

## مدل‌سازی آماری و بهینه‌سازی فرایند تصفیه فاضلاب صنعتی مجتمع فولاد مبارکه به روش سطح پاسخ

مسعود طاهریون<sup>۱\*</sup>، علیرضا معماری پور<sup>۲</sup>، علی ترابیان<sup>۳</sup>

۱. اصفهان، دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مهندسی عمران

۲. تهران، دانشگاه خوارزمی، دانشکده فنی مهندسی، گروه مهندسی عمران

۳. تهران، دانشگاه تهران، دانشکده محیط‌زیست

(تاریخ دریافت: ۹۳/۰۵/۲۶ - تاریخ پذیرش: ۹۴/۰۶/۰۱)

### چکیده

در تحقیق حاضر، فرایند انعقاد و لخته‌سازی فاضلاب تصفیه‌خانه گالوانیزه مجتمع فولاد مبارکه به‌منظور حذف سی او دی از فاضلاب این واحد مدل‌سازی و بهینه‌سازی می‌شود. آزمایش‌های طراحی شده در این تحقیق با استفاده از مدل سطح پاسخ صورت گرفته است که از کارآمدترین روش‌های طراحی آزمایش است. متغیرهای مورد بررسی در این تحقیق چهار عامل پی اچ، کدورت ورودی، غلظت منعقدکننده و غلظت کمک منعقدکننده است که هر یک در پنج سطح بررسی شده است. در مرحله مدل‌سازی، با ساخت مدل رگرسیونی مرتبه دوم امکان پیش‌بینی میزان درصد حذف سی او دی در مقادیر مختلف متغیرهای مورد بررسی، بدون انجام دادن آزمایش فراهم می‌شود. در مرحله بهینه‌سازی نیز مقدار بهینه متغیرهای مورد بررسی با هدف حداکثر کردن میزان حذف سی او دی و حداقل کردن میزان مواد مصرفی به دست آمد که بیانگر مصرف ۳۵۰ میلی‌گرم بر لیتر کلوروفریک به‌عنوان منعقدکننده، ۰/۱۴ میلی‌گرم بر لیتر پلی‌الکترولیت به‌عنوان کمک منعقدکننده در پی اچ برابر ۱۱ و کدورت ورودی ۷۹ ان تی یو است.

واژه‌های کلیدی: انعقاد و لخته‌سازی، بهینه‌سازی، سطح پاسخ، سی او دی، فاضلاب گالوانیزه.

### ۱. مقدمه و هدف

سمی مانند فنول و فلئوئور، مواد رنگی و شوینده مانند دترجنت‌ها، فلزات سنگین مانند کروم و روی، اکسیژن مورد نیاز واکنش شیمیایی (سی او دی)<sup>۱</sup>، جامدات معلق کل (تی اس اس)<sup>۲</sup> و کدورت<sup>۳</sup> است [۱-۳]. آلاینده‌های ذکر شده را می‌توان با بهره‌گیری از روش‌های مختلف تصفیه فیزیکی، شیمیایی، بیولوژیکی و روش‌های تصفیه پیشرفته از آب جدا کرد و پساب حاصل را مجدداً استفاده کرد. نانوفیلتراسیون، اسمز معکوس، نيزار مصنوعی (وتلند<sup>۴</sup>) و جذب الکتریکی از جمله روش‌های تصفیه فاضلاب صنعت فولاد است [۴-۷]. روش انعقاد و لخته‌سازی یکی از مهم‌ترین و پرکاربردترین

صنایع فولادسازی به اقتضای فرایند تولید خود و نیاز به مصرف آب در روند تولید محصول، در مجاورت منابع آب استقرار می‌یابند. از اساس تولید فولاد بدون در نظر گرفتن عامل آب امکان‌پذیر نیست. در مراحل مختلف فرایند تولید فولاد مانند آهک‌پزی، گندله‌سازی، تولید و پرداخت شمش (تختال) و همچنین عملیات خنک‌کاری در تولید فولاد، ریخته‌گری مداوم و واحدهای تولید ورق گالوانیزه، قلع اندود و رنگی، لزوم بهره‌مندی از آب مبرم و ضروری است. یکی از مهم‌ترین آلاینده‌های موجود در فاضلاب صنایع فولاد، مواد

برابر با ۰/۴ میلی‌گرم بر لیتر، غلظت لخته‌ساز برابر ۴ میلی‌گرم بر لیتر و میزان پی اچ برابر ۷ باشد [۱۶].

محمدنژاد و همکاران (۱۳۹۰) در تحقیق خود به بهینه‌سازی عملیات انعقاد و لخته‌سازی در واحد تصفیه فاضلاب پتروشیمی مبین با استفاده از روش تاگوچی پرداخته‌اند. در این تحقیق، راندمان حذف کدورت در فرایند انعقاد و لخته‌سازی با استفاده از سه منعقدکننده پلی آلومینیوم کلراید، پلی فریک سولفات و کلرور فریک در شرایط مختلف بهره‌برداری بررسی شده است [۱۷].

وانگ و همکاران (۲۰۱۴) با استفاده از روش سطح پاسخ به بهینه‌سازی واحد انعقاد و لخته‌سازی فاضلاب کارخانه تولید تنباکو با هدف حداکثر کردن حذف رنگ و سی او دی از این فاضلاب پرداخته‌اند. عوامل مؤثر در این بهینه‌سازی شامل ماده منعقدکننده (پلی آلومینیوم کلراید)، کمک منعقدکننده (پلی آکریل آمید) و پی اچ است. نتایج نشان می‌دهد شرایط بهینه در صورت استفاده از ۷۱۵ میلی‌گرم بر لیتر منعقدکننده و ۴/۸ میلی‌گرم بر لیتر کمک منعقدکننده در پی اچ برابر ۶/۶ به دست می‌آید [۱۸].

پاتل و واشی (۲۰۱۰) در تحقیق خود به بررسی تأثیر دو منعقدکننده کیتوسان و پودر ذرت به‌عنوان منعقدکننده‌های ارزان‌قیمت جهت حذف رنگ از فاضلاب صنعت نساجی پرداخته‌اند. دما، غلظت منعقدکننده، زمان لخته‌سازی و پی اچ متغیرهای مورد بررسی در این تحقیق هستند. نتایج نشان می‌دهد منعقدکننده‌های کیتوسان و پودر ذرت به ترتیب موجب راندمان حذف رنگ به میزان ۹۴/۵ و ۸۹/۴ می‌شود که این شرایط در دمای ۳۴۰ درجه کلوین، غلظت منعقدکننده ۲۵ میلی‌گرم بر لیتر، زمان اختلاط ۶۰ دقیقه و پی اچ برابر ۴ ایجاد می‌شود [۱۹].

لیو و همکاران (۲۰۱۲) نیز در تحقیقی منعقدکننده‌های پلی سولفات فریک، کلرورفریک و سولفات فریک در تصفیه فاضلاب شیرابه حاصل از مرکز دفن را با استفاده از روش طراحی آزمایش سطح پاسخ بررسی کرده‌اند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد در حالت بهینه استفاده از پلی سولفات فریک با غلظت ۸ گرم بر لیتر در پی اچ برابر ۶، کلرورفریک با غلظت ۱۰ گرم بر لیتر در پی اچ برابر ۸ و سولفات فریک با غلظت ۱۲ میلی‌گرم بر لیتر در پی اچ برابر ۷/۵، بیشترین میزان حذف هیومیک اسید را دارد [۲۰].

