Optimization of metal working fluids treatment using calcium chloride by response surface methodology

HA. Jamali* K. Dindarloo** A. Nikpey***

*Assistant Professor of Environmental Health Engineering, School of Health, Qazvin University of Medical Sciences, Qazvin, Iran
**Assistant Professor of Environmental Health Engineering, School of Health, Hormozgan University of Medical Sciences, Bandar Abbas, Iran
***Associate Professor of Occupational Health, School of Health, Qazvin University of Medical Sciences, Qazvin, Iran

Abstract

Background: Extensive use of metal working fluids degrades their chemical composition. They should be treated using a safe method. Chemical coagulation-flocculation process is one the treatment methods.

Objective: The aim of this study was to optimize the coagulation-flocculation process using calcium chloride in metal working fluids treatment.

Methods: This laboratory based study was performed in School of Health affiliated to Qazvin University of Medical Sciences in 2014. Using calcium chloride and a six-compartment jar, the efficiency of coagulation-flocculation process was assessed for removal of chemical oxygen demand (COD) and turbidity and amount of released oil. Central composite design (CCD) and response surface methodology (RSM) were applied to optimize the treatment operation parameters (pH and dosage of coagulant). Quadratic models were developed for calculation of the three responses (COD, turbidity, and released oil).

Findings: The optimum condition for coagulation-flocculation process was seen after treatment with 4.2 g/L calcium chloride at pH 3.71 in which COD and turbidity removal efficiency were 93% and 96.9%, respectively and the amount of released oil was 31.8 ml. The level of desirability was 91.2%. The values of laboratory study were in good agreement with the values predicted by the model.

Conclusion: Metal working fluids treatment with calcium chloride was efficient in the removal of pollution parameters. Dosage of calcium chloride was similar to the conventional coagulants such as Alum, but its efficiency was higher.

Keywords: Treatment, Metal Working Fluid, Flocculation, Calcium Chloride, Response Surface Methodology

Citation: Jamali HA, Dindarloo K, nikpey A. Optimization of metal working fluids treatment using calcium chloride by response surface methodology. J Qazvin Univ Med Sci. 2015; 19 (2): 46-54.

Corresponding Address: Hamzah Ali Jamali, School of Health, Qazvin University of Medical Sciences, Shahid Bahonar Blvd., Qazvin, Iran
Email: jamalisadraei@yahoo.com
Tel: +98-28-33369581
Received: 11 Oct 2014
Accepted: 13 Jan 2015

بهینه‌سازی تصفیه پساب صابون صنعتی توسط کلرور کلسیم به روش سطح پاسخ

دکتر حمزه علی جمالی* دکتر کاووس دیندارلو** دکتر احمد نیک‌پی***

* استادیار مهندسی بهداشت محیط دانشکده بهداشت دانشگاه علوم پزشکی قزوین، قزوین، ایران
** استادیار مهندسی بهداشت محیط دانشکده بهداشت دانشگاه علوم پزشکی هرمزگان، بندرعباس، ایران
*** دانشیار بهداشت حرفه‌ای دانشکده بهداشت دانشگاه علوم پزشکی قزوین، قزوین، ایران

آدرس نویسنده مسؤول: قزوین، بلوار شهید باهنر، دانشگاه علوم پزشکی قزوین، دانشکده بهداشت، تلفن ۳۳۳۶۹۵۸۱- ۰۲۸
Email: jamalisadraei@yahoo.com
تاریخ دریافت: ۹۳/۷/۱۹ تاریخ پذیرش: ۹۳/۱۰/۲۳

چکیده

زمینه: استفاده مداوم از آب صابون‌های صنعتی باعث تخریب ساختار شیمیایی آن‌ها می‌شود و لازم است با روش ایمنی تصفیه شوند. یکی از روش‌های تصفیه این گونه پساب‌ها انعقاد- لخته‌سازی شیمیایی است.

هدف: مطالعه به منظور بهینه‌سازی فرایند انعقاد و لخته‌سازی توسط کلرور کلسیم در تصفیه آب صابون صنعتی انجام شد.

مواد و روش‌ها: این مطالعه آزمایشگاهی در سال ۱۳۹۳ در دانشکده بهداشت دانشگاه علوم پزشکی قزوین انجام شد. با استفاده از کلرور کلسیم و به کارگیری یک دستگاه جار شش خانه‌ای، بازده فرایند انعقاد و لخته‌سازی در حذف اکسیژن مورد نیاز شیمیایی(COD)، کدورت و میزان آزاد شدن روغن بررسی شد. برای بهینه‌سازی عوامل بهره برداری از فرایند (pH و مقدار مصرف ماده منعقدکننده) از طرح مرکب مرکزی و روش سطح پاسخ استفاده شد. برای محاسبه سه متغیر پاسخ (COD، کدورت و روغن آزاد شده) از مدل درجه دوم استفاده شد.

یافته‌ها: شرایط بهینه برای استفاده از کلرور کلسیم در فرایند انعقاد و لخته‌سازی برابر بود با غلظت ۴/۲ گرم در لیتر و pH ۳/۷۱ که میزان حذف COD برابر با ٪۹۳، حذف کدورت ٪۹۶/۹ و میزان روغن آزاد شده ۳۱/۸ میلی‌لیتر بود. میزان مطلوبیت در این شرایط ٪۹۱/۲ بود. مقادیر پاسخ‌های مطالعه آزمایشگاهی و پیش‌بینی شده توسط مدل، تطابق خوبی داشتند.

