

1 بهینه‌سازی و مدل‌سازی چند متغیری تصفیه پساب روغنی پالایشگاه گاز با استفاده از کربن

2 فعال به‌عنوان یک جاذب با توان عملیاتی بالا

3 حامد باقری^۱، بیژن هنرور^{۲*}، نادیا اسفندیاری^۲، زهرا عرب ابوسعدي^۲

4 ۱. دانشجوی دکتری گروه مهندسی شیمی، واحد مرودشت، دانشگاه آزاد اسلامی مرودشت، مرودشت، ایران،

5 ۲. دانشیار گروه مهندسی شیمی، واحد مرودشت، دانشگاه آزاد اسلامی مرودشت، مرودشت، ایران،

6 *جهت مکاتبه: ایمیل: Honarvar2@gmail.com (بیژن هنرور)، h.bagheri8069@yahoo.com (حامد باقری)

7
8 **Multivariate optimization and modeling of gas refinery oily**
9 **wastewaters treatment utilizing activated carbon as high throughput**
10 **adsorbent**

12 **Hamed Bagheri¹, Bizhan Honarvar^{2*}, Nadia Esfandiari², Zahra Arab**
13 **Aboosadi²**

14 ¹ Ph.D. student, Department of Chemical Engineering, Marvdasht Branch, Islamic Azad
15 University, Marvdasht, Iran,

16 ² Associate Professor, Department of Chemical Engineering, Marvdasht Branch, Islamic Azad
17 University, Marvdasht, Iran,

18 *For correspondence: Emails: Honarvar2@gmail.com (Honarvar), h.bagheri8069@yahoo.com
19 (Bagheri)

20
21 **Multivariate optimization and modeling of gas refinery oily wastewaters treatment utilizing**
22 **activated carbon as high throughput adsorbent**

23 **Abstract**

24 **Introduction:** Recently, adsorption-based wastewater treatment had been utilized as a cost-
25 effective, high-throughput, and efficient method. It is reported that to reach an efficient treatment
26 process, the adsorption process should be optimized by a reliable optimization process. In this
27 regard, the response surface method (RSM) is a high throughput approach due to evaluating factors
28 interactions and reducing the number of experimental runs, as well as, time- and cost-saving.

29 **Methods:** Multivariate optimization and modeling of gas refinery wastewater treatment were
30 performed by utilizing activated carbon (AC) as a high throughput adsorbent through an adsorption
31 mechanism. The AC was characterized by SEM, FT-IR, and XRD analysis. The specific surface
32 area of AC as one of the most important factors that affect the adsorption yield was calculated by
33 BET&BJH as high as 897 m² g⁻¹. The factors affecting the removal yield including adsorbent
34 amount, treatment time, temperature, and pH were optimized by multivariate optimization upon a
35 response surface method (21 runs) for two types of wastewater of gas refineries using Design-
36 Expert software.

37 **Findings:** At optimal experimental conditions, the method revealed an %COD removal of 93.0%
38 and 87.0% for output and input wastewater API gravity pool, in turn. Besides, the kinetic studies
39 were performed for both output and input wastewaters, revealing that the adsorption process
40 followed the intraparticle diffusion kinetics for the COD removal from both output and input
41 wastewaters API gravity pool.

42 **Conclusion:** Based on the results, the developed process showed excellent potential for the
43 treatment of real gas refinery wastewater, hence, the authors strongly recommended its use for this
44 aim on a large scale.

45 **Keywords:** Gas refinery wastewaters; Activated carbon; Multivariate optimization; Response
46 surface method; Adsorbent; Water treatment

47

دانشگاه
پایند ویدایش
پیشرفته

48

49 **Extended Abstract**

50 **Introduction**

51 The development of wastewater treatment methods is an attractive research field due to the
52 problem of water shortage and explosive growth of industrial pollution. Among the different
53 pollutions, the most dangerous wastewater resource for life safety is the wastes of petroleum
54 industries which contains petroleum and oil components. Therefore, the design and development,
55 of new, simple, fast, and highly efficient methods for the treatment of petroleum wastewater are
56 damned by several researchers. There are different chemical and physical methods for wastewater
57 treatment, however, the physical-based method is more attractive due to its safety and cost-
58 efficiency. Among the physical methods, adsorption is a well-known, cost-effective, and efficient
59 method for wastewater treatment. To reach an efficient treatment, the adsorption process should
60 be optimized. Design experimental-based optimization is the most attractive method due to the
61 evaluation of factors interactions, reducing the number of experimental runs, time-saving, and
62 cost-efficiency.