ترابیان و همکاران (۱۳۸۴) به منظور حذف فلزات سنگین از فاضلاب صنایع تولید ورق قلع اندود و گالوانیزه از بی‌سولفیت سدیم و منعقدکننده کلرور فریک و آهک استفاده کردند. عوامل مؤثر در این تحقیق غلظت‌های منعقدکننده و کمک

روش‌ها به منظور تصفیه فاضلاب‌های صنعتی است که از طریق آن می‌توان با بررسی عوامل مختلف مانند دما، پی اچ، زمان ماند، غلظت منعقدکننده و... بازده فرایند را تا میزان زیادی افزایش داد. در آزمایش‌های متداول در صورت وجود چند عامل مؤثر در یک فرایند، در هر نوبت از آزمایش یکی از عوامل به صورت متغیر و سایر عوامل به صورت ثابت در نظر گرفته می‌شوند [۸-۱۳]. این شیوه آزمایش در صورت وجود عامل‌های با سطوح فراوان، موجب ایجاد تعداد بسیار زیاد آزمایش می‌شود که انجام دادن آن به صرف هزینه و زمان زیادی منجر می‌شود. در این شرایط، روش‌های طراحی آزمایش با بهره‌گیری از تکنیک‌های آماری، تعداد آزمایش‌ها را به طور شایان توجهی کاهش می‌دهد. روش طراحی آزمایش (دی او ای)<sup>۲</sup> روشی منسجم و هماهنگ است که در بیشتر تحقیقات آزمایشگاهی اولین قدم در اجرای پروژه‌های آزمایشگاهی محسوب می‌شود. فرایند طراحی آزمایش شامل تعیین یک سری از آزمایش‌هاست که در متغیرهای ورودی فرایند، آگاهانه تغییراتی ایجاد می‌کند تا از این طریق میزان تغییرات حاصل در پاسخ خروجی فرایند مشاهده و شناسایی شود. روش سطح پاسخ (آر اس ام)<sup>۳</sup> یکی از کارآمدترین روش‌های طراحی آزمایش است که باکس و ویلسون با انجام دادن اصلاحاتی در روش مشهور تاگوچی، در سال ۱۹۵۱ مطرح کردند و در سال‌های اخیر در برخی از تحقیقات آزمایشگاهی استفاده شده است. یکی از مهم‌ترین مزایای استفاده از این روش، صرفه‌جویی در وقت و هزینه از طریق کاهش چشمگیر تعداد آزمایش‌ها، تعیین حالت بهینه برای هر پارامتر و نیز تهیه مدل رگرسیونی فرایند مورد بررسی است [۱۴، ۱۵]. در ادامه به برخی از مهم‌ترین تحقیقات انجام گرفته در این زمینه اشاره می‌شود.

عبادی و همکاران (۱۳۹۱) در تحقیق خود کاهش کدورت از فاضلاب صنعت غذایی به روش انعقاد و لخته‌سازی را بررسی کرده‌اند. به این منظور، اثر پارامترهای غلظت منعقدکننده، غلظت کمک منعقدکننده و پی اچ در سه سطح بر راندمان کاهش کدورت از فاضلاب بررسی شد و به منظور طراحی آزمایش‌ها از روش سطح پاسخ استفاده شد. در نهایت، مشخص شد بهترین حالت عملکردی فرایند تصفیه انعقاد و لخته‌سازی مربوط به حالتی است که غلظت منعقدکننده

1. pH
2. Design Of Experiment (DOE)
3. Response Surface Methodology (RSM)

## ۲. مواد و روش‌ها

### ۱.۲. مواد

فاضلاب ورودی به تصفیه‌خانه شیمیایی مجتمع فولاد مبارکه شامل چهار خط فاضلاب چربی، کرومی، فنلی، اسیدی و قلیایی است که هر خط پس از انجام‌دادن پیش‌تصفیه وارد تانک متعادل‌ساز می‌شود و سپس انعقاد و لخته‌سازی روی آن انجام می‌گیرد. خروجی این فرایند در نهایت به واحدهای فیلترهای شنی تحت فشار و فیلترهای کربن فعال منتقل می‌شود. فاضلاب استفاده‌شده در این تحقیق از خط ورودی به فرایند انعقاد و لخته‌سازی تصفیه‌خانه گرفته شده است و آنالیز آن طبق جدول ۱ است. منعقدکننده استفاده شده از نوع کلرورفریک با درصد خلوص ۴۱ درصد و کمک منعقدکننده مصرفی، پلی‌الکترولایت نوع پروکلیر<sup>۱</sup> 8723 محصول شرکت هنکل آلمان است.

منعقدکننده و پی‌اچ بوده است. نتیجه این مطالعه نشان داد کلرور فریک به دلیل بالاترین درصد حذف فلزات سنگین و پایین‌ترین حجم لجن تولیدشده، بهترین ماده منعقدکننده برای این فاضلاب‌هاست که با غلظت ماده منعقدکننده کلرور فریک برابر ۳ میلی‌گرم در لیتر و کمک منعقدکننده آهک برابر ۲/۵ میلی‌گرم در لیتر، ۹۷ درصد فلزات سنگین حذف شد [۳].

در تحقیق حاضر، به مدل‌سازی و بهینه‌سازی فرایند انعقاد و لخته‌سازی به‌منظور حذف سی‌او‌دی از فاضلاب تصفیه‌خانه گالوانیزه مجتمع فولاد مبارکه با استفاده از مدل طراحی آزمایش سطح پاسخ پرداخته می‌شود. متغیرهای تأثیرگذار در این تحقیق چهار عامل غلظت منعقدکننده (کلرورفریک)، غلظت کمک منعقدکننده (پلی‌الکترولایت)، پی‌اچ و کدورت اولیه در نظر گرفته شده است که در مرحله بهینه‌سازی مقدار بهینه هر یک مشخص می‌شود.

جدول ۱. آنالیز فاضلاب شیمیایی مجتمع فولاد مبارکه ورودی به واحد انعقاد و لخته‌سازی

| ردیف | آلاینده                  | محدوده تغییرات در فاضلاب (میلی‌گرم بر لیتر) | میانگین (میلی‌گرم بر لیتر) | استاندارد خروجی به آب‌های سطحی (میلی‌گرم بر لیتر) |
|------|--------------------------|---|----------------------------|---|
| ۱    | کدورت                    | ۵۰-۱۲۰                                      | ۸۵                         | ۵۰  |
| ۲    | اکسیژن مورد نیاز شیمیایی | ۱۵۰-۴۰۰                                     | ۲۷۵                        | ۶۰  |
| ۳    | سولفات                   | < ۱۰  | -                          | ۴۰۰   |
| ۴    | غلظت یون آهن             | ۳-۸   | ۵/۵                        | ۳   |
| ۵    | کروم                     | ۰/۶-۳/۴                                     | ۲                          | ۲   |
| ۶    | کادمیوم                  | ۰/۰۲-۰/۰۴                                   | ۰/۰۳                       | ۰/۱   |
| ۷    | روی                      | ۰/۲-۰/۴۲                                    | ۰/۳۱                       | ۱   |
| ۸    | سرب                      | ۰/۲-۱/۴                                     | ۰/۸                        | ۲   |
| ۹    | منیزیم                   | ۰/۵-۴                                       | ۲/۳                        | ۱۰۰   |
| ۱۰   | نیکل                     | بسیار ناچیز                                 | -                          | ۲   |
| ۱۱   | کلسیم                    | ۲-۱۰  | ۶                          | ۷۵  |
| ۱۲   | آلومینیوم                | بسیار ناچیز                                 | -                          | ۵   |

## ۲.۲. روش آزمایش

### ۱.۲.۲. آزمایش جارست

آن به مدت ۲۰ دقیقه با سرعت ۲۰ دور بر دقیقه مخلوط می‌شود. سپس ظروف از زیر دستگاه آزمایش جار خارج می‌شود و مدت ۳۰ دقیقه به‌منظور ته‌نشینی، ساکن نگه داشته می‌شود. پس از مرحله ته‌نشینی، میزان مورد نیاز نمونه از حدود ۲ سانتی‌متری سطح ظرف از طریق سرنگ برداشته می‌شود و به‌منظور انجام‌دادن آزمایش سی‌او‌دی استفاده می‌شود [۲۱].