نتیجه‌گیری: استفاده از منعقدکننده کلرور کلسیم در تصفیه آب صابون صنعتی، بازده خوبی در حذف شاخص‌های آلایندگی داشت و مقدار مصرف آن تقریباً برابر با منعقدکننده متداول مثل آلوم بود، اما در حذف آلاینده‌ها بازده بالاتری داشت.

کلیدواژه‌ها: تصفیه، آب صابون، لخته‌سازی، کلرور کلسیم، روش سطح پاسخ

مقدمه:

آب صابون های صنعتی برای خنک و روان کردن دستگاه‌های مکانیکی مثل دستگاه‌های برش کاری و شکل‌دهی فلزها به کار می‌روند. مصرف سالیانه این مواد شیمیایی در جهان بیش از دو میلیون متر مکعب برآورد شده است. این محصول‌ها ترکیبی از عوامل نگه‌دارنده، امولسیون کننده‌ها، عوامل ضد باکتریایی و افزودنی‌های ضد خوردگی هستند که باعث امولسیون روغن‌های معدنی در آب می‌شوند. این مواد طی ماه‌ها، در اثر تجزیه حرارتی و آلودگی توسط ذرات معلق خاصیت خود را از دست می‌دهند. بنابراین تعویض دوره‌ای آن‌ها ضروری است.[۱و۲] ورود این ترکیب‌ها به محیط زیست یک تهدید زیست محیطی است، زیرا حاوی مواد زیر هستند: روغن‌های معدنی، امولسیون کننده‌ها، سورفاکتانت‌ها، عوامل ضدخوردگی، تحمل کننده‌های فشار، ضد کف‌ها، عوامل ضد میکروبی، کاهش دهنده‌های اصطکاک و مواد قلیایی.[۳و۴]

از جمله روش‌های پیشنهادی تصفیه می‌توان به روش‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی گوناگونی اشاره کرد.[۵-۷] تبخیر، استفاده از مواد شیمیایی امولسیون شکن و اولترافیلتراسیون از فرایندهای تصفیه فیزیکی و

شـــیمیایی هســـتند.[۸-۱۰] در روش‌هـــای شـــیمیایی از منعقد کننده‌های مختلفی از جملـه کلـرور کلسـیم بـرای تصفیه این گونه پساب‌ها استفاده می‌شود. کلرور کلسیم به عنـوان یـک امولسـیون شـکن مـی‌توانـد نیـروی دافعـه الکترواستاتیکی را کاهش و ظرفیت زتا را افـزایش دهـد و در نتیجه، ناپایداری امولسیون را ارتقـا بخشـد. عـلاوه بـر این، کلرور کلسیم می‌تواند هیدروکسـیدهای کلوئیـدی را هیدرولیز، قطره‌های روغن را جذب و تعداد عوامـل فعـال سطحی آنیونی روی سطح قطره‌های امولسـیون روغـن را کاهش دهد و بدین ترتیب شکستن امولسـیون را تسـهیل کند. در نتیجه روغـن آزاد مـی‌شـود و امکـان جداسـازی فیزیکی آن وجود دارد. این عمل باعـث کـاهش بـار آلـی فاضلاب آب صابون خواهد شد.[۱۱]

در کارهای معمول آزمایشگاهی، بهینه‌سازی مصـرف منعقد کننده‌ها به روش تغییر هر بار یک عامل است. ایـن روش وقـت گیـر، پُـر هزینـه و دارای خطـای بـالایی اسـت.[۸و۱۲] طـرح مرکـب مرکـزی (CCD) یکـی از متداول‌ترین روش‌های خانواده سطح پاسخ (RSM) است که به طور گسترده‌ای در مدل‌های سـطح پاسـخ بـه کـار مـی‌رود و یـک روش مفیـد و کـاربردی بـرای طراحـی و مطالعه فضای آزمایش است. این روش با انجام کـم‌تـرین آزمایش و صرفه‌جویی در زمـان و هزینـه (در مقایسـه بـا سـایر روش‌هـای طراحـی آزمـایش) توانـایی بـالاتری در پیش‌بینی پاسخ‌ها و بهینه‌سازی آن‌هـا دارد.[۱۳و۱۴] تـاکنون در هیچ یک از روش‌هـای تصـفیه شـیمیایی آب صـابون صنعتی از روش سطح پاسـخ بـرای بهینـه‌سـازی فراینـد استفاده نشـده اسـت. بنـابراین مطالعـه حاضـر بـا هـدف بهینه‌سازی مصرف کلرور کلسیم در تصفیه پساب صـابون صنعتی به روش سطح پاسخ انجام شد.

❋مواد و روش‌ها:

این مطالعه آزمایشگاهی در سـال ۱۳۹۳ در دانشـکده بهداشت دانشگاه علوم پزشکی قزوین انجام شد.

