

Response Surface Methodology to Optimize Wastewater Treatment in Carpet Industries by Potassium Ferrate

H. A. Jamali¹, K. Dindarloo², M. Panahi Fard³, M. Moradnia⁴

1. Assist. Prof. of Environmental Health Engineering, School of Health, Qazvin University of Medical Sciences, Qazvin, Iran
2. Assist. Prof. of Environmental Health Engineering, School of Health, Hormozgan University of Medical Sciences, Hormozgan, Iran
3. MSc Student of Environmental Health Engineering, School of Health, Qazvin University of Medical Sciences, Qazvin, Iran
4. MSc Student of Environmental Health Engineering, School of Health, Qazvin University of Medical Sciences, Qazvin, Iran
(Corresponding Author) maryam.moradnia2000@gmail.com

(Received Dec. 28, 2015 Accepted Dec. 21, 2016)

To cite this article :

Jamali, H. A., Dindarloo, K., Panahi Fard, M., Moradnia, M., 2018, "Response surface methodology to optimize wastewater treatment in carpet industries by potassium ferrate" Journal of Water and Wastewater, 29(2), 38-47. Doi: 10.22093/wwj.2017.44343.2078. (In Persian)

Abstract

One of the chemical oxidation method for water and wastewater treatment is to use potassium ferrate. The aim of this study was to optimize the potassium ferrate consumption for wastewater treatment in carpet industries using central composite design and response surface methodology. The samples of this experimental study were collected from a carpet factory monthly and during two seasons. Measuring of the studied parameters were carried out based on the standard reference method for experiments in water and wastewater. To determine the optimized conditions for removing COD, color, turbidity and TSS by potassium ferrate, the central composite design and response surface methodology were used. The results showed that two independent variables of pH and potassium ferrate concentration and their interaction had a significant effect on removing COD, turbidity, color and TSS variables. The optimum condition for removal of these four pollutants were 160mg/l for consumption dosage of potassium ferrate and 4.5 for pH. In such condition the removal percentage of COD, turbidity, color and TSS were 86%, 85%, 84% and 83% respectively. In addition, the results indicated that the quadratic model has a good fitting to the experimental data. Potassium ferrate is recommended as an effective compound for reducing COD, color, turbidity and TSS from wastewater produced in textile industries especially in carpet industries. This process can be applied as a preliminary treatment and in cases where biological treatment is the main treatment, it could be used as a supplementary treatment.

Keywords: Industrial Wastewater Treatment, Textile Industries, Potassium Ferrate, Response Surface Methodology, Optimization.



روش سطح پاسخ در بهینه‌سازی تصفیه فاضلاب صنایع فرش با استفاده از فرات پتاسیم

حمزه علی جمالی^۱، کاووس دیندارلو^۲، مسعود پناهی فرد^۳، مریم مرادنی^۴

۱- استادیار گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی قزوین، قزوین، ایران
۲- استادیار گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی هرمزگان، هرمزگان، ایران
۳- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی قزوین، قزوین، ایران
۴- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی قزوین، قزوین، ایران
(نویسنده مسئول) maryam.moradnia2000@gmail.com

(دریافت ۹۴/۱۰/۷ پذیرش ۹۵/۱/۱)

برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام بفرمایید:

جمالی، ح. ع.، دیندارلو، ک.، پناهی فرد، م.، مرادنی، م.، ۱۳۹۷، "روش سطح پاسخ در بهینه‌سازی تصفیه فاضلاب صنایع فرش با استفاده از فرات پتاسیم"، مجله آب و فاضلاب، ۲۹(۲)، ۴۷-۳۸. Doi: 10.22093/wwj.2017.44343.2078

چکیده

یکی از روش‌های اکسیداسیون شیمیایی در تصفیه آب و فاضلاب استفاده از فرات پتاسیم است. هدف از این پژوهش بهینه‌سازی مصرف فرات پتاسیم در تصفیه فاضلاب صنایع فرش با به کارگیری طرح مرکب مرکزی و روش سطح پاسخ بود. نمونه‌های این مطالعه تجربی از فاضلاب یک کارخانه تولید فرش جمع‌آوری شد. نمونه‌گیری به صورت ماهانه و در دو فصل انجام شد. اندازه‌گیری پارامترهای پژوهش بر اساس روش‌های ذکر شده در کتاب استاندارد متد انجام شد. برای تعیین شرایط بهینه حذف COD، رنگ، کدورت و TSS توسط فرات پتاسیم از روش پاسخ سطح و طرح مرکب مرکزی استفاده شد. نتایج نشان داد که دو متغیر مستقل pH و غلظت فرات پتاسیم و اثرات متقابل آنها اثرات معنی‌داری در حذف متغیرهای پاسخ COD، کدورت، رنگ و TSS داشتند. شرایط بهینه برای حذف این چهار آلاینده برای مقدار فرات پتاسیم برابر با ۱۶۰ میلی‌گرم در لیتر و برای pH برابر ۴/۵ بود. در این شرایط میزان حذف COD، کدورت، رنگ و TSS به ترتیب ۸۶، ۸۴، ۸۵ و ۸۳ درصد بود. نتایج نشان داد که مدل درجه دوم آماری، برازش خوبی بر داده‌های آزمایشگاهی دارد. فرات پتاسیم به‌عنوان یک ترکیب مؤثر برای کاهش آلاینده‌های COD، کدورت، رنگ و TSS از فاضلاب تولیدی صنایع نساجی، به‌ویژه فرش پیشنهاد می‌شود. این فرایند می‌تواند به‌عنوان تصفیه مقدماتی و در مواردی که تصفیه زیستی به‌عنوان تصفیه اصلی به کار می‌رود، به‌عنوان تصفیه تکمیلی به کار رود.