آنالیز جارست براساس روش استاندارد آ‌اس‌تی ام<sup>۲</sup> ۲۰۳۵ انجام گرفته است. آزمایش جار در واقع مدلی کوچک از واحدهای اختلاط سریع، انعقاد و ته‌نشینی است. براین‌اساس، از بشرهای ۱ لیتری استاندارد به‌عنوان ظروف آزمایش استفاده شده است. نمونه‌ها براساس برنامه آزمایش ابتدا به مدت دو دقیقه با سرعت ۸۰ تا ۱۲۰ دور بر دقیقه و پس از

1. Petrocroyl

2. ASTM

### ۲.۲.۲. آنالیز سی او دی

آنالیز میزان اکسیژن واکنش شیمیایی مورد نیاز مطابق دستورالعمل 5220 C کتاب روش‌های استاندارد انجام گرفته است. این روش آنالیز سی او دی به نام روش تقطیر برگشتی است [۲۲].

### ۲.۲.۳. طراحی آزمایش

آزمایش‌های طراحی شده در این تحقیق از طریق نرم‌افزار دیزاین اکسپرت<sup>۱</sup> و به روش طراحی مرکب مرکزی (سی سی دی)<sup>۲</sup> انجام گرفته است. روش «طراحی مرکب مرکزی» یکی از روش‌های استاندارد سطح پاسخ است. در این روش، هر فاکتور در پنج سطح تعریف می‌شود و سه گروه نقطه طراحی شامل نقاط فاکتوریل، محوری و مرکزی دارد. نقاط فاکتوریل در بردارنده بازه اصلی تغییرات یک متغیر (عامل) است و کاربر آن را به مدل می‌دهد (برای مثال برای متغیر پی اچ بازه ۱۰/۲۵ تا ۱۱/۷۵). نقاط محوری در بردارنده نقاط محدودی خارج از بازه اصلی تغییرات عامل مورد نظر است و از طریق مدل و با در نظر گرفتن ضریب «آلفا» مشخص می‌شود (برای مثال برای متغیر پی اچ بازه ۹/۵ تا ۱۲/۵). نقاط مرکزی نیز برابر میانگین کمترین و بیشترین مقدار هر عامل است (برای مثال برای متغیر پی اچ مقدار ۱۱). در روش طراحی مرکب مرکزی تعداد آزمایش‌ها طبق رابطه ۱ محاسبه می‌شود [۲۳].

$$N = K^2 + 2K + C_p \quad (1)$$

در رابطه بالا  $K$  تعداد فاکتورها و  $C_p$  بیانگر تعداد نقاط تکرار است.

در روش طراحی آزمایش‌ها به روش سطح پاسخ، به دلیل وجود متغیرهای فراوان، داده‌ها به حالت کدشده یا نرمال شده تبدیل می‌شوند. این کار موجب می‌شود مقایسه عوامل با هم به راحتی انجام گیرد. کدسازی داده‌ها طبق رابطه ۲ است [۲۳].

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

که در آن  $x_i$  مقدار کدشده متناظر متغیر  $Z_i$ ،  $Z_0$  مقدار میانگین متغیر و  $Z_{max}$  و  $Z_{min}$  به ترتیب کران بالا و پایین بازه اصلی تغییرات است؛ برای مثال، برای متغیر پی اچ مقدار کران پایین و بالا برابر ۱۰/۲۵ تا ۱۱/۷۵،  $Z_0$  برابر ۱۱ است. در نتیجه، ۱۰/۲۵، ۱۱ و ۱۱/۷۵ به ترتیب به مقادیر کدشده ۰، ۱ و +۱ تبدیل می‌شوند و بقیه اعداد نیز به صورت متناسب در این بازه قرار می‌گیرند.

با توجه به اینکه در این مطالعه از نمونه‌های واقعی فاضلاب تصفیه‌خانه استفاده می‌شود، عوامل اثرگذار بر بهینه‌سازی فرایند با توجه به تحقیقات قبلی (اشاره شده در بخش مقدمه) و شرایط بهره‌برداری تصفیه‌خانه انتخاب می‌شود. در نتیجه، عواملی مانند دما و زمان لخته‌سازی که پاتل و واشی (۲۰۱۰) در بهینه‌سازی فرایند استفاده کرده‌اند، در این تحقیق به دلیل نبود امکان کنترل و تغییر آن در شرایط بهره‌برداری تصفیه‌خانه، در نظر گرفته نمی‌شود. در مطالعات قبلی نیز سه عامل غلظت منعقدکننده، کمک منعقدکننده و پی اچ به عنوان عوامل اصلی بهینه‌سازی فرایند لحاظ شده است [۳، ۱۶، ۱۷، ۱۸ و ۲۰]. براساس توضیحات مذکور، در این مطالعه عوامل اصلی فرایند شامل چهار فاکتور غلظت منعقدکننده (A)، غلظت کمک منعقدکننده (B)، پی اچ (C) و کدورت اولیه (D) در نظر گرفته می‌شود.

در جدول ۲، چهار عامل مذکور به همراه بازه تغییرات هر یک نشان داده می‌شود. مقدار آلفا براساس پارامتر قابلیت چرخش‌پذیری<sup>۳</sup> مدل سی سی دی تعیین شده است. چرخش‌پذیری یک مبنای منطقی برای انتخاب طرح سطح پاسخ است. از آنجاکه هدف آراس ام بهینه‌سازی است و مکان بهینه قبل از آزمایش نامشخص است، منطقی است طرحی به کار رود که دقت تخمین یکسان را در همه جهات ایجاد کند؛ بنابراین، طراحی سی سی دی با گزینه پارامتر آلفا چرخش‌پذیر می‌شود. مقدار آلفا به تعداد نقاط در بخش فاکتوریل طراحی بستگی دارد و برابر با ریشه چهارم این تعداد نقاط است. در این تحقیق، آلفا به دلیل داشتن ۱۶ نقطه فاکتوریل برابر ۲ در نظر گرفته شده است [۲۳]. شایان ذکر است بازه تغییرات عوامل پس از آزمایش‌های اولیه انتخاب شده است.

### ۴.۲.۲. آنالیز واریانس

در طراحی آزمایش، به دلیل اینکه فقط بخشی از آزمایش‌ها انجام می‌گیرد، باید از نتایج اطمینان یافت. آنالیز واریانس روش استاندارد آماری است که داده‌ها را از نظر کمی و کیفی بررسی می‌کند و میزان معنی‌دار بودن تأثیر هر فاکتور را بر پاسخ مورد نظر بررسی می‌کند. در این روش، تحلیل اطلاعات به صورت مستقیم انجام نمی‌گیرد و فقط با تحلیل و بررسی تغییرات داده‌ها، درجه اطمینان محاسبه می‌شود. هدف اصلی از این آنالیز، استخراج واریانس هر یک از فاکتورها نسبت به

1. Design Expert 8  
2. Central Composite Design (CCD)  
3. Rotatability

جدول ۲. عوامل در نظر گرفته شده در آزمایش و بازه تغییرات آنها

| متغیر (عامل)                          | علامت اختصاری | واحد                     | بازه اصلی تغییرات |            | بازه تغییرات با در نظر گرفتن ضریب آلفا برابر ۲ |            |
|---------------------------------------|---------------|--------------------------|-------------------|------------|--|------------|
|                                       |               |                          | کران بالا         | کران پایین | کران بالا                                      | کران پایین |
| غلظت منعقدکننده (کلورفریک)            | A             | میلی گرم بر لیتر<br>mg/L | ۴۵۰               | ۶۵۰        | ۷۵۰  | ۳۵۰        |
| غلظت کمک منعقدکننده (پلی الکترو لایت) | B             | میلی گرم بر لیتر<br>mg/L | ۰/۱               | ۰/۲        | ۰/۲۵   | ۰/۰۵       |
| پی ایچ                                | C             | -                        | ۱۰/۲۵             | ۱۱/۷۵      | ۱۲/۵   | ۹/۵        |
| کدورت ورودی                           | D             | میلی گرم بر لیتر<br>mg/L | ۶۰                | ۱۰۰        | ۱۲۰  | ۴۰         |

$$(۳) \quad \text{مقدار حذف سی او دی} = ۴۶/۴۹۸۷ - ۲/۳۸۱۲۶A - ۰/۰۳۷۰۵۷۵B + ۰/۹۰۹۴۷۷C - ۱/۷۹۷۹۰D - ۲/۰۳۰۱۸A * A - ۴/۴۰۹۰۵B * B - ۹/۳۱۱۹۳C * C - ۸/۷۰۷۷۷D * D - ۰/۹۰۱۴۴۹A * B + ۰/۴۷۰۱۶۵A * C - ۲/۲۹۴۲۶A * D + ۱/۰۹۷۸۳B * C + ۲/۷۵۶۴۸B * D + ۰/۱۸۲۹۶۰C * D$$