به منظور بهینه‌سازی فرایند انعقاد و لخته‌سازی از طرح مرکب مرکزی (۹ آزمایش به علاوه ۴ آزمایش اضـافی در نقطه مرکزی) و روش سطح پاسخ استفاده شد. متغیرهای مسـتقل شـامل pH و مقـدار کلـرور کلسـیم در سـطوح مختلف و متغیرهای وابسته شامل COD، کدورت و مقدار روغن آزاد شده بودند. با نتایج به دست آمده، مـدل‌سـازی انجام و سپس نقاط بهینه برای این منعقدکننده اسـتخراج شد. برای طراحی آماری آزمایش‌هـا و تحلیـل داده‌هـا از نرم‌افزار Design Expert7 استفاده شد. قبـل از طراحـی تحقیق، با انجام آزمایش‌های مقدماتی، دامنه محـدودی از مقادیر مصرف ماده منعقدکننده و pH به دست آمد. مقدار ماده منعقدکننده از ۰/۱ گرم در لیتر شروع شد و مقدار آن تا حد رسیدن به بازده کاهش مناسـب COD، کـدورت و افزایش مقدار روغن آزاد شده ادامـه یافـت. بـرای یـافتن محدوده مؤثر pH، دامنه بـین ۲ تـا ۱۲ بررسـی و مقـدار منعقدکننده مقدار ۲/۵ تا ۵/۵ گـرم در لیتـر و pH ۲ تـا ۵ انتخاب شد. سپس با رسم جـدول طـرح مرکـب مرکـزی فاکتوریل کامل به صـورت 3^2 بـه عـلاوه چهـار آزمـایش اضافه به عنوان تکرارهای نقطه مرکزی انجام شد و نتایج هر آزمایش به دست آمد. کلیه مواد شیمیایی مورد استفاده در این مطالعه از محصولات مِـرک بـود. آزمـایش‌هـا بـا استفاده از یک دستگاه آزمایش جار سـاخت ایـران انجـام شد. زمان‌های اختلاط سریع و کند به طور خودکار تنظـیم شده بود. سرعت چرخش تیغه‌ها در دور سـریع و کُنـد بـه ترتیب ۹۰ و ۳۰ دور در دقیقه با زمان مانـد بـه ترتیـب ۱ و۲۰ دقیقه بود. زمان ته‌نشینی نیز ۳۰ دقیقه در نظر گرفته شد. سپس روغن شناور در سطح مایع توسط قیف دکانتور جداسازی شد. توسط پیپت از آب زلال رویی نمونه‌گیـری و COD و کدورت باقی‌مانده اندازه‌گیری شد.

مقادیر کُد گذاری شده pH و مقدار ماده منعقدکننـده در پنج سطح ۱- (حداقل)، ۰/۵- و صفر (نقطه مرکـزی)، ۰/۵+ و ۱+ (حداکثر) تنظیم شد. نتایج آزمایش‌هـای سـه متغیر وابسته به صورت درصـد حـذف COD، کـدورت و مقدار آزاد شدن روغن نشان داده شد.

برای پیش‌بینی شرایط بهینه از معادله زیر استفاده شد:

$$Y=\beta_0+\sum_{i=1}^{k}\beta i.xi+\sum_{i=1}^{k}\beta ii.xi^2+\sum_{i\neq j}^{k}\sum_{j}^{k}\beta ij.xi.xj+\cdots+e$$

Y=پاسخ، i= ثابت خطی، j= ثابت درجه دوم، β= ثابت رگرسیون، k= تعداد عوامل مورد مطالعه و بهینه شده در آزمایش‌ها، e= خطای تصادفی.

کیفیت برازش مدل چند جمله‌ای با ضریب تبیین (R^2) بیان و معنی‌داری آماری آن نیز توسط آزمون فیشر و در همان برنامه کنترل شد. به منظور انتخاب مدل‌های تجربی برای پیش‌بینی پاسخ، رابطه‌های خطی، چند جمله‌ای درجه دوم و سوم بر داده‌های به دست آمده از آزمایش‌ها برازش شدند. سپس این مدل‌ها تحلیل آماری شدند تا مدل مناسب گزینش گردد. از نظر آماری مدلی مناسب است که آزمون ضعف برازش آن معنی‌دار نباشد و بالاترین مقدار ضریب تبیین (R^2)، ضریب تبیین تعدیل شده ($R^2_{adjusted}$)، ضریب تبیین پیش‌بینی ($R^2_{predicted}$) و مجموع مربعات باقی‌مانده خطای پیش‌بینی (PRESS) پایین را داشته باشد.[۱۴] عوامل مدل در سطح اطمینان ۹۵ درصد، ارزیابی شدند. نمودار سه بُعدی برای این منعقدکننده بر پایه اثرات دو عامل (مقدار ماده منعقدکننده و pH) در پنج سطح رسم شد. در نهایت برای راستی آزمایی نتایج حاصل از مدل، در شرایط بهینه، دو آزمایش اضافی انجام شد و نتایج مورد مقایسه قرار گرفتند.

❋یافته‌ها:

نتایج برازش مدل‌های مختلف بر داده‌های به دست آمده نشان داد که در حذف COD، کدورت و آزاد شدن روغن، مدل مرتبه دوم در مقایسه با مدل‌های خطی، درجه سوم و برهم‌کنش برازش بالاتری داشت. زیرا این مدل دارای ویژگی‌های زیر بود: در حذف COD دارای R^2=۰/۹۸ ، R^2Adj.=۰/۹۶ ، R^2pred.=۰/۸۳ و PRESS=۵۱۵ ، در حذف کدورت دارای R^2=۰/۹۷ ، R^2Adj.=۰/۹۵ ، R^2pred.=۰/۷۷ و PRESS=۳۳۱ و در آزاد شدن روغن دارای R^2=۰/۹۷ ، R^2Adj.=۰/۹۵ ، R^2pred.=۰/۷۷ و PRESS=۱۰۰۶.