واژه‌های کلیدی: تصفیه فاضلاب صنعتی، صنایع نساجی، فرات پتاسیم، روش پاسخ سطح، بهینه‌سازی

۱- مقدمه

جانبی خطرناکی تولید می‌کنند که باعث تخریب اکوسیستم می‌شوند. استفاده از فرات پتاسیم یکی از روش‌های اکسیداسیون شیمیایی برای تصفیه این گونه فاضلاب‌هاست (Perez et al. 2002; Arsalan et al. 1999; Kang & Chang 1997; Kuo 1992; Solozhenko et al. 1995). فرات پتاسیم (K_2FeO_4) یکی از نمک‌های آهن است که حاوی یون غیر معمول با ظرفیت اکسیداسیون +۶ است. یون $(FeO_4)^{2-}$ یک اکسیدان قوی است و پتانسیل اکسیدکنندگی آن در محیط‌های

حجم زیادی از فاضلاب تولیدی در صنایع نساجی ناشی از فاضلاب واحدهای رنگرزی است که آلاینده‌های زیادی دارد و باید قبل از تخلیه به محیط زیست تصفیه شوند. فاضلاب‌های ناشی از واحدهای رنگرزی شدیداً رنگی، دارای COD بالا، نوسانات زیاد دبی و بار آلودگی، pH و دما می‌باشند (Ahn et al. 1999; Szyrkwicz et al. 2001). در بسیاری از موارد این رنگ‌ها سمی هستند و محصولات



مستقیم، متقابل و منحنی متغیرها ارائه می‌دهد (Mohajeri et al. 2010).

هدف از این پژوهش به کارگیری طرح مرکب مرکزی و روش سطح پاسخ به منظور بهینه‌سازی مصرف فرات پتاسیم در تصفیه فاضلاب صنایع فرش بود.

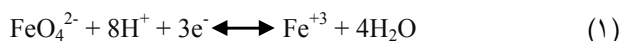
۲- مواد و روش‌ها

نمونه‌های این مطالعه تجربی از فاضلاب یک کارخانه تولید فرش واقع در شهرک صنعتی تاکستان در استان قزوین به صورت ترکیبی در ساعات مختلف شبانه روز در شیفت‌های مختلف کاری از فاضلاب خروجی خط تولید کارخانه تهیه شد و در شرایط دمایی ۴ درجه سلسیوس به آزمایشگاه دانشکده بهداشت دانشگاه علوم پزشکی قزوین منتقل شد. منبع تأمین آب این واحد صنعتی یک حلقه چاه عمیق بود. این چاه در ناحیه‌ای قرار داشت که هیچ‌گونه منبع آلاینده صنعتی، شهری و کشاورزی در اطراف آن وجود نداشت. رنگ‌های به کار رفته در این صنعت، مخلوطی از رنگ‌های نوع اسیدی، دیسپرس، آزو و آنتروکوئینون بودند.

اندازه‌گیری رنگ طبق دستور استاندارد ۲۱۲۰ بر اساس کتاب استاندارد متد با استفاده از اسپکتروفتومتر مدل T80+ UV/Vis Spectrophotometer (PG Instrument Ltd) انجام شد (APHA, WEF 2005). به منظور انجام آزمایش‌ها از یک دستگاه جارتست شش خانه‌ای ساخت ایران استفاده شد. مراحل آزمایش جار شامل مرحله اختلاط سریع با سرعت چرخش تیغه ۲۰۰ rpm به مدت یک دقیقه، مرحله اختلاط آرام با سرعت چرخش ۴۰ rpm به مدت ۲۰ دقیقه و مرحله ته‌نشینی به مدت ۶۰ دقیقه بود. برای تنظیم pH از محلول اسید سولفوریک ۰/۱ مولار و محلول سود ۰/۰۵ مولار استفاده شد. مقدار فرات مصرفی در دامنه ۵۰ تا ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر و pH در دامنه ۳ تا ۶ انتخاب شد. این دامنه‌های انتخابی بر اساس آزمایش‌های مقدماتی و پژوهش‌های گذشته تعیین شد (Ciabatti et al. 2010; Jiang et al. 2015).

تعداد آزمایش‌های مقدماتی برای تعیین دامنه pH و مقدار فرات پتاسیم مصرفی ۳۰ مورد بود. فرات پتاسیم مورد استفاده با درجه خلوص ۹۷ درصد از شرکت Sigma Aldrich تهیه شد. محلول فرات ۱ گرم در لیتر با اضافه کردن شکل جامد K_2FeO_4 به محلول $MnNa_2HPO_4$ ۰/۰۰۵ M و M ۰/۰۰۱ بافر بورات در pH

اسیدی و قلیایی به ترتیب بین ۲/۲ تا ۰/۷۲ است (Ciabatti et al. 2010). به دلیل اینکه فرات پتاسیم در طی فرایند اکسیداسیون به یون‌های Fe^{+3} یا هیدروکسید فریک احیا می‌شود، توانایی انجام انعقاد را نیز دارد. بنابراین فرات پتاسیم دارای عملکرد دو گانه اکسیداسیون و انعقاد در تصفیه آب و فاضلاب است و به همین دلیل برای حذف آلاینده‌های زیست‌محیطی توصیه شده است. این ترکیب یک ماده شیمیایی سبز رنگ است و واکنش آن در محیط آبی به صورت معادله ۱ است (Jiang et al. 2012; Jiang 2007)



از فرات (VI) به طور موفقیت‌آمیزی در فرایندهای تصفیه آب استفاده شده است (Jiang et al. 2009; Stanford et al. 2010; Jiang et al. 2006)

اخیراً پژوهش‌هایی در مورد حذف آلاینده‌های دارویی و ریز آلاینده‌ها توسط فرات (VI) انجام شده است که نتایج بیانگر تأثیر مؤثر این ترکیب در تجزیه این گونه آلاینده‌ها از فاضلاب بوده است (Seitz et al. 2008; Anquandah et al. 2011; Yang et al. 2012; Sharma et al. 2008)

استفاده از روش بهینه‌سازی سنتی در آنالیز چند متغیره، علاوه بر زمان بر بودن، به مواد شیمیایی زیادی نیاز دارد و دقت آن نیز به دلیل خطای بالا، کم است. همچنین در این روش امکان بررسی اثرات متقابل متغیرها وجود ندارد (Mohajeri et al. 2010).