63 **Methods**

64 The adsorbent and all other materials were obtained from Merck co. (Germany). The oily
65 wastewater of the Farashband gas refinery (southern outskirts of Fars province, Iran) was used as
66 the waste samples for all tests. Two wastewaters of the output and input of the gravity pool of the
67 API were utilized for COD removal. To prepare the adsorbent, a certain amount of adsorbent was
68 introduced to a ten-fold diluted sample of modifiers (i.e., sulfuric acid (95%) and nitric acid
69 (65%)), followed by stirring at ambient temperature for about 24 hours. After that, the activated
70 carbon (AC) was collected, washed, and calcinated at 400.0 °C for 2 hrs under a nitrogen
71 atmosphere. Afterward, the as-prepared adsorbent was used for COD removal from wastewater
72 samples. To do this certain amounts of adsorbent were incubated with 100 mL of the waste
73 samples of output and input of the gravity pool of API in certain reaction conditions and the COD

74 of the treated samples was measured. To obtain an efficient method, the effective factors were
75 optimized by multivariate optimization utilizing Design-Expert software by a response surface
76 method upon CCD design (21 runs) for two types of wastewater of gas refineries. Moreover, to
77 investigate the rate-controlling step of adsorption process reactions occurring during COD removal
78 from both the input and output wastewaters of the gravity pool of the API using activated carbon
79 as the adsorbent, the zero and first-order kinetic models were checked.

80 **Results**

81 Initially, the adsorbent was characterized by different characterization methods. The SEM
82 imaging revealed a highly porous structure with a cavity size of over 1–5 μm for the adsorbent.
83 XRD spectrum showed the adsorbent characteristic peak over $2\theta=20-30^\circ$ which is close to the
84 previous studies. Moreover, the BET surface analysis revealed a surface area of $897\text{ m}^2\text{ g}^{-1}$ and a
85 pore diameter of 2.0 nm. The adsorbent was used for wastewater treatment following the RSM
86 modeling upon CCD design with the 1-Optimal mode (21 runs) using Design-Expert software. The
87 RSM modeling provided a 2FI model with an Sqrt recommended transformation for API input and
88 a linear model with an inverse transformation for the API output wastewater. To evaluate the
89 accuracy of the models, several validation protocols including normal plots, histogram of residuals
90 distribution, the plot of residuals vs. experimental runs, and Box-Cox plots were used which
91 confirmed the accuracy of the recommended models. Besides, to investigate the interactions
92 between different effective factors, the 3D plots were constructed by the Design-Expert analyzing
93 software. The results for API input wastewater showed that the %COD removal was increased by
94 increasing the adsorbent dose at a fixed pH. While at a fixed adsorbent dose, %COD removal
95 increased by increasing the content time. Regarding API output wastewater, the results exhibited
96 that there is on significant variable interacting effect on the %COD removal which confirms the

97 accuracy of the recommended linear model. The results for the multivariate optimization of COD
98 removal from the input of the gravity pool of the API showed an optimal condition (i.e., 65.8%
99 removal): as follows; adsorbent dose: 3.4 g/100 mL; pH: 5.6; t: 32 °C, and contact time: 36.0 min.
100 In contrast, regarding the output wastewater, the RSM optimization method recommended an
101 optimal condition (i.e., 93% removal) as follows; adsorbent dose: 4 g/100 mL; pH: 6; t: 37 °C, and
102 contact time: 58.0 min. Moreover, the adsorption kinetics evaluation for COD removal from the
103 input and output of the gravity pool of the API was performed. Moreover, the kinetic studies were
104 performed for both collected wastewaters, which revealed that the adsorption process followed the
105 intraparticle diffusion kinetics for the COD removal from both input and output wastewaters of
106 the API gravity pool.