نتایج تحلیل واریانس داده‌های این آزمایش در جدول ۴ نشان داده می‌شود. طبق این جدول، مقدار عدد اف<sup>۳</sup> مدل برابر ۳۸/۷۸ است و تأکید دارد مدل معنی‌دار است و فقط ۰/۰۱ درصد احتمال دارد مقدار بالای آن مربوط به نویز باشد؛ به عبارت دیگر، بالابودن این ضریب به دلیل تأثیر بالای عوامل کنترل‌پذیر (سیگنال) نسبت به عوامل کنترل‌ناپذیر (نویز) در مدل است. مقدار عدد اف مدل وقتی قابل قبول است که از مقدار اف بحرانی بیشتر باشد که در این مدل با توجه به درجه آزادی ۱۴ مدل، اف بحرانی برابر ۴/۶ است. اگر مقدار عدد پی<sup>۴</sup> هر پارامتر کمتر از ۰/۰۵ باشد، پارامتر مورد نظر بر پاسخ مورد نظر تأثیر فراوان دارد و اگر مقدار این متغیر از ۰/۱ بیشتر شود، پارامتر مذکور بر پاسخ تأثیر چندانی ندارد. با کاهش تعداد پارامترهایی که معنی‌دار نیستند، اما در مدل زیادند، مدل بهتری حاصل می‌شود. اینکه نبود برازش معنی‌دار نیست، نشان می‌دهد مدل به خوبی برازش شده است [۲۳].

واریانس کل است. نتایج آنالیز واریانس شامل درجه آزادی هر یک از فاکتورها<sup>۱</sup> واریانس هر فاکتور، مجموع مربعات، نسبت واریانس هر فاکتور به واریانس خطا و درصد تأثیر هر فاکتور بر تابع هدف است. پس از تحلیل واریانس، امکان تعیین ضریب برازش و نیز نسبت سیگنال به نویز فراهم می‌شود. ضریب برازش عددی در بازه صفر و یک است و نشان‌دهنده میزان موفقیت مدل در برازش داده‌هاست. نسبت سیگنال به نویز نیز نشان دهنده حساسیت مدل به عوامل غیرقابل کنترل است و مقادیر بالاتر آن کفایت هرچه بیشتر مدل را نشان می‌دهد. در حالت کلی، مقدار سیگنال به نویز بالاتر از ۴ قابل قبول است [۲۳].

### ۳. نتایج و بحث

#### ۳.۱.۳ مدل سازی

آزمایش‌های طراحی شده از طریق نرم‌افزار در جدول ۳ نشان داده می‌شود. همان‌طور که در این جدول مشخص است، براساس داده‌های ورودی، نرم‌افزار سی سری آزمایش طراحی کرده است که از این تعداد شش آزمایش تکراری است. همچنین در جدول ۳، درصد حذف سی او دی هر یک از نمونه‌ها به عنوان داده ورودی مدل ارائه می‌شود که پس از انجام دادن آزمایش‌های طراحی شده و تعیین میزان سی او دی هر یک، به دست آمده است. در این مرحله، مدل تحلیل‌های آماری انجام داد تا مشخص شود داده‌ها از چه نوع منحنی رگرسیونی تبعیت می‌کنند. در این تحقیق، مدل مرتبه دوم<sup>۲</sup> داده‌ها را به شکل مناسب‌تری برازش می‌کند.

معادله رگرسیونی حاصل از این برازش مطابق رابطه ۳ است که در آن مقادیر متغیرها باید براساس رابطه ۲ به صورت کد شده وارد شود.

1. Degree of Freedom (DOF)
2. Quadratic
3. F-value
4. P-value

جدول ۳. آزمایش‌های طراحی‌شده از طریق نرم‌افزار به همراه پاسخ درصد حذف سی او دی

| شماره آزمایش | فاکتور A: غلظت کلروفریک (mg/L) | فاکتور B: غلظت پلی‌الکترولایت (mg/L) | فاکتور C: pH | فاکتور D: کدورت ورودی (NTU) | پاسخ: درصد حذف %COD |
|--------------|--------------------------------|--------------------------------------|--------------|-----------------------------|---------------------|
| ۱            | ۴۵۰                            | ۰/۱۰                                 | ۱۰/۲۵        | ۶۰                          | ۱۰/۵۸               |
| ۲            | ۶۵۰                            | ۰/۱۰                                 | ۱۰/۲۵        | ۶۰                          | ۲۷/۵۰               |
| ۳            | ۴۵۰                            | ۰/۲۰                                 | ۱۰/۲۵        | ۶۰                          | ۲۷/۵۰               |
| ۴            | ۶۵۰                            | ۰/۲۰                                 | ۱۰/۲۵        | ۶۰                          | ۹/۴۱                |
| ۵            | ۴۵۰                            | ۰/۱۰                                 | ۱۱/۷۵        | ۶۰                          | ۳۰/۷۷               |
| ۶            | ۶۵۰                            | ۰/۱۰                                 | ۱۱/۷۵        | ۶۰                          | ۲۷/۶۹               |
| ۷            | ۴۵۰                            | ۰/۲۰                                 | ۱۱/۷۵        | ۶۰                          | ۱۰/۷۷               |
| ۸            | ۶۵۰                            | ۰/۲۰                                 | ۱۱/۷۵        | ۶۰                          | ۲۷/۵۰               |
| ۹            | ۴۵۰                            | ۰/۱۰                                 | ۱۰/۲۵        | ۱۰۰                         | ۱۸/۴۶               |
| ۱۰           | ۶۵۰                            | ۰/۱۰                                 | ۱۰/۲۵        | ۱۰۰                         | ۹/۲۳                |
| ۱۱           | ۴۵۰                            | ۰/۲۰                                 | ۱۰/۲۵        | ۱۰۰                         | ۱۰/۰۰               |
| ۱۲           | ۶۵۰                            | ۰/۲۰                                 | ۱۰/۲۵        | ۱۰۰                         | ۱۰/۷۷               |
| ۱۳           | ۴۵۰                            | ۰/۱۰                                 | ۱۱/۷۵        | ۱۰۰                         | ۱۲/۴۸               |
| ۱۴           | ۶۵۰                            | ۰/۱۰                                 | ۱۱/۷۵        | ۱۰۰                         | ۱۹/۲۳               |
| ۱۵           | ۴۵۰                            | ۰/۲۰                                 | ۱۱/۷۵        | ۱۰۰                         | ۳۱/۹۴               |
| ۱۶           | ۶۵۰                            | ۰/۲۰                                 | ۱۱/۷۵        | ۱۰۰                         | ۱۹/۴۴               |
| ۱۷           | ۵۵۰                            | ۰/۱۵                                 | ۱۱           | ۸۰                          | ۴۲/۰۰               |
| ۱۸           | ۵۵۰                            | ۰/۱۵                                 | ۱۱           | ۸۰                          | ۴۵/۰۵               |
| ۱۹           | ۵۵۰                            | ۰/۱۵                                 | ۱۱           | ۸۰                          | ۴۶/۱۰               |
| ۲۰           | ۵۵۰                            | ۰/۱۵                                 | ۱۱           | ۸۰                          | ۴۹/۹۸               |
| ۲۱           | ۳۵۰                            | ۰/۱۵                                 | ۱۱           | ۸۰                          | ۵۷/۱۴               |
| ۲۲           | ۷۵۰                            | ۰/۱۵                                 | ۱۱           | ۸۰                          | ۳۴/۴۴               |
| ۲۳           | ۵۵۰                            | ۰/۰۵                                 | ۱۱           | ۸۰                          | ۳۶/۸۴               |
| ۲۴           | ۵۵۰                            | ۰/۲۵                                 | ۱۱           | ۸۰                          | ۳۵/۷۱               |
| ۲۵           | ۵۵۰                            | ۰/۱۵                                 | ۹/۵          | ۸۰                          | ۲۲/۸۰               |
| ۲۶           | ۵۵۰                            | ۰/۱۵                                 | ۱۲/۵         | ۸۰                          | ۱۰/۵۲               |
| ۲۷           | ۵۵۰                            | ۰/۱۵                                 | ۱۱           | ۴۰                          | ۱۷/۳۳               |
| ۲۸           | ۵۵۰                            | ۰/۱۵                                 | ۱۱           | ۱۲۰                         | ۲۰/۸۳               |
| ۲۹           | ۵۵۰                            | ۰/۱۵                                 | ۱۱           | ۸۰                          | ۴۷/۳۷               |
| ۳۰           | ۵۵۰                            | ۰/۱۵                                 | ۱۱           | ۸۰                          | ۴۹/۱۲               |

کلی نسبت بزرگ‌تر از ۴ مطلوب است [۲۳]. پارامتر مذکور در این تحقیق ۲۱/۴۳۹ است که کفایت مدل را نشان می‌دهد.