براساس طرح مرکب مرکزی، فرایند انعقاد با کلرور کلسیم در حذف کدورت بسیار مؤثرتر از COD و آزاد شدن روغن بود (جدول شماره ۱).

نتایج تحلیل واریانس عوامل مدل مرتبه دوم سطح پاسخ در کاهش هزینه آلاینده با استفاده از کلرور کلسیم معنی‌دار بود (جدول شماره ۲).

جدول ۱- نتایج کاربرد طرح مرکب مرکزی متغیرهای pH و مقدار کلرور کلسیم

شماره آزمایش	کلرور کلسیم		pH		بازده		
	غلظت (گرم در لیتر)	سطح	معیار	سطح	حذف COD (٪)	حذف کدورت (٪)	روغن آزاد شده (میلی‌لیتر)
۱	۴	۰	۳/۵	۰	۹۰/۵	۹۴	۳۰
۲	۴	۰	۳/۵	۰	۸۹	۹۴	۲۷
۳	۴/۷۵	+۰/۵	۳/۵	۰	۸۸	۹۳	۷
۴	۴	۰	۴/۲۵	+۰/۵	۹۰	۹۶	۳۰
۵	۴	۰	۲/۷۵	+۰/۵	۹۴	۹۶	۲۸
۶	۴	۰	۳/۵	۰	۹۶/۱	۱۰۰	۳۶
۷	۴	۰	۳/۵	۰	۹۲/۶	۹۸	۳۲
۸	۳/۲۵	−۰/۵	۳/۵	۰	۸۹	۹۰	۲۹
۹	۵/۵	+۱	۵	+۱	۶۷	۸۰	۱۳
۱۰	۲/۵	−۱	۵	+۱	۴۶/۴	۶۲	۱
۱۱	۵/۵	+۱	۲	−۱	۶۰/۵	۸۰	۱۴
۱۲	۴	۰	۳/۵	۰	۹۱	۹۴	۳۱
۱۳	۲/۵	−۱	۲	−۱	۶۵/۲	۷۵	۶

نتایج تحلیل رگرسیون سطح پاسخ مدل‌های درجه دوم اصلاحی با متغیرهای مستقل کُد گذاری شده پس از حذف واژه‌هایی که از نظر آماری معنی‌دار نبودند، در معادله‌های زیر ارایه شدند. در این معادله‌ها Y_1، Y_2 و Y_3 به ترتیب بازده حذف COD، کدورت و میزان آزاد شدن روغن هستند.

Y_1=۹۲/۸۸ + ۳/۴۲ ($CaCl_2$ dose) − ۳/۱۸ (pH) + ۶/۳۳ ($CaCl_2$ dose * pH) − ۲۳/۴۶ ($CaCl_2$ dose ^{2})

Y_2=۹۶/۲۰ + ۵/۴۴ ($CaCl_2$ dose) − ۲/۸۹ (pH) + ۳/۲۵ ($CaCl_2$ dose * pH) − ۱۹/۹۶ ($CaCl_2$ dose ^{2})

Y_3=۳۱/۵۱ + ۴/۲۲ ($CaCl_2$ dose) − ۱۳/۵۱ ($CaCl_2$ dose^2)

در نمودار پراکنش باقی‌مانده‌ها نسبت به مقادیر برازش داده شده حاصل از کاربرد این منعقدکننده که برای بررسی فرض ثابت بودن واریانس باقی‌مانده‌هاست، روند خاصی که بیان‌کننده زیاد یا کم شدن واریانس باشد، دیده نشد. بنابراین فرض ثابت بودن واریانس پذیرفته شد. در نمودار پراکنش باقی‌مانده‌ها نسبت به ترتیب انجام آزمایش‌ها که برای بررسی استقلال بین داده‌ها به کار می‌رود، هیچ‌گونه روندی از قبیل تغییرات سینوسی مشاهده نشد. بنابراین فرض استقلال داده‌های به دست آمده پذیرفته شد (شکل شماره ۱).

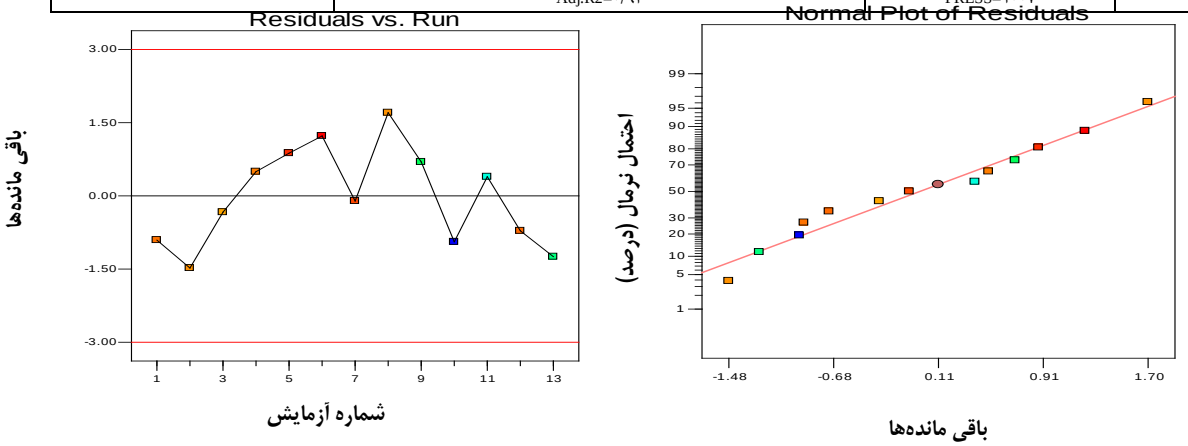
در نمودارهای سطح پاسخ که یک نمای سه بُعدی از سطح حذف COD، کدورت و میزان آزاد شدن روغن توسط این منعقدکننده با ترکیب‌های مختلف از متغیرهای مستقل را نشان می‌دهند، با توجه به این که در حذف COD و کدورت، واکنش‌های متقابل متغیرها معنی‌دار بودند، بنابراین انحنا کاملاً واضح بود. نقطه اوج واضح در این نمودارها نمایان‌گر اهمیت متغیرهای pH و غلظت ماده منعقدکننده در فراهم کردن حذف حداکثری COD، کدورت و آزاد شدن روغن بود. با دور شدن از این نقاط اوج، کاهش بازده حذف آلاینده‌ها مشاهده شد، به طوری که افزایش یا کاهش هر یک از متغیرهای مورد آزمایش مطلوب نبود (شکل شماره ۲).