روش‌های طراحی آماری آزمایش‌ها مانند روش سطح پاسخ^۱ و طرح مرکب مرکزی^۲ علاوه بر رفع محدودیت‌های بالا، اثرات متقابل متغیرها را نیز مورد بررسی قرار می‌دهند. به کارگیری روش سطح پاسخ برای مدل‌سازی و آنالیز اثرات متغیرهای مستقل متعدد روی یک متغیر پاسخ (وابسته) و تغییر آنها در جهت دستیابی به یک پاسخ بهینه به کار می‌رود (Montgomery 2008). یک مدل مطلوب در روش سطح پاسخ، طرح مرکب مرکزی است که در فراهم کردن اطلاعات کافی در مورد اثرات متغیرها و اثرات خطای آزمایش، حتی با تعداد کمی از آزمایش‌ها، کارایی و انعطاف لازم را دارد (Ahmad et al. 2005).

طرح مرکب مرکزی اطلاعات ارزشمندی در مورد اثرات

¹ Response Surface Methodology (RSM)

² Central Composite Design (CCD)



تجربی مرتبه دوم است توصیف می‌شود

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i \cdot x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} \cdot x_i^2 + \sum_{i < j \leq k} \beta_{ij} \cdot x_i \cdot x_j + \dots + e \quad (3)$$

که در آن

i ثابت خطی، j ثابت درجه دوم، β ثابت رگرسیون، k تعداد فاکتورهای مورد مطالعه و بهینه شده در آزمایش‌ها و e خطای تصادفی است.

۳- نتایج و بحث

نتایج میانگین پارامترهای کیفی فاضلاب مورد مطالعه در طی دوره پژوهش در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- خصوصیات کیفی فاضلاب کارخانه تولید فرش مورد مطالعه

Table 1. Quality features of the wastewater in studied carpet factory

Parameter	Value (X±S.D)
pH	65.5 ± 0.7
Electric conductivity (µS/Cm)	700 ± 13
TOC(mg/L)	550 ± 23
COD(mg/L)	2100 ± 62
BOD ₅ (mg/L)	330 ± 3
Sulfate (mg/L)	400 ± 23
Chloride (mg/L)	250 ± 23
Nitrate (mg/L as N)	1.2 ± 0.5
TSS(mg/L)	250 ± 10
TDS(mg/L)	920 ± 40
TVS (mg/L)	700 ± 20
Turbidity (NTU)	400 ± 10
Alkalinity (mg/L as CaCO ₃)	220 ± 15
Acidity (mg/L as CaCO ₃)	34 ± 5
Color(TCU)	330

جدول ۲ طراحی پژوهش به روش طرح مرکب مرکزی، سطوح متغیرهای مستقل به کار رفته در این مطالعه و همچنین نتایج آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج ارائه شده در این جدول بالاترین راندمان حذف به دست آمده برای پاسخ‌های COD، کدورت، رنگ و TSS به ترتیب برابر با ۸۷، ۸۸، ۸۹ و ۸۹ درصد بود.

جدول ۳ نتایج تحلیل واریانس مدل مرتبه دوم در مورد داده‌های آزمایشگاهی به دست آمده را نشان می‌دهد. مطابق نتایج ارائه

برابر ۹ تهیه شد. در این پژوهش شرایط بهینه pH و مقدار مصرف فرات پتاسیم برای حذف COD، رنگ، کدورت و TSS از فاضلاب صنایع تولید فرش توسط فرات پتاسیم و با به کارگیری CCD/RSM تعیین شد. برای طراحی پژوهش، آنالیز آماری، مدل‌سازی و بهینه‌سازی از نرم‌افزار Design Expert7 (Stat-Ease Inc. Minneapolis USA) استفاده شد. متغیرهای مستقل به کار رفته در این پژوهش شامل غلظت فرات پتاسیم بر حسب میلی‌گرم در لیتر و pH (به ترتیب A و B) بودند. همچنین راندمان حذف COD، کدورت، رنگ و TSS به عنوان متغیرهای وابسته (پاسخ) فرایند در نظر گرفته شد. عملکرد فرایند با ارزیابی راندمان حذف COD، کدورت، رنگ و TSS مورد ارزیابی قرار گرفت. به منظور جلوگیری از تأثیر فاکتورهای دیگر و ساده‌تر بودن طراحی آزمایش‌ها، درجه حرارت اتاق در طول آزمایش‌ها ثابت نگه داشته شد. چهار متغیر مستقل به حالت کد شده و بدون بعد تبدیل شدند. این کار برای امکان پذیر کردن مقایسه متغیرهای با ماهیت و واحدهای اندازه‌گیری مختلف، تنظیم نقص برآزش و کاهش خطا در تحلیل آماری معادله چند جمله‌ای درجه دوم انجام شد. روش تبدیل به صورت معادله ۲ است

$$x_i = \frac{x_i - x_0}{\Delta x} \quad i = 1, 2, 3, \dots, k \quad (2)$$

که در آن

x_i عدد کد شده بدون بعد متغیر مستقل، x_0 مقدار x_i در نقطه مرکزی و Δx اختلاف سطح مقادیر متغیر است. سطوح حداکثر، مرکزی و حداقل (+۱، ۰ و -۱) هر متغیر بر پایه CCD تعیین شد.

اصول CCD در این پژوهش، شامل 2^k نقطه فاکتوریل کسری $(k=2)$ ، $2k$ نقطه محوری و ۵ نقطه مرکزی بود. بنابراین ۱۳ آزمایش شامل ۴ نقطه فاکتوریل، ۴ نقطه محوری و برای ارزیابی خطای خالص تعداد ۵ آزمایش اضافی در نقطه مرکزی انجام شد. پس از آنالیز واریانس و رگرسیون داده‌های آزمایشگاهی به دست آمده، شرایط بهینه به روش گرافیکی تعیین شد و برای تأیید نتایج به دست آمده از مدل با داده‌های آزمایشگاهی با آزمایش اضافی در شرایط بهینه انجام و نتایج آزمایشگاهی با مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل مورد مقایسه قرار گرفت.