در جدول ۵، خصوصیات آماری مدل ارائه می‌شود. در این جدول ضریب همبستگی<sup>۱</sup>، ضریب همبستگی اصلاح‌شده<sup>۲</sup> و ضریب همبستگی پیش‌بینی‌کننده<sup>۳</sup> است. در یک تحلیل آماری مناسب، ضریب همبستگی بهتر است نزدیک به ۱ باشد و ضرایب همبستگی اصلاح‌شده و پیش‌بینی‌کننده اختلافی بیش از ۰/۲ نداشته باشند. همچنین پارامتر دقت کافی<sup>۴</sup>، نسبت سیگنال به نویز را اندازه‌گیری می‌کند که در حالت

1. R-squared
2. Adj R-Squared
3. Pred R-Squared
4. Adeq Precision

جدول ۴. آزمایش های طراحی شده از طریق نرم افزار به همراه پاسخ درصد حذف سی او دی

| ترم                | مجموع مربعات (SS) | درجه آزادی (DOF) | میانگین مربعات (MS) | F-Value | p-value Prob > F |
|--------------------|-------------------|------------------|---------------------|---------|------------------|
| Model              | ۱۰۵۲/۹۵           | ۱۴               | ۷۵/۲۱۱              | ۳۸/۷۸   | <۰/۰۰۰۱          |
| A-FeCl3            | ۰/۶۷              | ۱                | ۰/۶۷                | ۳۲/۳۱   | <۰/۰۰۰۱          |
| B-Poly Electrolyte | ۲/۶۷              | ۱                | ۲/۶۷                | ۹/۵۶    | ۰/۰۰۶۰           |
| C-pH               | ۲/۰۴              | ۱                | ۲/۰۴                | ۱۵/۱۶   | <۰/۰۰۰۱          |
| D-Input turbidity  | ۱۶/۳۳             | ۱                | ۱۶/۳۳               | ۲۲/۰۲   | <۰/۰۰۰۱          |
| AB                 | ۹/۰۰              | ۱                | ۹/۰۰                | ۶/۸۸    | ۰/۰۰۷۲           |
| AC                 | ۴۵/۶۹             | ۱                | ۴۵/۶۹               | ۹/۸۵    | <۰/۰۰۰۱          |
| AD                 | ۳/۴۲              | ۱                | ۳/۴۲                | ۷/۵۰    | ۰/۰۰۶۹           |
| BC                 | ۳۳/۶۴             | ۱                | ۳۳/۶۴               | ۵/۶۸    | ۰/۰۰۰۴           |
| BD                 | ۲۶/۵۲             | ۱                | ۲۶/۵۲               | ۶/۹۵    | ۰/۰۰۵۱           |
| CD                 | ۶۰/۰۶             | ۱                | ۶۰/۰۶               | ۹/۷۶    | ۰/۰۰۲۱           |
| A2                 | ۱/۱۵              | ۱                | ۱/۱۵                | ۱۱/۵۸   | ۰/۰۰۳۵           |
| B2                 | ۰/۱               | ۱                | ۰/۱                 | ۴/۰۸    | ۰/۰۰۰۷           |
| C2                 | ۷/۳۲              | ۱                | ۷/۳۲                | ۱۰/۵۶   | ۰/۰۰۰۶           |
| D2                 | ۴۳۶/۳۴            | ۱                | ۴۳۶/۳۴              | ۹/۵۹    | ۰/۰۰۰۲           |
| Lack of Fit        | ۱۸۲/۸۸            | ۱۰               | ۱۸۲/۸۸              |         |                  |
| Cor Total          | ۱۲۳۵/۸۴           | ۳۰               |                     |         |                  |

جدول ۵. خصوصیات آماری مدل به منظور پاسخ سی او دی نهایی

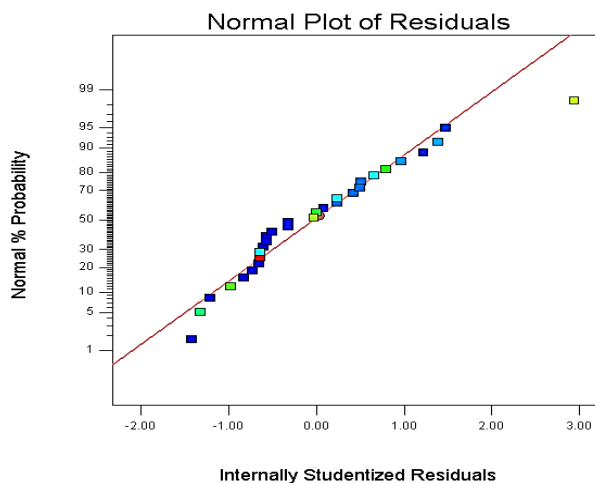
| نسبت سیگنال به نویز | ضریب همبستگی پیش بینی کننده | ضریب همبستگی اصلاح شده | ضریب همبستگی |
|---------------------|-----------------------------|------------------------|--------------|
| ۲۱/۴۳۹              | ۰/۸۴۸۸                      | ۰/۹۰۹۸                 | ۰/۹۳۹۸       |

از توزیع نرمال است. در صورت صحت مدل، نقاط باید تقریباً یک خط مورب را دنبال کنند که این مسئله در شکل مشخص است.

یکی از راه های ارزیابی صحت مدل بررسی نمودار احتمال نرمال باقیمانده هاست که در شکل ۱ نشان داده می شود. این نمودار بیانگر میزان پیروی باقیمانده های درصد حذف سی او دی

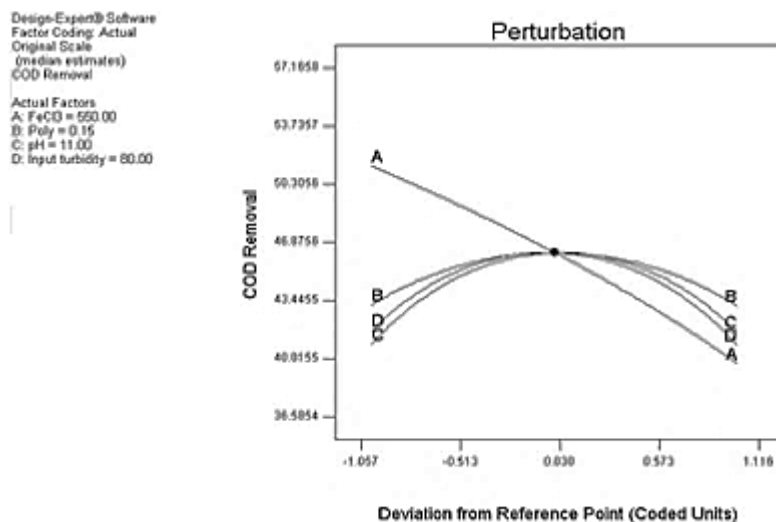
Design-Expert® Software  
Factor Coding: Actual  
Original Scale  
(median estimates)  
COD Removal

Actual Factors  
A: FeCl3 = 550.00  
B: Poly = 0.15  
C: pH = 11.00  
D: Input turbidity = 80.00



شکل ۱. نمودار احتمال نرمال باقیمانده درصد حذف سی او دی

یک خط تقریباً افقی، حساسیت‌نداشتن پاسخ به تغییرات آن عامل را نشان می‌دهد [۲۳]. همان‌طور که در شکل ۲ مشخص است، غلظت منعقدکننده (A) با بیشترین شیب خط حساس‌ترین عامل و پلی‌الکترولیت (B) با کمترین انحناء، کم‌تأثیرترین عامل بر درصد حذف سی او دی است.