با بهینه‌سازی عددی مدل، شرایط بهینه برابر با غلظت ۴/۲ گرم در لیتر و pH=۳/۷۱ بود. در این شرایط بازده حذف COD برابر با ۹۳ درصد، حذف کدورت ۹۶/۹ درصد و میزان روغن آزاد شده ۳۱/۸ میلی‌لیتر بود. میانگین خطای پاسخ‌های پیش‌بینی شده توسط مدل و داده‌های به دست آمده از آزمایش‌های اضافی در حذف COD، کدورت و آزاد شدن روغن به ترتیب ۱/۵±۴، ۱/۲±۵ و ۱/۶۵±۵ بود.

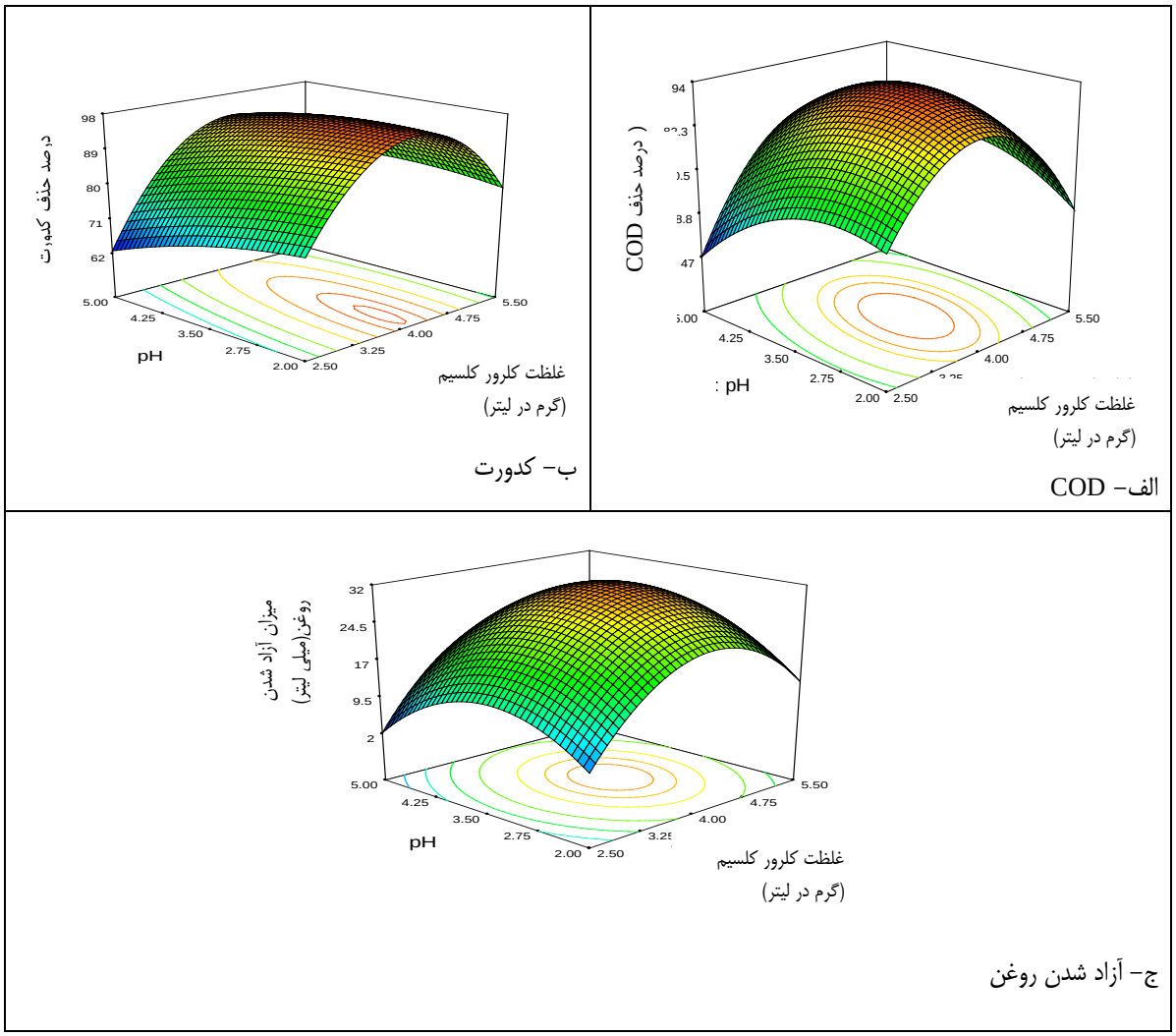
جدول ۲- نتایج تحلیل واریانس عوامل مدل مرتبه دوم پاسخ سطح در کاهش آلاینده‌ها