جدول ۱ نتایج به دست آمده از طراحی آزمایش‌ها را نشان می‌دهد. رفتار سیستم توسط معادله ۳ که یک مدل چند جمله‌ای



جدول ۲- ماتریس طرح مرکب مرکزی با دو متغیر مستقل با مقادیر واقعی و سطوح کد شده و نتایج آزمایشگاهی

Table 2. Central composite design matrix with two independent variables and with actual values, codified surfaces and experimental results

Test number	pH	Consumed ferrate(mg/l)	Removal efficiency (%)			
			COD	Turbidity	Color	TSS
1	6.5	225	75	74	47	43
2	5	175	85	82.5	87	88
3	3.5	75	75	71	49	44
4	5	175	87	85	88	84
5	5	175	85	84	84	88
6	5	175	85	88	88	87
7	6.5	75	50	53	30	50
8	5	200	83.9	86	89	86
9	5	175	82	81	88.5	89
10	3.5	225	65	69	52	65
11	4.25	175	87	83	80	88
12	5.75	175	82	82	80	80
13	5	100	81.5	82	80	76

جدول ۳- نتایج تحلیل واریانس و کفایت مدل مرتبه دوم در حذف COD، کدورت، رنگ و TSS با استفاده از فرات پتاسیم

Table 3. Analysis results of variance and efficiency of second grade model for COD, turbidity, color and TSS removal by potassium ferrate

Response	Final equation with codified variables	P	PLOF	R ²	Adj.R ²	AP	SD	CV	PRESS
COD	85.35+2.49A-5B+7.5AB-13.73A ²	<0.0001	0.75	0.99	0.98	23	1.55	1.98	37.1
Turbidity	84.68+3.11A+4.56B+5.5AB-12.04B ²	<0.0001	0.76	0.96	0.94	19	2.4	3	328
Color	8.78A-2B+6.25AB-10.95A ² +28.95B ²	<0.0001	0.87	0.96	0.94	19	2.4	3	328
TSS	87.08+5.78A-2.89B-5.75AB-23.68A ² -11.68B ²	<0.0001	0.23	0.99	0.98	27.2	2.38	3.18	899.5

P:Probability of error; PLOF: Probability of lack of fit; AP: Adequate precision;SD: Standard deviation; CV:Coefficient of variance; PRESS: Predicted residual error sum of squares

(کمتر از ۱۰ درصد) شانس اینکه این مقادیر F-value اتفاق بیفتد، بسیار بالا است. ضریب آزمون ضعف برازش^۱، تغییرات داده‌ها را حول مدل برازش شده توصیف می‌نماید. در صورتی که مدل به‌خوبی برازش نشده باشد، این آزمون معنی‌دار است (Montgomery 2008). نتایج آزمون ضعف برازش مربوط به مدل مرتبه دوم برازش یافته برای پاسخ‌های COD، کدورت، رنگ و TSS به ترتیب برابر با ۰/۷۵۱۲، ۰/۶۶۴۵، ۰/۸۶۸۵ و ۰/۲۲۵۵ به دست آمده است. ضریب تبیین R² که نسبت کل تغییرات پاسخ پیش‌بینی شده توسط مدل را ارائه می‌دهد، نشان‌دهنده نسبت مجموع مربعات ناشی از رگرسیون^۲ به کل مجموع مربعات^۳ است. بزرگ بودن مقادیر R² و نزدیک بودن آن به ۱ مطلوب است و یک توافق

شده در جدول، تمامی واژه‌های مدل درجه دوم آماری معنی‌دار هستند.

شکل ۱ نمودار سطح پاسخ عوامل مؤثر در حذف پارامترهای COD، کدورت، رنگ و TSS را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در نمودارها مشاهده می‌شود، کلیه پاسخ‌های مورد مطالعه دارای یک نقطه بهینه حذف می‌باشند.

نتایج آنالیز واریانس برای هر پاسخ در جدول ۳ نشان می‌دهد که دو متغیر مستقل و اثرات متقابل آنها تأثیر معنی‌داری داشته و فرات پتاسیم دارای اثرات قابل توجهی روی تجزیه مواد و حذف رنگ از فاضلاب صنایع فرش است. همچنین با توجه به نتایج آنالیز واریانس و رگرسیون، کلیه واژه‌های مدل درجه دوم آماری برای چهار متغیر پاسخ معنی‌دار بودند. مقادیر F-value برای حذف COD، کدورت، رنگ و TSS به ترتیب برابر با ۱۱۶/۳۳، ۳۷/۵۴، ۴۰۸/۴۷ و ۱۲۲/۰۲، نشان می‌دهد که مدل‌ها برای حذف مؤثر پاسخ‌های ذکر شده معنی‌دار هستند و به دلیل میزان نویز پایین