107 **Conclusion**

108 Multivariate optimization and modeling of gas refinery wastewater treatment were
109 performed utilizing activated carbon as the adsorbent. The adsorbent was characterized by SEM
110 for size and morphology, FT-IR for functionality, and XRD for crystalline characteristics. The
111 BET&BJH analysis revealed a specific surface area as high as 897 m² g⁻¹ for the adsorbent. Factors
112 affecting the COD removal including adsorbent dosage, time, temperature, and pH were optimized
113 utilizing Design-Expert software by a response surface method upon CCD design (21 runs) for
114 two types of wastewater of gas refineries. Moreover, kinetic studies were performed for both
115 collected wastewater. At optimal conditions, the method showed a COD removal of 65.8% and
116 93% for wastewaters of input and output of API, in turn. In conclusion, the developed process
117 showed excellent potential for the treatment of real gas refinery wastewater, hence, the authors
118 strongly recommended its use for this aim on a large scale.

119 **Ethical Considerations compliance with ethical guidelines**

120 The cooperation of the participants in the present study was voluntary and accompanied by their
121 consent.

122 **Conflicts of interest**

123 The authors declared no conflict of interest.

124 **Keywords:** Gas refinery wastewaters; Activated carbon; Multivariate optimization; Response
125 surface method; Adsorbent; Water treatment

126

127

زود ایندوید ویدایش نشده

128

129 **مقدمه:** خیراً روش‌های پایه جذب برای تصفیه پساب به‌عنوان روش‌های باصرفه اقتصادی، توانمند و پربازده به‌کار گرفته شده‌اند. گزارش شده

130 **است** که برای دستیابی به فرآیند تصفیه پربازده، فرآیند جذب باید بهینه شود. در این راستا، روش سطح پاسخ یک روش توانمند محسوب می‌شود

131 به دلیل بررسی برهم‌کنش بین پارامترها، کاهش تعداد آزمایش‌ها و صرفه جویی در زمان و هزینه.

132 **روش:** بهینه‌سازی و مدل‌سازی چند متغیره تصفیه فاضلاب پالایشگاه گاز با استفاده از کربن فعال به‌عنوان یک جاذب با توان عملیاتی بالا از

133 طریق مکانیسم جذب انجام شد. جاذب با تصویربرداری SEM، FT-IR و XRD تعیین مشخصه شد. علاوه‌براین، سطح ویژه جاذب به‌عنوان یکی

134 از مهم‌ترین عواملی که بر بازده جذب تأثیر می‌گذارد، توسط BET&BJH به اندازه ۸۹۷ مترمربع بر گرم برآورد گردید. عوامل مؤثر بر بازده

135 حذف شامل مقدار جاذب، زمان تصفیه، دما و pH با بهینه‌سازی چندمتغیره با روش سطح پاسخ (۲۱ اجرا) برای دو نوع پساب پالایشگاه گاز با

136 استفاده از نرم‌افزار **Design-Expert** بهینه شدند.

137 **یافته‌ها:** در شرایط تجربی بهینه، روش حذف COD به ترتیب بازده معادل ۹۳ و ۸۷ درصد برای پساب خروجی و ورودی حوضچه‌ی API نشان

138 داد. علاوه‌براین، مطالعات سینتیکی برای هر دو پساب خروجی و ورودی حوضچه‌ی API انجام شد که نشان داد فرآیند جذب از مدل جنبشی

139 انتشار درون ذره‌ای برای حذف COD پیروی می‌کند.

140 **نتیجه‌گیری:** فرآیند توسعه یافته پتانسیل بسیار خوبی برای تصفیه فاضلاب واقعی پالایشگاه گاز نشان داد، از این رو، نویسندگان استفاده از آن را

141 برای این هدف در مقیاس بزرگ مؤکداً توصیه می‌کند

142 **واژه‌های کلیدی:** فاضلاب پالایشگاه‌های گاز؛ کربن فعال؛ بهینه‌سازی چند متغیره؛ روش سطح پاسخ؛ جاذب؛ تصفیه آب

