دویبعدی پاسخ درصد حذف یون کروم (الف - B و D، ب - A و C)

Figure 5. Two dimensional contours of the response of chromium percent removal (a. B&D b. A&C)



شکل ۶- نمودارهای کانتور دویبعدی پاسخ غلظت آهن خروجی (الف - B و D، ب - A و C)

Figure 6. Two dimensional contours of the response of effluent iron concentration (a. B&D b. A&C)

بهینه سازی

سازی می‌باشند. در مواردی که متغیرهای فراوانی بر فرآیند بهینه‌سازی تأثیرگذار باشد، سناریوهای مختلفی را می‌توان برای بهینه‌سازی فرآیند در نظر گرفت. سناریوی انتخابی که با در نظر گرفتن ملاحظات بهره‌برداری و پس از مشورت با کارشناسان بهره‌برداری تصفیه‌خانه مجتمع فولاد مبارکه انتخاب شده، در

متغیرهای موثر بر بهینه‌سازی فرآیند انعقاد و لخته‌سازی مورد بررسی، ۶ متغیر غلظت منعقدکننده، غلظت کمک منعقدکننده، pH، غلظت کدورت ورودی، غلظت آهن خروجی و درصد حذف کروم می باشد که از این میان ۴ متغیر اول به عنوان عوامل ورودی و دو متغیر آخر به عنوان پاسخ خروجی در مرحله مدل

زیست محیطی (۳ میلی گرم بر لیتر) با درجه اهمیت سه می باشد. متغیر «درصد حذف کروم» نیز با هدف حداکثر نمودن و با درجه اهمیت ۵ (بالاترین اهمیت) در نظر گرفته شده است. در جدول (۷) بهینه ترین حالت بر اساس سناریوی انتخابی توسط نرم افزار انتخاب شده است.

جدول (۶) نشان داده شده است. در این سناریو برای متغیرهای غلظت منعقدکننده و غلظت کمک منعقدکننده، هدف حداقل کردن میزان مصرف این مواد بوده و درجه اهمیت آن‌ها به ترتیب سه و چهار در نظر گرفته شده است. در مقابل هدف متغیر «غلظت آهن خروجی» قرار گرفتن در بازه‌ی استاندارد

جدول ۶- سناریوی انتخابی جهت بهینه سازی فرآیند انعقاد و لخته سازی

Table 6. Selected scenario for optimization of coagulation flocculation process

درجه اهمیت	حد بالا	حد پایین	هدف	عامل
۳	۷۵۰	۳۵۰	می نیمم کردن	منعقدکننده (کلورفریک): A
۴	۰/۲۵	۰/۰۵	می نیمم کردن	کمک منعقدکننده (پلی الکترو لایت): B
۲	۱۱/۷۵	۱۰/۲۵	قرار گرفتن در بازه	C: pH
۱	۱۲۰	۴۰	قرار گرفتن در بازه	کدورت ورودی: D
۳	۳	۰/۱	قرار گرفتن در بازه	غلظت آهن خروجی
۵	۱۰۰	۷۵	ماکزیمم کردن	درصد حذف کروم

جدول ۷- حالت بهینه پیشنهادی بر اساس سناریوی انتخابی

Table 7. Proposed optimized case based on the selected scenario

مطلوبیت	درصد حذف کروم	غلظت آهن خروجی (mg/L)	کدورت اولیه (NTU)	pH	غلظت کمک منعقدکننده (mg/L)	غلظت منعقدکننده (mg/L)	ردیف
۰/۹۲۳	۹۷	۰/۲۲	۱۰۳	۱۰/۲۵	۰/۰۶	۳۹۷	۱

بحث

مطالعات دو عامل ماده منعقد کننده و pH در نظر گرفته شده است. از طرفی به دلیل عدم استفاده از روش‌های طراحی آزمایش جز یک مورد، عمدتاً بررسی جداگانه تاثیر هر عامل بر پاسخ انجام شده و تاثیر هم‌زمان عوامل مختلف مورد بررسی قرار نگرفته است.