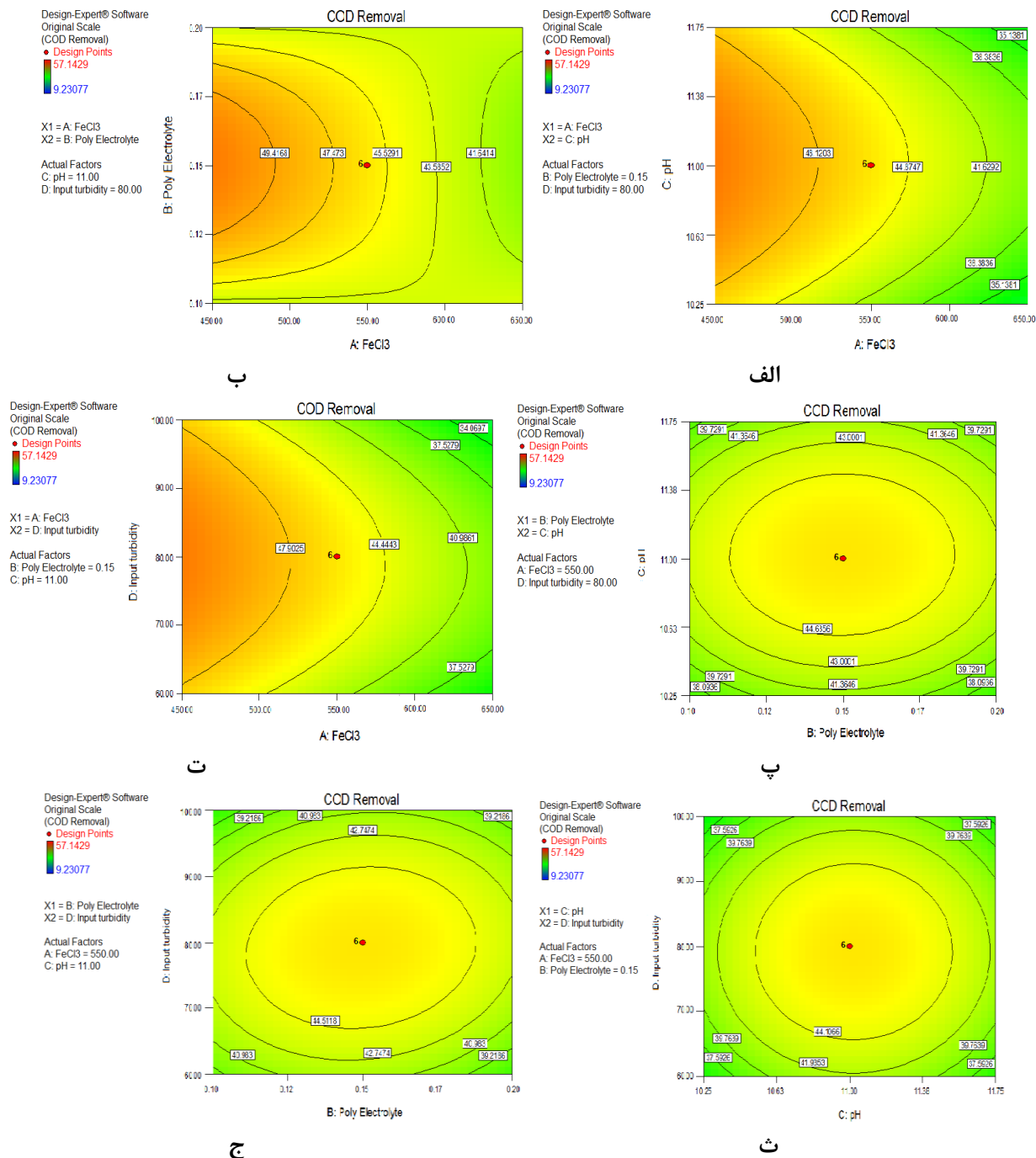
شکل ۲. نمودار آشفتگی به منظور پاسخ درصد حذف سی او دی

محور عامل B است؛ بنابراین، تأثیر کم این عامل - در مقابل عامل A - بر حذف سی او دی تأیید می‌شود. همچنین، تغییرات غلظت کلرور فریک تأثیر مستقیمی بر پاسخ مدل دارد. براساس نتایج این نمودار میزان برهم‌کنش دو عامل A و B کم ارزیابی می‌شود. همچنین، در شکل‌های ۳-الف و ۳-ب عامل کلرور فریک نسبت دو عامل دیگر تأثیر بیشتری دارد. بیشترین برهم‌کنش عوامل مربوط به شکل ۳-پ، ت و ج است که به صورت کانتورهای بسته وابستگی عوامل B، C و D را در رسیدن به نقطه‌ای بهینه برای حذف سی او دی نشان می‌دهد.

در شکل ۲، نمودار آشفتگی مدل نشان داده شده است. نمودار آشفتگی مقایسه آثار همه عوامل را در نقطه‌ای مشخص در فضای طراحی آسان می‌کند. با جابه‌جایی یک عامل در دامنه تغییرات آن، زمانی که تمام عوامل دیگر ثابت در نظر گرفته شده‌اند، مقدار پاسخ تغییر می‌کند. شیب تند یا انحناء در این نمودار نشان‌دهنده حساسیت پاسخ به عامل مورد نظر است و

در شکل ۳، نمودارهای سطح پاسخ به صورت کانتورهای دوبعدی دوبعدی عامل‌ها نشان داده می‌شود. این نمودارها نمایانگر نحوه اثرگذاری هم‌زمان و برهم‌کنش عوامل بر پاسخ درصد حذف سی او دی نیز است. در کنار هر شکل، مقادیر ثابت فرض شده برای دو عامل دیگر نیز آمده است. در تحلیلی کلی، اگر خطوط هم‌تراز موازی یک محور باشد، عامل مربوطه کمترین تأثیر را بر حذف سی او دی دارد و بالعکس هرچه امتداد خطوط هم‌تراز نسبت به یک محور عمودتر باشد، عامل مربوطه بیشترین تأثیر را بر پاسخ دارد؛ برای مثال، شکل ۳-ب تأثیر دو عامل A (غلظت کلرور فریک) و B (غلظت پلی‌الکترولیت) را نشان می‌دهد. خطوط کانتور به‌طور عمده موازی





شکل ۳. سطح پاسخ به صورت کانتورهای دوبعدی اثر برهم‌کنش دوبه‌دوی عامل‌ها بر پاسخ

### ۲.۳. بهینه‌سازی

الگوریتم استفاده‌شده در نرم‌افزار دیزاین اکسپرت<sup>۱</sup> به‌منظور انجام‌دادن عمل بهینه‌سازی الگوریتم «کانتور»<sup>۲</sup> بوده است. در این الگوریتم، هدف مطلوب برای هر یک از فاکتورها و پاسخ شامل حداقل کردن، حداکثر کردن و قرارگرفتن در بازه

مشخص می‌شود. سپس بازه حداقل و حداکثر هر پارامتر و وزن اهمیت آن براساس درجه اهمیت تعریف‌شده از ۱ تا ۵ تعیین می‌شود. براساس موارد تعریف‌شده، نرم‌افزار تابع کلی مطلوبیت را- که دربردارنده همه پارامترهای ذکرشده است- مشخص می‌کند، به‌طوری‌که هدف بهینه‌سازی حداکثر کردن این تابع (در بازه ۰ تا ۱) است. تعیین مقادیر بهینه در این الگوریتم براساس روش جست‌وجوی مستقیم است که از یک