143

145 توسعه روش‌های تصفیه‌ی پساب به دلیل مشکل کمبود آب و رشد انفجاری پسماندهای صنعتی در محیط‌زیست که می‌تواند آسیب‌های چشم‌گیری
 146 به سلامت انسان و حیوانات وارد کند، زمینه‌ی تحقیقاتی و صنعتی جذابی است (۱، ۲). با توجه به آلودگی صنعتی آب‌های سطحی و زیرزمینی و
 147 خطرات احتمالی این آلودگی‌ها برای ایمنی حیات بر روی زمین، پساب‌ها در عصر حاضر به‌عنوان یک نگرانی جدی جهانی مطرح می‌شوند (۳، ۴).
 148 این پساب‌ها از صنایع متعددی مانند صنایع غذایی، نساجی، پتروشیمی، پالایشگاه و چرم‌سازی به محیط‌زیست وارد می‌شوند (۵)؛ اما در میان این
 149 آلودگی‌ها، یکی از خطرناک‌ترین منابع فاضلاب برای ایمنی زندگی، پسماندهای صنایع نفتی است که حاوی نفت و اجزای نفتی (مثلاً نفت خام)
 150 است (۵، ۶)؛ بنابراین، طراحی و توسعه، روش‌های جدید، ساده، سریع و بسیار کارآمد برای تصفیه پساب‌های نفتی توسط چندین محقق موردبررسی
 151 قرار گرفته است. تاکنون چندین روش مختلف برای تصفیه‌ی پساب توسعه داده شده است، از جمله فرآیندهای بیولوژیکی (۷)، فیزیکی (۸)، شیمیایی
 152 (۹)، فتوکاتالیستی (۱۰)، آنزیمی (۱۱، ۱۲) و نانوزایمی (۱۳). در میان فرآیندهای مذکور، روش‌های فیزیکی مقرون‌به‌صرفه و همچنین ساده هستند
 153 (۱۴). از این رو، طیف گسترده‌ای از روش‌های تصفیه‌ی فیزیکی، به‌عنوان مثال، جذب، جداسازی وزنی و شناورسازی برای تصفیه‌ی پساب طراحی و
 154 گزارش شده است (۵، ۷، ۱۴).

155 در میان فن‌های تصفیه‌ی فیزیکی، روش‌های مبتنی بر جذب از جمله روش‌های شناخته‌شده، مقرون‌به‌صرفه و کارآمد هستند (۷، ۱۴).
 156 این روش دارای چندین مزیت از جمله تصفیه آب بدون استفاده از هیچ‌گونه افزودنی شیمیایی، طراحی ابزاری ساده و هزینه عملیاتی کم هست
 157 (۱۴). تاکنون چندین جذب برای تصفیه آب استفاده شده است. به‌عنوان مثال، کربن فعال (۵)، ژئولیت‌ها (۵)، گرافن (۱۵)، اکسید گرافن (۱۶)،
 158 چارچوب‌های فلزی-آلی (۱۷) و نانو مواد (۱۸) برای این هدف به کار گرفته شده‌اند. در فرآیند طراحی، یکی از مهم‌ترین عوامل، مقرون‌به‌صرفه
 159 بودن روش طراحی شده است که می‌تواند روش را برای کاربرد در مقیاس بزرگ مناسب سازد (۵). در سال‌های اخیر، فرآیند حذف به طور گسترده
 160 ای برای حذف رنگ و نمک از فاضلاب استفاده شده است، با این حال، حذف COD از زباله‌ها نیز موضوع مهمی برای محققان است. در این
 161 راستا، در سال ۲۰۲۲، یک رویکرد مدل‌سازی بهینه RSM برای حذف COD از فاضلاب کم‌استحکام با ریزجلبک‌ها، لجن و کربن فعال به‌عنوان
 162 جذب گزارش شد (۳۲). علاوه بر این، تصفیه فاضلاب بیمارستانی برای حذف COD و همچنین باکتری‌ها و ویروس‌های بیماری‌زا توسط
 163 فناوری پرتو الکترونی انجام شد، همانطور که وانگ و همکاران، ۲۰۲۲ گزارش کردند (۳۳). علاوه بر این، در سال ۲۰۲۲، هو و همکاران. فرآیند
 164 انعقاد را با جذب کربن فعال برای افزایش حذف COD فاضلاب از کربن‌سازی هیدروترمال ضایعات غذایی ترکیب کرد (۳۴) با توجه به ملاحظات
 165 فوق، می‌توان نتیجه گرفت که کربن فعال می‌تواند نقش مشخصی در حذف COD توسط مکانیزم جذب-دفع داشته باشد. با این حال، آثار
 166 گزارش شده دارای معایبی هستند، به‌عنوان مثال، فرآیندهای پیچیده یا نیاز به مصرف انرژی که باید برطرف شود و بر آن غلبه کرد. بر اساس
 167 این ملاحظات، در این کار، هدف ما استفاده از کربن فعال لخت به‌عنوان جذب برای حذف COD از فاضلاب روغنی برای ایجاد یک فرآیند
 168 تصفیه ساده، موثر، سریع و اقتصادی است.