¹ Lack of fit test

² Sum of Squares Regression

³ Total Sum of Squares



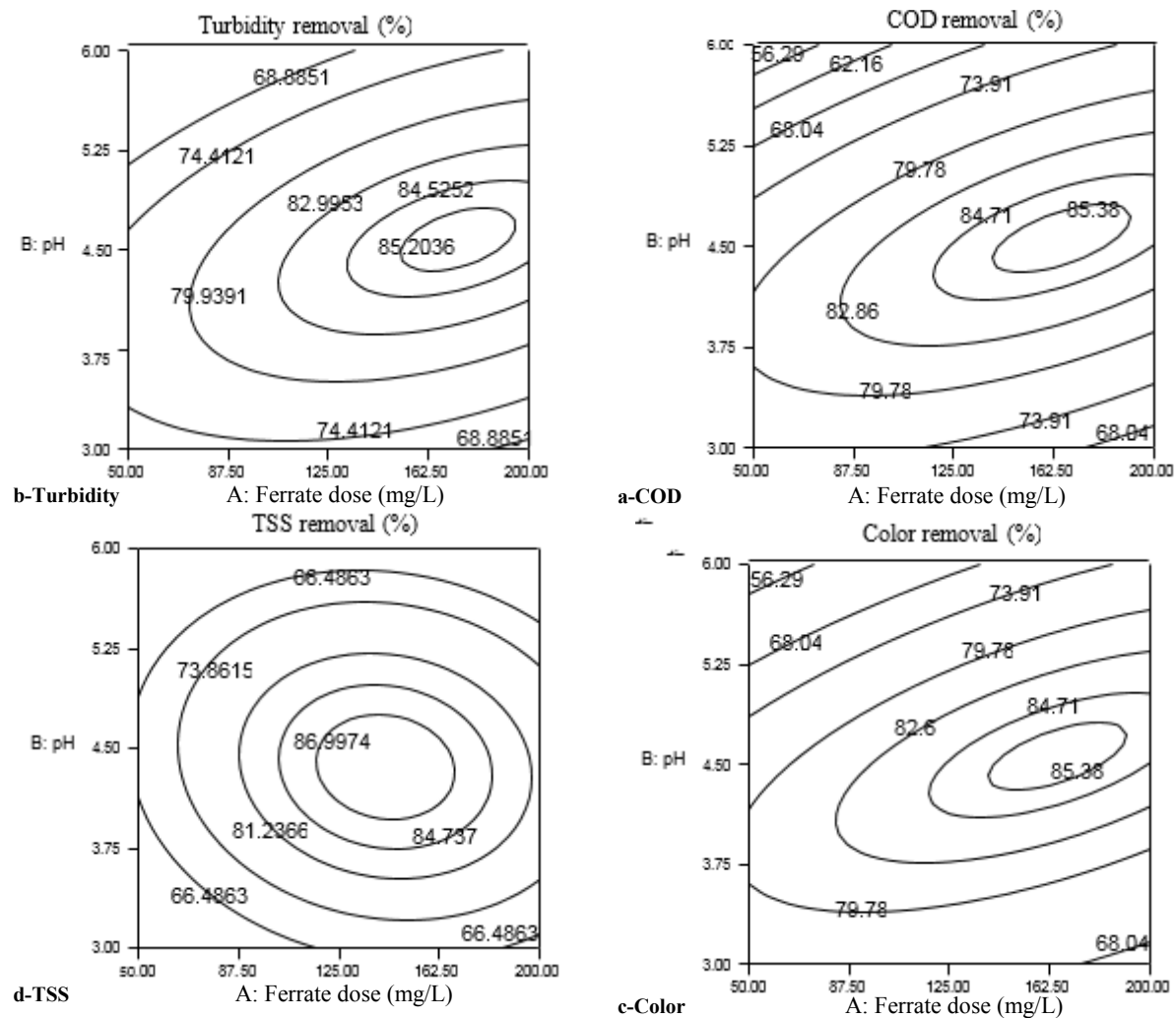


Fig. 1. The contour plots for COD, turbidity, color and TSS removal

شکل ۱- نمودار سطح پاسخ حذف آلاینده‌های COD، کدورت رنگ و TSS

خطای پیش‌بینی شده مقایسه می‌نماید. در این پژوهش AP برای حذف COD، کدورت، رنگ و TSS به ترتیب برابر با ۳۴/۳۱، ۱۹/۲۱، ۵۷/۹ و ۲۷/۱۹ درصد بود که نشان‌دهنده وجود سیگنال کافی است. نسبت‌های بالاتر از ۴ نشان‌دهنده کفایت مدل‌ها است (Arsalan-Altan et al. 2010; Wu et al. 2010). در این پژوهش مقدار AP برای تمام پاسخ‌ها، بالاتر از ۴ بود که نشان‌دهنده توان بالای مدل در پیش‌بینی نتایج است. ضریب تغییرات که به صورت نسبت خطای استاندارد برآورد شده به میانگین مقدار پاسخ مشاهده شده بیان می‌شود، تکرار مدل را تعریف می‌کند. به‌طور نرمال، در صورتی می‌توان یک مدل را تکرارپذیر در نظر گرفت که مقدار C.V آن بیشتر از ۱۰ درصد نباشد (Ahmad et al. 2005). ضریب

مطلوب با R^2 تعدیل یافته ($Adj.R^2$) ضروری است (Montgomery 2008; Ahmad et al. 2005). کیفیت برازش مدل چند جمله‌ای درجه دوم با R^2 بیان می‌شود. در این پژوهش، در تمامی موارد ضریب R^2 بزرگ‌تر از ۰/۹۶ بود و ضریب $Adj.R^2$ بیشتر از ۰/۹۴ بود. بالا بودن مقدار R^2 نشان‌دهنده توافق بالای داده‌های آزمایشگاهی به دست آمده با داده‌های برآورد شده توسط مدل است (Noordin et al. 2004).