منبع تغییرات	مجموع مربعات			درجه آزادی	میانگین مربعات			نتیجه آزمون فیشر			سطح معنی‌داری		
	COD	کدورت	آزاد شدن روغن		COD	کدورت	آزاد شدن روغن	COD	کدورت	آزاد شدن روغن	COD	کدورت	آزاد شدن روغن
مدل	۲۹۷۴/۸	۱۴۳۶/۵	۱۴۱۸/۷	۵	۴۹/۵	۲۸۷	۲۸۳	۷۶	۴۹/۵	۳۵/۱	<۰/۰۰۰۱	<۰/۰۰۰۱	<۰/۰۰۰۱
غلظت $CaCl_2$	۵۲/۷	۱۳۳	۸۰	۱	۲۳	۱۳۳	۸۰	۶/۷	۲۳	۹/۹	۰/۰۳۶	۰/۰۰۲	۰/۰۲
pH	۴۵/۴	۳۷/۵	۵/۶	۱	۶/۵	۳۷/۵	۵/۶	۵/۸	۶/۵	۰/۷	۰/۰۴۷	۰/۰۴	۰/۴
$CaCl_2$* pH	۱۶۰	۴۲/۲	۴	۱	۷/۳	۴۲/۲	۴	۲۰/۴	۷/۳	۰/۵	۰/۰۰۳	۰/۰۳	۰/۵
$CaCl_2{}^2$	۱۳۴/۲	۹۷	۴۴/۵	۱	۱۶/۸	۹۷	۴۴/۵	۱۷	۱۶/۷	۵/۵	۰/۰۰۴	۰/۰۰۵	۰/۰۴۷
pH^2	۲۱/۸	۰/۹	۲۲	۱	۰/۲	۰/۹	۲۲	۲/۸	۰/۲	۲/۷	۰/۱۴	۰/۷	۰/۱
باقی مانده	۵۵	۴۰/۶	۵۶/۵	۷	۷/۹	۵/۸	۸/۱		–			–	
نقص برازش	۲۵/۷	۸/۶	۲۲	۳	۰/۴	۲/۹	۹	۱/۲	۰/۴	۱/۳	۰/۴	۰/۸	۰/۴
خطای خالص	۲۹/۳	۳۲	۲۹	۴	۷/۳	۸	۷/۳				–		
کل	۳۰۴۰	۱۴۷۷	۱۴۷۵	۱۲	**سایر شاخص‌های آماری:**								
حذف COD	A.P=۲۲/۵۶ PRESS=۵۱۶				**R^2**=۰/۹۸ Adj.R2=۰/۹۷						۸۱/۵±۲/۸		
حذف کدورت	A.P=۳۲ PRESS=۳۳۱				**R^2**=۰/۹۷ Adj.R2=۰/۹۶						۸۸±۲/۴۱		

روغن	A.P=۱۵/۲ PRESS=۱۰۰۷	R^2=۰/۹۶ Adj.R2=۰/۹۳	۲۳/۵±۲/۸۱



شکل ۱- پراکنش باقی مانده‌ها نسبت به مقادیر برازش داده شده (الف) و ترتیب انجام آزمایش‌ها (ب)



شکل ۲- نمودار سه بُعدی سطح پاسخ عوامل مؤثر حذف آلاینده‌ها

❋بحث و نتیجه‌گیری:

این مطالعه نشان داد مدل مرتبه دوم برای پیش‌بینی نتایج حاصل از فرایند انعقاد در تصفیه پساب صابون صنعتی مناسب است. ضریب R^2 نسبت کل تغییرات پاسخ پیش‌بینی شده توسط مدل را ارایه می‌دهد و نشان‌دهنده نسبت مجموع مربعات ناشی از رگرسیون (SSR) به کل مجموع مربعات (SST) است. بزرگ و نزدیک بودن R^2 به ۱ مطلوب است و یک توافق مطلوب با R^2 تعدیل یافته ضروری است.[۱۴و۱۵] بزرگ بودن R^2، تأییدکننده تطابق رضایت بخش داده‌های آزمایش بر مدل مرتبه دوم است. با توجه به این که در این تحقیق، در تمامی موارد ضریب R^2 بزرگ‌تر از ۰/۹۵ و ضریب $Adj.R^2$ بالاتر از ۰/۹۳ بود؛ بنابراین مدل مرتبه دوم بر داده‌ها برازش خوبی داشت. ضریب آزمون ضعف برازش (Lack of fit test)، تغییرات داده‌ها را حول مدل برازش شده توصیف می‌کند. اگر مدل به خوبی برازش نشده باشد، این آزمون معنی‌دار است.[۱۴] آزمون ضعف برازش مربوط به مدل مرتبه دوم برازش یافته برای پاسخ‌های به دست آمده در این تحقیق معنی‌دار نبود که تأییدکننده برازش خوب داده‌ها بر مدل انتخاب شده است. همچنین در حذف COD، کدورت و آزاد شدن روغن از آب صابون مدل درجه دوم از نظر آماری معنی‌دار بود. مقادیر بالای کفایت دقت (AP)، بیان‌گر قدرت بالای مدل در پیش‌بینی میزان حذف COD، کدورت و میزان آزاد شدن روغن است.AP دامنه مقادیر پیش‌بینی در نقاط طراحی را با میانگین خطای پیش‌بینی مقایسه می‌کند و نسبت‌های بالاتر از ۴ نشان‌دهنده کفایت مدل‌هاست.[۱۶] در این مطالعه مقدار AP در تمام موارد بالاتر از ۴ و نشان‌دهنده توان بالای مدل در پیش‌بینی نتایج بود.