169 در مورد تصفیه پساب‌های نفتی با استفاده از جاذب‌ها، گزارش‌های متعددی وجود دارد. به‌عنوان مثال، بتونیت اصلاح‌شده (۱۹)، پوست
170 موز (۲۰)، کربن فعال (۵) و خاک رس (۲۱) برای تصفیه فاضلاب نفتی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در بین این جاذب‌ها، کربن فعال را می‌توان به
171 دلیل مساحت سطح بالا، تخلخل، ظرفیت جذب عالی و قابلیت استفاده مجدد، جاذبی کم‌هزینه و بسیار کارآمدی در نظر گرفت (۵). با این حال،
172 برای رسیدن به یک فرآیند تصفیه کارآمد، باید تأثیر عوامل مهم بر بازده جذب بررسی و بهینه شود. در این راستا، روش‌های بهینه‌سازی مبتنی بر
173 طراحی آزمایش به دلیل ارزیابی اثر متقابل (برهم‌کنش) عوامل مختلف، کاهش تعداد آزمون‌های آزمایشی و در نتیجه صرفه‌جویی در زمان و هزینه
174 بسیار مورد توجه هستند. در بین روش‌های طراحی آزمایش، روش سطح پاسخ روشی شناخته‌شده و مناسب برای بهینه‌سازی آزمایش‌ها است.
175 در واقع روش سطح پاسخ شامل مجموعه‌ای از فن‌های ریاضی و آماری مفید برای مدل‌سازی و بهینه‌سازی فرآیندها است (۲۲-۲۵). نکته قابل
176 توجه این است که در روش سطح پاسخ علاوه بر مزیت‌های اجرایی روش یک-فاکتور-در-یک-زمان مزیت‌هایی دیگری نظیر تعداد اجراهای بسیار
177 کمتر، بررسی برهم‌کنش میان پارامترها و از همه مهمتر ارائه مدل‌های عملیاتی برای استفاده در محیط‌های عملیاتی نیز قابل دستیابی هستند (۴۵-
178 ۴۰). دستیابی به مدل‌های با صحت و دقت بالا می‌تواند تا یک فرآیند تصفیه پساب را برای اجرا در سطوح صنعتی و با استفاده از نیروهای غیر
179 متخصص که به عبارتی به آن اپراتور-فری گفته می‌شود مناسب گرداند و اجرای عملیاتی آن را از نظر اقتصادی به صرفه‌تر کند (۴۸-۴۶). این
180 مزیتها در روش سطح پاسخ باعث شده است تا پژوهشگران زیادی به بهینه‌سازی آزمایشات خود با استفاده از طراحی‌های مختلف آزمایشی از
181 جمله فاکتوربال دیزاین، روش کامپوزیت مرکزی، باکس-بنکن و غیره بپردازند (۴۹). از بین نرم‌افزارهای مختلف برای طراحی آزمایش در سالهای
182 اخیر نرم‌افزار مهندسی شیمی دیزاین اکسپرت به دلیل محیط کاربری آسان، در برداشتن راهنمای استفاده کنندگان، دارا بودن طراحی‌های مختلف
183 و نیز ارائه همزمان بهینه‌سازی و مدل‌سازی بسیار مورد توجه دانشمندان حیطه شیمی و مهندسی شیمی در زمینه‌های مختلف تصفیه آب، طراحی
184 حسگرها، بیوشیمی، بیوپزشکی، صنایع غذایی و تصفیه پساب‌های صنعتی قرار گرفته است (۵۳-۵۰). به عنوان مثال در سالهای اخیر با توجه به
185 ارزیابی اثر متقابل پارامترها، کاهش تعداد اجراهای آزمایشی و در نتیجه صرفه‌جویی در زمان و هزینه، از مدل سازی RSM برای بهینه‌سازی و
186 نیز مدل سازی چندین فرآیند، به عنوان مثال، حذف رنگ از محیط آبی (۳۵)، تولید سوخت زیستی (۳۶)، و حذف یون‌های فلزی از فاضلاب (۳۷)،
187 و همچنین بهینه‌سازی فرآیند اندازه‌گیری مواد (۳۸) و غیره استفاده شده است. به‌عنوان مثال، در سال ۲۰۲۲، کوماری و همکارانش (۳۷) از مدل
188 سازی RSM برای حذف کروم (VI) از محلول آبی و در سال ۲۰۲۱، بی‌یان و همکارانش مدل سازی و نیز بهینه‌سازی مبتنی بر روش RSM
189 برای حذف BOD و COD از پساب‌های نساجی با استفاده از کربن فعال مبتنی بر باگاس نیشکر استفاده کردند (۳۹).
190 از این رو، در این مطالعه، حذف COD پساب نفتی مربوط به پالایشگاه گاز فراشند با استفاده از کربن فعال به‌عنوان یک جاذب طبیعی
191 ساده، در دسترس، ارزان و کارآمد مورد بررسی قرار گرفت. برای دستیابی به بهترین عملکرد، بهینه‌سازی و مدل‌سازی چند متغیره با استفاده از
192 نرم‌افزار Design-Expert با روش سطح پاسخ بر روی طراحی CCD (۲۱ اجرا) برای دو نوع پساب پالایشگاه گاز انجام شد. عوامل مؤثر بر
193 حذف شامل دوز جاذب، زمان تصفیه، دما و پ. هاش محیط بهینه‌شده و رفتار سنتیکی جاذب مورد ارزیابی قرار گرفت. علاوه بر این، جاذب با