بنابراین می‌توان گفت که مدل مرتبه دوم بر داده‌ها برازش خوبی دارد. دقت کافی^۱ که در جدول ۳ نشان داده شده است، شاخص سنجش "نسبت سیگنال به نویز" است. به عبارت دیگر، AP، دامنه مقادیر پیش‌بینی شده در نقاط طراحی را با متوسط

¹ Adequate precision



برازش داشته باشند را به صورت سایه‌دار مشخص می‌کند (Mohajeri et al. 2010). حدود حداقل پاسخ‌های انتخابی برای هر پارامتر، حداکثر مقادیر قابل حذف هر پاسخ را نشان می‌دهد به نحوی که یک ناحیه همپوشانی با سایر پاسخ‌ها دارد. این محدوده‌ها، نسبتاً نزدیک به نقاط حداکثر راندمان حذف به دست آمده برای هر پاسخ انتخاب شده هستند، به طوری که بتوان به یک ناحیه بهینه نسبتاً کوچک رسید. در این پژوهش راندمان حذف در نظر گرفته شده برای COD، کدورت، رنگ و TSS به ترتیب ۸۶، ۸۴، ۸۵، ۸۳ درصد در نظر گرفته شد. در این شرایط مقدار مصرف فرات پتاسیم و pH با روی هم‌گذاری چهار نمودار سطح پاسخ در نرم‌افزار مورد استفاده به دست آمد. با توجه به شکل ۲، مقدار مصرف فرات پتاسیم ۱۶۰ میلی‌گرم در لیتر و pH برابر ۴/۵ بود. جیانگ و همکاران بالاترین راندمان حذف سیپروفلوکساسین را در pH بین ۵ تا ۶ گزارش نمودند (Jiang et al. 2013). باریسی و همکاران نیز حذف کامل فلوربپیروفن از محلول‌های آبی توسط فرات را در pH برابر ۴ گزارش نمودند (Barisci et al. 2015). همچنین نتایج پژوهشی که با هدف حذف ترکیب بیسفنول با استفاده از ترکیب فرات پتاسیم انجام شد، نشان داد که با افزایش pH از ۳ به ۶، میزان حذف بیسفنول از حدود ۸۵ به ۹۵ درصد افزایش می‌یابد (Han et al. 2015). نتایج پژوهش‌های انجام شده با نتایج پژوهش حاضر همخوانی دارد.

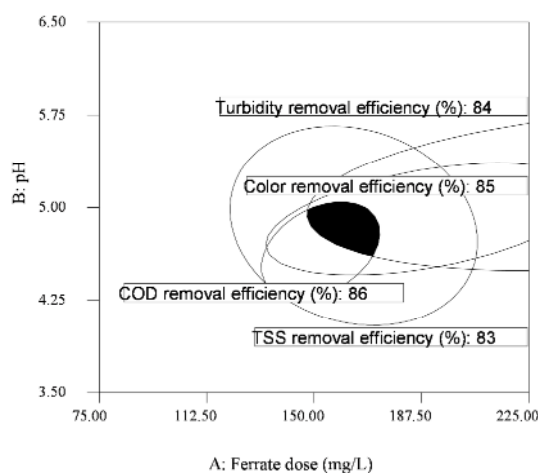


Fig. 2. The overlaying plots for COD, turbidity, color and TSS removal

شکل ۲- نمودار روی هم‌گذاری شده ناحیه بهینه برای فرات پتاسیم در حذف COD، کدورت، رنگ و TSS

تغییرات در این پژوهش در تمامی موارد کمتر از ۱۰ درصد هستند. همه نمودارهای سطح پاسخ ترسیم شده تقریباً دارای شکل متقارن با منحنی میزان‌های دایره‌ای هستند. همچنین کلیه نمودارهای پاسخ دارای یک نقطه اوج واضح هستند که نشانگر شرایط بهینه برای حداکثر پاسخ، به دو فاکتور مقدار فرات پتاسیم و pH در ناحیه طراحی وابسته است. به عبارت دیگر این نمودارها نشان می‌دهند که غلظت فرات پتاسیم و میزان pH تأثیر معنی‌داری در حذف متغیرهای پاسخ مورد مطالعه دارد.

با توجه به شکل ۲، رابطه متقابل مقدار فرات و pH بر روی پاسخ‌ها، دایره هم مرکز و نزدیک به هم ایجاد کرده‌اند. بنابراین نقطه بهینه در دامنه طراحی قرار گرفته و بیانگر این است که طراحی پژوهش به خوبی انجام شده است. نقطه مرکزی این دایره‌های هم مرکز، نقطه بهینه است. نتایج نشان داد که نقطه بهینه به طور جداگانه برای حذف COD، pH برابر ۴/۵ و مقدار ۱۵۰ میلی‌گرم در لیتر فرات، برای حذف کدورت به ترتیب pH برابر ۴/۷ و ۱۸۸ میلی‌گرم در لیتر فرات، برای حذف رنگ pH برابر ۵ و مقدار ۲۲۰ میلی‌گرم در لیتر فرات و برای حذف TSS برابر با pH برابر ۴/۸ و ۱۷۰ میلی‌گرم در لیتر فرات است. در این شرایط، راندمان حذف COD، کدورت، رنگ و TSS به ترتیب برابر با ۸۷، ۸۵، ۹۰ و ۸۹ درصد بود.

پژوهش‌های مختلف نشان داده‌اند که فرات پتاسیم در مقادیر ۱۰ تا ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر، قادر به حذف آلاینده‌های مختلف از جمله فلزات و مواد سمی از جریان فاضلاب می‌باشد (Bartzatt et al. 1992; Murmann & Robinson 1974). نتایج پژوهش سیابتی و همکاران در استفاده از ۷۰ میلی‌گرم در لیتر فرات پتاسیم برای تصفیه فاضلاب رنگی نساجی نشان داد که راندمان حذف COD، رنگ و کدورت به ترتیب برابر با ۹۱، ۵۰ و ۹۳ درصد بود که به جز حذف رنگ در سایر متغیرهای مورد بررسی، راندمان حذف با نتایج این مطالعه همخوانی داشت (Cibatti et al. 2010).