در این مطالعه، پراکنش باقی‌مانده‌ها نسبت به مقادیر برازش داده شده روند خاصی نداشت. بنابراین فرض ثابت بودن واریانس باقی‌مانده‌ها پذیرفته می‌شود.[۱۷] همچنین پراکنش باقی‌مانده‌ها نسبت به ترتیب انجام آزمایش‌ها هیچ روند خاصی مثل تغییرات سینوسی را نشان نداد. بنابراین فرض استقلال داده‌های به دست آمده پذیرفته می‌شود و مدل انتخاب شده برای تحلیل داده‌ها مناسب است.[۱۶و۱۷]

میزان مطلوبیت بهینه‌سازی عددی این فرایند ۹۱/۲ درصد بود که مناسب به نظر می‌رسید. ویجون ژانگ و همکاران عملکرد کلرور کلسیم، کلرور سدیم، کلرور فریک، سولفات فریک پلیمری، سولفات فرو و پلی آلومینیم کلراید را به عنوان امولسیون شکن در تصفیه آب صابون مقایسه کردند که در مصرف یکسان (۳ گرم در لیتر) این منعقدکننده‌ها، بازده حذف COD به ترتیب برابر با ۸۵، ۵۸، ۴۹، ۴۰، ۴۶ و ۴۶ درصد بود. بازده حذف روغن نیز به ترتیب ۸۵، ۶۵ ، ۶۰ ، ۵۳ ، ۵۰ و ۵۰ درصد بود. نتایج این مطالعه ضمن همخوانی با نتایج تحقیق حاضر نشان‌دهنده عملکرد خوب کلرور کلسیم در مقایسه با سایر منعقدکننده‌ها بود.[۱۸] استفاده از منعقدکننده‌های پلی فریک سولفات به مقدار مصرف ۸ گرم در لیتر و در pH=۶، کلرو فریک ۱۰ گرم در لیتر در pH=۸ و سولفات فریک ۱۲ گرم در لیتر در pH=۷/۵ در تصفیه شیرابه (فاضلاب صنعتی) نشان داد که بازده این منعقدکننده‌ها در حذف کدورت و COD به ترتیب برای پلی فریک سولفات برابر با ۵۶/۳۸ و ۸۹/۷۹ درصد، کلرو فریک ۶۸/۶۵ و ۹۸/۸۵ درصد و برای سولفات فریک ۵۵/۸۷ و ۹۴/۱۳ درصد بود که نشان‌دهنده مقدار مصرف بالای منعقدکننده‌های متداول در تصفیه فاضلاب است.[۱۹]

نتایج استفاده از کلرور کلسیم همراه با یک کمک منعقدکننده کاتیونی به عنوان امولسیون شکن در تصفیه فاضلاب صنعتی حاوی مواد نفتی نشان داد که در غلظت ۱ گرم در لیتر از این ترکیب شیمیایی، بازده حذف COD برابر با ۹۰ درصد بود و با نتایج مطالعه حاضر تا حدود زیادی مطابقت داشت.[۲] دلیل مصرف پایین‌تر این ماده

منعقدکننده، عدم امولسیون کامل روغـن در محـیط آبـی اعلام شده است.[۱۱]

تحقیق دیگری از کلرور آلومینیوم و کلرور کلسـیم در تصـفیه تلفیقـی ناپایدارسـازی امولسـیون آب صـابون و فیلتراسیون خلئی استفاده کـرد و نتـایج نشـان داد کلـرور آلومینیوم تأثیر ناچیزی در ناپایدارسازی امولسیون داشـت. در حالی که با استفاده از کلـرور کلسـیم در غلظـت ۰/۰۵ مول در لیتر، بازده این سیستم تصـفیه تلفیقـی در حـذف COD به ۹۰ درصد رسید که تأیید کننده مطلوبیت کلرور کلسیم در تصفیه آب صابون بود.[۲۰]

در مطالعه حاضر میانگین خطای پاسخ‌های پیش‌بینی شده توسط مدل و داده‌های به دست آمده از آزمایش‌های اضافی در حذف COD، کدورت و آزاد شدن روغن بسـیار پایین بود و تمامی پاسخ‌های پیش‌بینی مـدل و حاصـل از آزمایش‌ها بسیار به هم نزدیک بودنـد. بنـابراین بـه نظـر می‌رسد کلرور کلسیم بـرای تصـفیه آب صـابون مناسـب است. همچنین طرح مرکب مرکزی و روش سـطح پاسـخ برای پیش‌بینی شرایط بهینه، براساس داده‌های آزمایش‌ها قابل استفاده است و بین مقادیر پـیش‌بینـی شـده توسـط مدل با نتایج حاصل از آزمایش‌ها تطابق خوبی وجود دارد.