1. Design Expert  
2. CONVERT

مقایسه نتایج این پژوهش با پژوهش‌های پیشین در جدول ۸ مشاهده می‌شود. در این جدول، نتایج مطالعات از جنبه‌های مختلف شامل نوع منعقدکننده، نوع آلاینده و فاضلاب مورد مطالعه، فاکتورهای مؤثر، درصد حذف، روش طراحی آزمایش‌ها، اهمیت تأثیر فاکتورها و حالت بهینه مقایسه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، در بیشتر مطالعات سه عامل ماده منعقدکننده، کمک منعقدکننده (لخته‌ساز) و پی اچ به‌عنوان عوامل اصلی در نظر گرفته شده است. درصد حذف آلاینده‌ها در مطالعات از ۱۶ درصد تا ۹۸ درصد برای حالت‌های مختلف متغیر بوده است. در برخی مطالعات از روش بررسی جداگانه تأثیر هر عامل بر پاسخ استفاده شده است؛ بنابراین، امکان تعیین تأثیر برهم‌کنش عوامل مختلف و میزان اهمیت تأثیر آن‌ها بر هم وجود نداشته است. در موارد بررسی شده، غلظت منعقدکننده و پی اچ جزء عوامل اثرگذار بوده و غلظت کمک منعقدکننده تأثیر کمتری بر پاسخ داشته است.

نقطه تصادفی شروع می‌شود و جست‌وجو به سمت مقدار حداکثر را با تندترین شیب موجود انجام می‌دهد [۲۱]. متغیرهای مؤثر بر بهینه‌سازی فرایند انعقاد و لخته‌سازی شامل چهار متغیر غلظت منعقدکننده، غلظت کمک منعقدکننده، پی اچ و غلظت کدورت ورودی است. سناریوی انتخابی به‌منظور بهینه‌سازی فرایند انعقاد و لخته‌سازی طبق جدول ۶، سه هدف (مینیمم‌کردن) و دو قید (قرارگرفتن در بازه) است. در این سناریو، برای متغیرهای غلظت منعقدکننده (کلوروفریک) و غلظت کمک منعقدکننده (پلی الکترولیت) هدف حداقل کردن میزان مصرف این مواد است و درجه اهمیت آن‌ها به ترتیب سه و چهار در نظر گرفته شده است. برای دو متغیر پی اچ و غلظت کدورت ورودی قید قرارگرفتن در بازه انتخاب شده است. همچنین، پاسخ درصد حذف سی او دی با هدف ماکزیمم‌کردن با بیشترین درجه اهمیت (۵) در مدل در نظر گرفته شده است. در جدول ۷، بهینه‌ترین حالت براساس سناریوی انتخابی از طریق نرم‌افزار به‌همراه مقدار تابع مطلوبیت حداکثر برابر ۰/۷۹ به‌دست آمده است.

جدول ۶. سناریوی انتخابی به‌منظور بهینه‌سازی فرایند انعقاد و لخته‌سازی

| فاکتور                            | هدف               | حد پایین | حد بالا | درجه اهمیت |
|-----------------------------------|-------------------|----------|---------|------------|
| منعقدکننده (کلوروفریک): A         | مینیمم‌کردن       | ۳۵۰      | ۷۵۰     | ۳          |
| کمک منعقدکننده (پلی الکترولیت): B | مینیمم‌کردن       | ۰/۰۵     | ۰/۲۵    | ۴          |
| C: pH                             | قرارگرفتن در بازه | ۹/۵      | ۱۲/۵    | ۱          |
| D: کدورت ورودی                    | قرارگرفتن در بازه | ۴۰       | ۱۲۰     | ۲          |
| درصد حذف COD                      | ماکزیمم‌کردن      | ۴۰       | ۶۰      | ۵          |

جدول ۷. حالت بهینه پیشنهادی براساس سناریوی انتخابی

| ردیف | غلظت منعقدکننده (mg/L) | غلظت کمک منعقدکننده (mg/L) | pH    | کدورت اولیه (NTU) | درصد حذف COD | تابع مطلوبیت |
|------|------------------------|----------------------------|-------|-------------------|--------------|--------------|
| ۱    | ۳۵۵                    | ۰/۱۴                       | ۱۱/۰۲ | ۷۹                | ۵۴/۶         | ۰/۷۹         |

#### ۴. جمع بندی

پیش‌بینی شرایط مختلف بهره‌برداری بدون انجام‌دادن آزمایش فراهم می‌شود. همچنین از میان چهار عامل مذکور، عامل غلظت منعقدکننده بیشترین تأثیر را بر درصد حذف سی او دی فاضلاب دارد. در مرحله بهینه‌سازی نیز مقدار بهینه متغیرهای مورد بررسی با هدف حداکثرکردن میزان حذف سی او دی و حداقل کردن میزان مواد مصرفی، بیانگر مصرف ۳۵۰ میلی‌گرم بر لیتر کلوروفریک به‌عنوان منعقدکننده، ۰/۱۴ میلی‌گرم بر لیتر پلی الکترولیت به‌عنوان کمک‌منعقدکننده در پی اچ برابر ۱۱ و کدورت ورودی ۷۹ ان تی یو است.

در این تحقیق، به مدل‌سازی و بهینه‌سازی فرایند انعقاد و لخته‌سازی فاضلاب تصفیه‌خانه گالوانیزه مجتمع فولاد مبارکه به‌منظور حذف سی او دی از فاضلاب این واحد پرداخته شد. متغیرهای بررسی شده در این تحقیق چهار عامل غلظت منعقدکننده، غلظت کمک‌منعقدکننده، پی اچ و کدورت ورودی بوده است که آزمایش‌های مربوط به آن براساس روش سطح پاسخ طراحی شد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد با ساخت مدل رگرسیونی مرتبه دوم از فرایند انعقاد و لخته‌سازی، امکان

و توسعه، تصفیه خانه و آزمایشگاه مرکزی مجتمع فولاد مبارکه اصفهان سپاسگزاری می شود.

### ۵. تشکر و قدردانی

بدین وسیله از نظرهای موثر داوران محترم در ارتقای کیفی پژوهش و نیز همکاری و تلاش های کارشناسان واحد تحقیق