در پژوهش‌هایی که تعداد متغیر وابسته زیاد است، تعیین شرایط بهینه که به طور همزمان همه پارامترها در حد مطلوبی حذف شوند، با روی هم قرار دادن منحنی میزان‌های سطح پاسخ، به صورت گرافیکی امکان‌پذیر است. بهینه‌سازی گرافیکی، مقادیری از پاسخ‌ها در فضای متغیر مستقل که با معیارهای بهینه‌سازی

پتاسیم ۱۶۰ میلی‌گرم در لیتر و pH برابر ۴/۵ انجام شد. راندمان حذف به‌دست آمده از مدل برای COD، کدورت، رنگ و TSS به‌ترتیب ۸۵/۸، ۸۵/۳، ۸۸ و ۸۵/۷ درصد بود. نتایج آزمایشگاهی راندمان حذف این متغیرها را به‌ترتیب ۸۸، ۸۶/۹، ۸۹/۲ و ۸۸/۶ درصد نشان داد. میزان خطا و انحراف معیار بین مقادیر برآورد شده توسط مدل و نتایج آزمایشگاهی برای حذف COD، کدورت، رنگ و TSS به‌ترتیب برابر با ۲/۲±۰/۷، ۲/۹±۰/۲ و ۱/۲±۰/۱، ۲/۶±۰/۴۵ می‌شود، تمامی پاسخ‌های پیش‌بینی شده توسط مدل و نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌ها بسیار به هم نزدیک هستند که نشان دهنده برازش خوب داده‌ها بر مدل‌های به‌دست آمده است.

۴- نتیجه‌گیری

فرات پتاسیم راندمان خوبی در تصفیه فاضلاب کارخانجات تولید فرش دارد، به‌طوری که شرایط بهینه برای حذف این چهار آلاینده شاخص برابر با مقدار فرات پتاسیم ۱۶۰ میلی‌گرم در لیتر و pH برابر ۴/۵ بود. در این شرایط راندمان حذف COD، کدورت، رنگ و TSS به‌ترتیب ۸۶، ۸۴، ۸۵ و ۸۳ درصد بود. همچنین روش سطح پاسخ با حداقل خطا، در مقایسه با روش‌های سنتی، روش مطلوبی برای بهینه‌سازی فرایند تصفیه فاضلاب صنایع فرش با استفاده از فرات پتاسیم است. دو متغیر pH و غلظت فرات پتاسیم و اثرات متقابل آنها تأثیر معنی‌داری در حذف COD، کدورت، رنگ و TSS از فاضلاب تولیدی صنایع فرش دارد. همچنین با در نظر گرفتن وجود نقطه بهینه در فضای طراحی، می‌توان نتیجه گرفت که طراحی پژوهش به خوبی انجام شده است.

وانگ و همکاران در پژوهشی با به‌کارگیری پتاسیم فرات کپسول شده برای حذف ماده DNBP (دی نیترو بوتیل فنول) نشان دادند که غلظت فرات پتاسیم ۱/۲ گرم در لیتر و میزان pH برابر ۶/۵ به‌عنوان شرایط بهینه حذف است. همچنین گزارش کردند که پتاسیم فرات برای حذف COD و رنگ از کارخانه تولیدکننده DNBP بسیار مؤثر است. نتایج پژوهش ذکر شده حاکی از آن بود که با افزایش غلظت فرات پتاسیم، میزان حذف DNBP نیز افزایش می‌یابد. به‌طوری که با افزایش غلظت فرات پتاسیم از ۰/۴ به ۱/۲ گرم در لیتر، میزان حذف از ۶۸ درصد به ۹۳ درصد افزایش یافت. مصرف بالای فرات پتاسیم در مطالعه ذکر شده نسبت به مطالعه حاضر ممکن است به‌دلیل ساختار پیچیده ترکیب DNBP باشد (Wang et al. 2009).

همچنین نتایج پژوهش دیگری در به‌کارگیری فرات پتاسیم برای حذف کدورت و COD از فاضلاب حاصل از تصفیه ثانویه نشان داد که کارایی این ترکیب برای حذف آلاینده‌های ذکر شده بالاتر از ۷۰ درصد بود (Farooq & Bari 1986).

نتایج پژوهش دیگری که در مورد مقایسه کارایی سولفات فریک و فرات پتاسیم برای حذف COD، رنگ و کدورت از فاضلاب انجام شد، نشان داد که فرات پتاسیم در غلظت مشابه با سولفات فریک می‌تواند در حذف آلاینده‌های ذکر شده نقش بسزایی داشته باشد. همچنین نتایج این پژوهش نشان داد که لجن تولیدی حاصل از تصفیه با استفاده از فرات پتاسیم بسیار کمتر از لجن تولیدی سولفات فریک است (Jiang et al. 2006).

برای بررسی و تأیید توافقی داده‌های به‌دست آمده از مدل و داده‌های تجربی، دو آزمایش اضافی در شرایط بهینه غلظت فرات

References

- Ahn, D. H., Chang, W.-S. & Yoon, T. I., 1999, "Dyestuff wastewater treatment using chemical oxidation, physical adsorption and fixed bed biofilm process", *Process Biochemistry*, 34(5), 429-439.
- Arslan, I., Balcioglu, I. A. & Tuhkanen, T., 1999, "Oxidative treatment of simulated dyehouse effluent by UV and near-UV light assisted Fenton's reagent", *Chemosphere*, 39(15), 2767-2783.
- Anquandah, G. A., Sharma, V. K., Knight, D. A., Batchu, S. R. & Gardinali, P. R., 2011, "Oxidation of trimethoprim by ferrate (VI): Kinetics, products, and antibacterial activity", *Environmental Science & Technology*, 45(24), 10575-10581.