مقایسه نتایج به دست آمده در این مطالعه با مطالعات قبلی در جدول (۸) بیان شده است. در این جدول نتایج مطالعات از جنبه‌های مختلف شامل نوع منعقد کننده، نوع آلاینده، عوامل موثر، روش طراحی آزمایش‌ها، و نتایج مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، عوامل موثر در اکثر

جدول ۸- مقایسه نتایج با مطالعات پیشین

Table 8. Comparing the results with the literature

نتایج	روش طراحی آزمایش	عوامل موثر	نوع آلاینده	منعقدکننده	محققین
حالت بهینه در $\text{pH}=9/5$ ، 250 mg/L بی سولفیت سدیم	بررسی جداگانه هر عامل	pH منعقدکننده	منیزیم، منگنز، کادمیوم و روی	آهک، بی سولفیت سدیم	چرتنایاراک (۱۹۹۹)
غلظت نهایی فلزات سنگین رابطه‌ی مستقیمی با کدورت نهایی پساب	بررسی جداگانه هر عامل	منعقدکننده	کدورت و غلظت فلزات سنگین کروم، سرب، روی و مس	کلروفریک، پلی آلومینیوم کلراید	السمرائی و همکاران (۲۰۰۸)
حالت بهینه در صورت استفاده از 150 mg/L جوهر مازو	بررسی جداگانه هر عامل	منعقدکننده	روی، نیکل و مس	جوهر مازو (تانین)	هریدیا و همکاران (۲۰۰۹)
حالت بهینه در مصرف پلی سولفات فریک با غلظت 8 g/L در pH برابر ۶، کلروفریک با غلظت ۱۰ g/L در pH برابر ۸ و سولفات فریک با غلظت ۱۲ mg/L در pH برابر ۷/۵	روش رویه پاسخ	pH منعقدکننده	اسید هیومیک	پلی سولفات فریک، کلروفریک و سولفات فریک	لیو و همکاران (۲۰۱۲)
2 g/L پودر گیاه اولیفر، 20 mg/L آلوم، هدایت الکتریکی 3 mS/cm^{-1} و $\text{pH}=6/9$	بررسی جداگانه هر عامل	pH منعقدکننده و هدایت الکتریکی	کروم و سرب	آلوم و پودر گیاه اولیفر	شهزاد و همکاران (۲۰۱۴)

نتیجه گیری

در راندمان حذف فلزات سنگین مورد مطالعه قرار گرفته و مدل جامع تری براساس شرایط مختلف دمایی تهیه گردد.

قدردانی

نویسندگان در پایان بر خود لازم می دانند از همکاری ها و زحمات کارشناسان واحد تحقیق و توسعه، تصفیه خانه و آزمایشگاه مرکزی مجتمع فولاد مبارکه اصفهان تقدیر و تشکر به عمل آورند.

Reference

- Hegazi, Removal of heavy metals from wastewater using agricultural and industrial wastes as adsorbents, HBRC Journal, 2013, Volume 9, Issue 3, Pages 276–282
- J. C. Xu, G. Chen, X.F. Huang, Iron and manganese removal by using manganese ore constructed wetlands in the reclamation of steel wastewater, Journal of Hazardous Materials 169, 2009, 309–317
- C. Gao, Optimization and evaluation of steel industry's water-use system,

در تحقیق حاضر به مدل سازی و بهینه سازی پساب تصفیه خانه گالوانیزه مجتمع فولاد مبارکه جهت حذف دو عنصر آهن و کروم از پساب این واحد پرداخته شد. متغیرهای مورد بررسی در این تحقیق چهار عامل غلظت منعقدکننده، غلظت کمک منعقدکننده، pH و کدورت ورودی بوده که توسط روش رویه پاسخ، آزمایشها مربوط به آن طراحی گردید. نتایج این تحقیق نشان می دهد که با ساخت مدل رگرسیونی مرتبه دوم از فرآیند انعقاد و لخته سازی، امکان پیش بینی شرایط مختلف بهره برداری بدون انجام آزمایش فراهم می شود. همچنین از میان چهار عامل مذکور، عامل pH بیشترین تاثیر را بر غلظت آهن خروجی و عامل کدورت ورودی بیشترین تاثیر را بر درصد حذف کروم دارد. در مرحله بهینه سازی نیز مقدار بهینه متغیرهای مورد بررسی با هدف حداقل نمودن میزان مواد مصرفی، حداکثر نمودن میزان حذف کروم و قرار گرفتن در محدوده استاندارد زیست محیطی برای غلظت آهن حاکی از مصرف ۳۹۷ میلی گرم بر لیتر کلروفریک به عنوان منعقدکننده، ۰/۰۶ میلی گرم بر لیتر پلی الکترولیت به عنوان کمک منعقدکننده در pH برابر ۱۰/۲۵ و کدورت ورودی ۱۰۳ NTU می باشد. در پایان پیشنهاد می شود نحوه تاثیر عامل دما