جدول ۸. مقایسه با نتایج پژوهش های دیگر

| محققان                      | منعقدکننده  | نوع آلاینده                  | فاکتورهای مؤثر                                       | میزان حذف   | روش طراحی آزمایش ها                | اهمیت تأثیر فاکتورها  | حالت بهینه   |
|-----------------------------|---|------------------------------|--|---|------------------------------------|---|--|
| پاتل و واشی (۲۰۱۰)          | کیتوسان و پودر ذرت  | رنگ در فاضلاب صنعت نساجی     | دما، غلظت منعقدکننده، زمان لخته سازی و pH            | ۸۱ درصد کیتوسان و ۷۴ درصد پودر ذرت  | بررسی تأثیر جداگانه هر عامل        | بررسی نشده است  | pH=4، دوز منعقدکننده ۲۵ و زمان لخته سازی ۶۰ دقیقه و T=340K               |
| ترابیان و همکاران (۱۳۸۴)    | بی سولفیت سدیم و منعقدکننده کلرور فریک و آهک  | فلزات سنگین و فسفر           | منعقدکننده و کمک منعقدکننده و pH                     | کروم و قلع و آهن ۹۱ درصد، فسفر ۵۵ درصد  | بررسی تأثیر جداگانه هر عامل        | بررسی نشده است  | FeCl3=5mg/L, CaO=2.5mg/L, pH=8   |
| عبادی و همکاران (۱۳۹۱)      | پلی آلومینیوم کلراید PAC منعقدکننده و Actipol A-401 کمک منعقدکننده                  | TOC در فاضلاب صنعت غذایی     | منعقدکننده، غلظت کمک منعقدکننده و pH                 | ۱۶ درصد حذف TOC   | روش سطح پاسخ                       | بررسی نشده است  | PAC=0.4mg/L, Actipol=6mg/L, pH=5   |
| محمدنژاد و همکاران (۱۳۹۰)   | پلی آلومینیوم کلراید، پلی فریک سولفات و کلرور فریک                                  | کدورت فاضلاب پتروشیمی        | نوع منعقدکننده، غلظت منعقدکننده، pH، سرعت اختلاط کند | ارزیابی شرایط بهینه براساس کمینه سازی مقادیر S/N بوده و به درصد حذف اشاره نشده است.     | تاگوچی (نیود تحلیل برهم کنش عوامل) | به ترتیب pH، نوع منعقدکننده و غلظت آن، سرعت اختلاط کند                    | PAC=120ppm, pH=5، سرعت اختلاط کند ۲۰rpm                                  |
| وانگ و همکاران (۲۰۱۴)       | منعقدکننده (پلی آلومینیوم کلراید PAC)، کمک منعقدکننده (پلی آکریل آمید کاتیونی CPAM) | رنگ و COD فاضلاب صنعت تنباکو | ماده منعقدکننده، کمک منعقدکننده و pH                 | ۶۸ درصد COD و ۷۸ درصد رنگ   | روش سطح پاسخ                       | منعقدکننده و عوامل کلیدی بوده و کمک منعقدکننده کمترین تأثیر را داشته است. | PAC = 715 mg/L, CPAM = 4.8 mg/L, pH = 6.6                                |
| لیو و همکاران (۲۰۱۲)        | پلی فریک سولفات PFS، کلرورفریک و سولفات فریک  | کدورت فاضلاب شیرابه محل دفن  | ماده منعقدکننده و pH                                 | ۵۶ درصد حذف COD و ۹۰ درصد حذف کدورت با PFS و مقادیر متناظر ۶۸ درصد و ۹۸ درصد برای FeCl3 | روش سطح پاسخ                       | بررسی نشده است.   | PFS = 8 g/L at pH 6, FeCl3=10 g/L at pH 8.0, Fe2(SO4)3=12 g/L at pH 7.5. |
| گوپدا و همکاران (۲۰۰۷) [۲۴] | منعقدکننده آلوم و کمک منعقدکننده پلی الکترولیت آنیونی                               | COD و TSS فاضلاب شهری        | COD و TSS ورودی، pH و غلظت آلوم                      | ۶۵ درصد حذف COD و ۷۵ درصد حذف TSS   | بررسی تأثیر جداگانه هر عامل        | بررسی نشده است.   | Alum=150 mg/l pH = 5-8.  |

### مراجع

- [1]. Xu. J. C, Chen. G, Huang. X. F. (2009). "Iron and manganese removal by using manganese ore constructed wetlands in the reclamation of steel wastewater", Journal of Hazardous Materials, 169, 309-317
- [2]. Gao. C. (2011). "Optimization and evaluation of steel industry's water-use system", Journal of Cleaner Production, 19(1), 64-69

- [۳]. تراپیان، ع، حسنی ا ح، اوشک سرایی ل. (۱۳۸۴). "بررسی روش‌های تصفیه پساب صنایع تولید ورق قلع اندود و گالوانیزه"، مجله علوم و تکنولوژی محیط زیست، ۲۶(۳)، ۱-۲.
- [4]. Huan. X.F, Ling .J. (2011). "Advanced treatment of wastewater from an iron and steel enterprise by a constructed wetland/ultrafiltration/reverse osmosis process", *Desalination*, 269(1-3), 41-49
- [5]. Kim.Y.H, Hwang. E.D, Shim.W.S. (2007). "Treatments of stainless steel wastewater containing a high concentration of nitrate using reverse osmosis and nanomembranes", *Desalination*, 202(1-3), 286-292
- [6]. Zhao. L, Xia. W, (2009). "Stainless steel membrane UF coupled with NF process for the recovery of sodium hydroxide from alkaline wastewater in chitin processing", *Desalination*, 249(2), 774-780
- [7]. Zhang. Y. (2011). "Treatment of Reused Comprehensive Wastewater in Iron and Steel Industry With Electrosorption Technology", *Journal of Iron and Steel Research, International.*, 18(6), 37-42
- [8]. Nandy.T, Shastry.S, Pathe.P.P, Kaul S. N. (2003). "Pretreatment of Currency Printing Ink Wastewater through Coagulation-Flocculation Process", *National Environmental Engineering Research Institute*; 148(1), 15-30.
- [9]. Desjardins.C, Koudjonou.B, Desjardins.R, (2002). "Laboratory study of ballasted flocculation", *Water Research Feb*;36 (3), 744-54.
- [10]. Syu. M, Chen .B.J, Chou. S.T, (2003). "A study on the sedimentation model and neural network online adaptive control of a benzoic acid imitated wastewater oxidation process", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 42(26), 6862-6871.
- [11]. Dominguez. J. R, de Heredia. J. B, Gonzalez. T, Sanchez-Lavado. F, (2005). "Evaluation of Ferric Chloride as a Coagulant for Cork Processing Wastewaters. Influence of the Operating Conditions on the Removal of Organic Matter and Settability Parameters", *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 44, 6539-6545.
- [12]. Gurse. A, Yalcin.M, Dogar. C, (2003) "Removal of Remazol Red Rb by Using Al (III) as Coagulant-Flocculant: Effect of Some Variables on Settling Velocity", *Water, Air, and Soil Pollution*, 146, 297.
- [13]. Zhu. K, El-Din. MG, Moawad. AK, Bromley. D, (2004). "Physical and Chemical Processes for Removing Suspended Solids and Phosphorus from Liquid Swine Manure", *Environmental Technology*, 25, 10
- [14]. Franceschi.M., Girou. A, Carro-Diaz, (2002). "Optimisation of the coagulation-flocculation process of raw water by optimal design method," *Water research*, 36(14), 3561-3572.
- [15]. Wang., J. P, Chen. Y.Z, Ge. X. W. (2007). "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), 204-210.
- [۱۶]. عبادی، ت. بهلکه، ا. ادریسی، ا. (۱۳۹۱) "به‌گزینی استاتیکی پارامترهای مؤثر بر راندمان حذف TOC پساب صنعتی با استفاده از روش انعقاد لخته‌سازی". اولین همایش ملی تصفیه آب و پساب‌های صنعتی. ماهشهر. دانشگاه آزاد اسلامی.
- [۱۷]. محمدنژاد باریکی، ا. ع. رشیدی مهرآبادی، ع. سالاری، س. (۱۳۹۰)، "بهینه‌سازی عملیات انعقاد و لخته‌سازی در واحد تصفیه پساب پتروشیمی مبین با استفاده از روش تاگوچی". دومین همایش ملی مدیریت پساب و پسماند در صنایع نفت و انرژی. تهران. شرکت هم‌اندیشان انرژی کیمیا.
- [18]. Wang. Y, Chen. K, Ge X W., Yu H. Q. (2014). "Optimization of coagulation-flocculation process for papermaking-reconstituted tobacco slice wastewater treatment using response surface methodology", *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 391-396
- [19]. Patel.H and Vashi R.T.( 2012). "Removal of Congo Red dye from its aqueous solution using natural coagulants" *Journal of Saudi Chemical Society*, 16, 131-136
- [20]. Liu.x, Li.x.M, Yang.Q, (2012). "Landfill leachate pretreatment by coagulation-flocculation process

using iron-based coagulants: Optimization by response surface methodology”, Chemical Engineering Journal, 200–202 , 39–51

- [21]. Montgomery Douglas. (2001). “Design and Analysis of Experiments”, 5th Ed. Chapter 11, John Wiley & Sons Inc., 427-445
- [22]. ASTM D 2035, (2008). Standard practice for coagulation-flocculation jar test of water, 11.02.
- [23]. APHA (American Public Health Association), (1998). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 20th Ed. APHA, AWWA, WEF,
- [24]. Guida M., Matteia M, Roccab C. D., Mellusoc G., Meriçb S., (2007). Optimization of alum-coagulation/flocculation for COD and TSS removal from five municipal wastewater, Desalination, 211 (113–127).