- Ahmad, A., Ismail, S. & Bhatia, S., 2005, "Optimization of coagulation-flocculation process for palm oil mill effluent using response surface methodology", *Environmental Science & Technology*, 39(8), 2828-2834.
- APHA, A., WEF., 2005, *Standard methods for the examination of water and wastewater*, American Public Health Association, American Water Works Association, and Water Environment Federation.
- Arslan-Alaton, I., Akin, A. & Olmez-Hanci, T., 2010, "An optimization and modeling approach for H₂O₂/UV-C oxidation of a commercial non-ionic textile surfactant using central composite design", *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 85(4), 493-450.
- Barişçı, S., Ulu, F., Sillanpää, M. & Dimoglo, A., 2015, "Evaluation of flurbiprofen removal from aqueous solution by electrosynthesized ferrate (VI) ion and electrocoagulation process", *Chemical Engineering Journal*, 262, 1218-1225.
- Bartzatt, R., Cano, M., L, Johnson. & Nage., D., 1992, "Removal of toxic metals and nonmetals from contaminated water", *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A Current Issues*, 35(4), 205-210.
- Ciabatti, I., Tognotti, F. & Lombardi, L., 2010, "Treatment and reuse of dyeing effluents by potassium ferrate", *Desalination*, 250(1), 222-228.
- Farooq, S. & Bari, A., 1986, "Tertiary treatment with ferrate and ozone", *Journal of Environmental Engineering*, 112(2), 301-310.
- Han, Q., Wang, H., Dong, W., Liu, T., Yin, Y. & Fanet, H., 2015, "Degradation of bisphenol A by ferrate (VI) oxidation: Kinetics, products and toxicity assessment", *Journal of Chemical Engineering*, 262, 34-40.
- Jiang, J., Stanford, C. & Mollazeinal, A., 2012, "The application of ferrate for sewage treatment: Pilot-to full-scale trials", *Global NEST Journal*, 14(1), 93-99.
- Jiang, J., 2007, "Research progress in the use of ferrate (VI) for the environmental remediation", *Journal of Hazardous Materials*, 146(3), 617-623.
- Jiang, J.-Q., Stanford, C. & Alsheyab, M., 2009, "The online generation and application of ferrate (VI) for sewage treatment A pilot scale trial", *Separation and Purification Technology*, 68(2), 227-231.
- Jiang, J.-Q., Panagouloupoulos, A. & Bauer, M., 2006, "The application of potassium ferrate for sewage treatment", *Journal of Environmental Management*, 79(2), 215-220.
- Jiang, J.-Q., Zhou, Z., Patibandla, S. & Shu, X., 2013, "Pharmaceutical removal from wastewater by ferrate (VI) and preliminary effluent toxicity assessments by the zebrafish embryo model", *Microchemical Journal*, 110, 239-245.
- Jiang, J.-Q., Zhou, Z., Patibandla, S. & Shu, X., 2013, "Pharmaceutical removal from wastewater by ferrate (VI) and preliminary effluent toxicity assessments by the zebrafish embryo model", *Microchemical Journal*, 110, 239-245.
- Jiang, J.-Q., Panagouloupoulos, A., Bauer, M. & Pearce, P., 2006, "The application of potassium ferrate for sewage treatment", *Journal of Environmental Management*, 79(2), 215-220.



- Kuo, W., 1992, "Decolorizing dye wastewater with Fenton's reagent." *Water Research*, 26(7), 881-886.
- Kang, S.-F. & Chang, H.-M., 1997, "Coagulation of textile secondary effluents with Fenton's reagent", *Water Science and Technology*, 63(2), 215-222.
- Mohajeri, S., Aziz, H. A., Isa, M. H., Zahed, M. A. & Adlan, M. N., 2010, "Statistical optimization of process parameters for landfill leachate treatment using electro-Fenton technique", *Journal of Hazardous Materials*, 176(1), 749-758.
- Montgomery, D. C., 2008, *Design and analysis of experiments*, John Wiley & Sons, N. Y.
- Murmann, R.K., & Robinson, P.R., 1974, "Experiments utilizing Fe_3O_4 for purifying water", *Water Research*, 8(8), 543-547.
- Noordin, M. Y., Venkatesh, V. C., Sharif, S., Elting, S. & Abdullah, A., 2004, "Application of response surface methodology in describing the performance of coated carbide tools when turning AISI 1045 steel", *Journal of Materials Processing Technology*, 145(1), 46-58.
- Perez, M., Torrades, F., Domenech, X. & Peral, J., 2002, "Fenton and photo-fenton oxidation of textile effluents", *Water Research*, 36(11), 2703-2710.
- Szpyrkowicz, L., Juzzolino, C. & Kaul, S. N., 2001, "A comparative study on oxidation of disperse dyes by electrochemical process, ozone, and hypochlorite and Fenton reagent", *Water Research*, 35(9), 2129-2136.
- Solozhenko, E., Soboleva, N. & Goncharuk, V., 1995, "Decolourization of azodye solutions by Fenton's oxidation", *Water Research*, 29(9), 2206-2210.
- Stanford, C., Jiang, J.-Q. & Alsheyab, M., 2010, "Electrochemical production of ferrate (iron VI): Application to the wastewater treatment on a laboratory scale and comparison with iron (III) coagulant", *Water, Air, & Soil Pollution*, 209(1-4), 483-488.
- Seitz, W., Jiang, J.-Q., Schulz, W., Weber, W. H., Maier, D. & Maier, M., 2008, "Formation of oxidation by-products of the iodinated X-ray contrast medium iomeprol during ozonation", *Chemosphere*, 70(7), 1238-1246.
- Sharma, V. K., Li, X.-Z., Graham, N. & Doong, R.-A., 2008, "Ferrate (VI) oxidation of endocrine disruptors and antimicrobials in water", *Journal of Water Supply: Research and Technology-AQUA*, 57(6), 419-426.
- Yang, B., Ying, G.-G., Zhao, J.-L., Liu, S., Zhou, L.-J. & Chen, F., 2012, "Removal of selected endocrine disrupting chemicals (EDCs) and pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) during ferrate (VI) treatment of secondary wastewater effluents", *Water Research*, 46(7), 2194-2204.
- Wang, H.-L., Liu, S.-Q. & Zhang, X.-Y., 2009, "Preparation and application of sustained release microcapsules of potassium ferrate (VI) for dinitro butyl phenol (DNBP) wastewater treatment", *Journal of Hazardous Materials*, 169(1), 448-453.
- Wu, Y., Zhou, S., Qin, F., Ye, X. & Zheng, K., 2010, "Modeling physical and oxidative removal properties of Fenton process for treatment of landfill leachate using response surface methodology (RSM)", *Journal of Hazardous Materials*, 180(1), 456-465.