12. M. Syu, B.J. Chen, S.T. Chou, Industrial and Engineering Chemistry Research 42 ,2003, 6862.
13. J.R. Dominguez, J.B. de Heredia, T. Gonzalez, F. Sanchez-Lavado, Industrial and Engineering Chemistry Research 44, 2005, 6539.
14. M. Franceschi, A. Girou, A.M. Carro-Diaz, Optimisation of the coagulation-flocculation process of raw water by optimal design method, Water research, 36(14), 2002, pp. 3561-3572.
15. J. P. Wang, Y.Z. Chen, X. W. Ge , Optimization of coagulation-flocculation process for a paper-recycling wastewater treatment using response surface methodology, Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 302(1), 2007, pp. 204-210.
16. E. Khalili Moghaddam, A. R. Gashtil, Study and assessment of the methods for heavy metals removal from industrial wastewater, The first national conference on the treatment of water and industrial wastewater, 2012 (In Persian)
17. L. Charentanyarak, Heavy metals removal by chemical coagulation and precipitation, Water Science and Technology, Volume 39, Issues 10-11, 1999, Pages 135-138
18. A.G. El Samrani, B.S. Lartiges, F. Villie'ras, Chemical coagulation of combined sewer overflow: Heavy metal removal and treatment optimization, Water Reaserch 42, 2008, 951 – 960
19. J. Beltrán Heredia, J. Sánchez Martín, Removing heavy metals from polluted surface water with a tannin-based flocculant agent, Journal of Hazardous Journal of Cleaner Production, 2011, Volume 19, Issue 1, Pages 64-69
4. A. Trabian, Evaluation of the methods of wastewater treatment of tin plated and galvanized sheet industry, Journal of Environmental Science and Technology, 2005, No. 26. (In Persian).
5. F. Fenglian, Q. Wang, Removal of heavy metal ions from wastewaters: A review, Journal of Environmental Management 92 ,2011, 407e418
6. S.A. Abo-Farha, A.Y. Abdel-Aal, I.A. Ashourb, S.E. Garamon, Removal of some heavy metal cations by synthetic resin purolite C100, J. Hazard. Mater. 169 ,2009, 190e194.
7. L. Agoubordea, R. Navia, Heavy metals retention capacity of a non-conventional sorbent developed from a mixture of industrial and agricultural wastes, J. Hazard. Mater. 167, 2009, 536e544
8. L. Ahmad, B. S. Ooi, a study on acid reclamation and copper recovery using low pressure nanofiltration membrane, Chem. Eng. J. 56, 2010, 257e263.
9. J.R. Parga, D.L. Cocke, J.L. Valenzuela, J.A. Gomes, M. Kesmez, G. Irwin, H. Moreno, Arsenic removal via electrocoagulation from heavy metal contaminated groundwater in La Comarca Lagunera México, J. Hazard. Mater.124, 2005, 247e254.
10. M. Plattes, A. Bertrand, B. Schmitt, J. Sinner, F. Verstraeten, Removal of tungsten oxyanions from industrial wastewater by precipitation, coagulation and flocculation processes, J. Hazard. Mater. 148 ,2007, 613e615.
11. T. Nandy, S. Shastry, P.P. Pathe, S.N. Kaul, Water, Air, and Soil Pollution 148, 2003, 15.

22. ASTM D 2035, Standard practice for coagulation-flocculation jar test of water, 2008, Vol 11.02
23. ASTM E 1812, Standard Practice for Optimization of Flame Atomic Absorption Spectrometric Equipment ,2004, Vol 03.05
24. APHA (American Public Health Association), Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 20th ed. APHA, AWWA, WEF,1998
25. C. Douglas Montgomery, Design and Analysis of Experiments”. Fifth Edition Arizona State University, 2000
- Materials, Volume 165, Issues13, 15, 2009 ,Pages1215-1218
20. X.M. Li, Q. Yang, Landfill leachate pretreatment by coagulation–flocculation process using iron-based coagulants: Optimization by response surface methodology, Chemical Engineering Journal 200–202 ,2012, 39–51
21. M.A. Shahzad, Z. Iqbal, Khalil-ur-Rehman, Hafeez-Ur-Rehman, M.F. Ejaz, Time Course Changes in pH, Electrical Conductivity and Heavy Metals (Pb, Cr) of Wastewater Using Moringa oleifera Lam. Seed and Alum, a Comparative Evaluation, J. appl. res. technol 2014, vol.12 no.3 México jun.