❋مراجع:

1. Jagadevan S, Jayamurthy M, Dobson P, Thompson IP. A novel hybrid nano zerovalent iron initiated oxidation- Biological degradation approach for remediation of recalcitrant waste metal working fluids. Water Res 2012 May 1; 46 (7): 2395-404.

2. Moscoso F, Deive FJ, Villar P, Pena R, Herrero L, Longo MA, et al. Assessment of a process to degrade metal working fluids using Pseudomonas stutzeri CECT 930 and indigenous microbial consortia. Chemosphere 2012 Jan; 86 (4): 420-6.

3. Gilbert Y, Veillette M, Duchaine C. Metalworking fluids biodiversity characterization. J Appl Microbiol 2010 Feb; 108 (2): 437-49.

4. Lucas Garcia JA, Grijalbo L, Ramos B Fernández-Piñas F, Rodea-Palomares I, Gutierrez-Mañero FJ. Combined phytoremediation of metal-working fluids with maize plants inoculated with different microorganisms and toxicity assessment of the phytoremediated waste. Chemosphere 2013 Mar; 90 (11): 2654-61.

5. Jagadevan S, Graham NJ, Thompson IP. Treatment of waste metalworking fluid by a hybrid ozone-biological process. J Hazard Mater 2013 Jan 15; 244-245: 394-402.

6. Kim DJ, Lim Y, Cho D, Rhee H. Biodegradation of monoethanolamine in aerobic and anoxic conditions. Korean J Chem Eng 2010; 27 (5): 1521-6.

7. Grijalbo L, Fernandez-Pascual M, García-Seco D, Gutierrez-Mañero FJ, Lucas JA. Spent metal working fluids produced alterations on photosynthetic parameters and cell-ultrastructure of leaves and roots of maize plants. J Hazard Mater 2013 Sep 15; 260: 220-30.

8. Jagadevan S, Dobson P, Thompson IP. Harmonisation of chemical and biological process in development of a hybrid technology for treatment of recalcitrant metalworking fluid. Bioresour Technol 2011 Oct; 102 (19): 8783-9.

9. Rodriguez-Verde I, Regueiro L, Pena R, Álvarez JA, Lema JM, Carballa M. Feasibility of spent metalworking fluids as co-substrate for anaerobic co-digestion. Bioresour Technol 2014 Mar; 155: 281-8.

10. Weijun Z, Ping X, Dongsheng W. Central treatment of different emulsion wastewaters by an integrated process of physicochemically enhanced ultrafiltration

and anaerobic–aerobic biofilm reactor. Bioresour Technol 2014 May; 159: 150-6.

11. Tong K, Zhang Y, Chu PK. Evaluation of calcium chloride for synergistic demulsification of super heavy oil wastewater. Colloids and Surfaces A: Physicochem Engineering Aspects 2013; 419: 46-52.

12. Kun-Yi AL, Hongta Y, Camille P, Shen-Yi Chen. Removing oil droplets from water using a copper-based metal organic frameworks. Chem Eng J 2014; 249: 293-301.

13. Mandal T, Maity S, Dasgupta D, Datta S. Advanced oxidation process and biotreatment: their roles in combined industrial wastewater treatment. Desalination 2010 Jan 1; 250 (1): 87-94.

14. Myers RH, Montgomery DC. Response surface methodology: process and product optimization under designed experiments. 3rd ed. New York: Wiley and Sons; 2009. 255-80.

15. Alaton IA, Asli A, Tugba OH. An optimization and modelling approach for H_2O_2/UV-C oxidation of a commercial non-ionic textile surfactant using central composite design. J Chem Technol Biotechnol 2010; 85: 493-501.

16. Muhamad HM, Sheikh Abdullah SR, Mohamad AB, Abdul Rahman R, Hasan Kadhum AA. Application of response surface methodology (RSM) for optimisation of COD, NH_3–N and 2, 4-DCP removal from recycled paper wastewater in a pilot-scale granular activated carbon sequencing batch biofilm reactor (GAC-SBBR). J Environ Manage 2013 May 30; 121: 179-90.

17. Wu Y, Zhou S, Qin F, Ye X, Zheng K. Modeling physical and oxidative removal properties of Fenton process for treatment of landfill leachate using response surface methodology (RSM). J Hazard Mater 2010 Aug 15; 180 (1-3): 456-65.

18. Zhang W, Xiao P, Wang D. Central treatment of different emulsion wastewaters by an integrated process of physicochemically enhanced ultrafiltration and anaerobic–aerobic biofilm reactor. Bioresour Technol 2014 May; 159: 150-6.

19. Xian Liu, Xiao-Ming Li, Qi Yang, Xiu Yue, Ting-Ting Shen, Wei Zheng, et al. Landfill leachate pretreatment by coagulation–flocculation process using iron-based coagulants: Optimization by response surface methodology. Chemical Engineering Journal 2012 Aug 15; 200-2: 39-51.

20. Gutiérrez G, Lobo A, Benito JM, Coca J, Pazos C. Treatment of a waste oil-in-water emulsion from a copper-rolling process by ultrafiltration and vacuum evaporation. J Hazard Mater 2011 Jan 30; 185 (2-3): 1569-74.