194 روش‌های مختلف شناسایی تعیین مشخصه شد. نکته برجسته‌ی این کار طراحی و توسعه یک روش جذب ساده با در نظر گرفتن بازده زمانی و
 195 مشکلات اقتصادی تصفیه فاضلاب روغنی است. به‌عنوان یک ایده جدید، این کار با هدف استفاده از کربن فعال اصلاح نشده برای تصفیه فاضلاب
 196 روغنی بدون هیچ گونه تغییرات سطحی پیچیده، پیوند شیمیایی، یا فرآیندهای سنتز مواد پیچیده طراحی شده است که این روش را برای کاربرد
 197 در شرایط واقعی از نقطه نظر اقتصادی مناسب می‌کند.

198 مواد و روش‌ها

199 مواد مورد استفاده و دستگاهوری

200 جاذب و سایر مواد مورد استفاده در این پژوهش از شرکت مرک آلمان و در درجه سنتز تهیه شدند. علاوه بر این، یک راکتور DR200 (شرکت
 201 هک ایالات‌متحده، ایالات‌متحده آمریکا) برای آماده‌سازی نمونه‌ها، یک فتومتر DR900 برای اندازه‌گیری COD، یک میکروسکوپ الکترونی
 202 روبشی TESCAN (جمهوری چک) برای بررسی و تعیین مورفولوژی کربن فعال و یک دستگاه پراش پرتوایکس ا فلیپس ساخت کشور هلند
 203 برای ارزیابی و تعیین مشخصه‌ی بلورینگی جاذب مورد استفاده در این پژوهش استفاده شد.

204 تعیین مشخصه پساب‌های مورد استفاده

205 در این پژوهش از پساب‌های نفتی پالایشگاه گاز فراشبد (حومه جنوبی استان فارس، ایران) به‌عنوان نمونه پساب بهره گرفته شد. بدین منظور
 206 پسابها از ورودی و خروجی حوضچه‌ی گرانشی API جمع‌آوری شدند و پس از تعیین مشخصات مختلف از جمله کدورت، میزان COD ریال
 207 محتوای نفتی، هدایت، پ.هاش و ... برای حذف COD با استفاده جاذب ارزان و در دسترس کربن فعال مورد استفاده قرار گرفتند. سپس نتایج
 208 حاصله با یکدیگر مقایسه شدند. مشخصات پسابهای انتخاب‌شده در جدول ۱ خلاصه‌شده است. با توجه به اینکه فاضلاب خروجی حوضچه‌ی
 209 API مجموع فاضلابهای جمع‌شده در طول سال است و در کل سال جمع‌آوری انجام نمی‌گردد، همین امر باعث شده است که COD فاضلاب
 210 خروجی بیشتر از فاضلاب ورودی باشد. با این حال سایر ویژگی‌های فاضلاب خروجی و ورودی حوضچه مانند کدورت، مقدار مواد نفتی و هدایت
 211 الکتریکی یکسان می‌باشد.

212 جدول ۱: مشخصات پساب‌های مورد استفاده در این مطالعه

| نام پساب | COD (میلی گرم بر لیتر) | کدورت (NTU) | سدیم کلرید (میلی گرم بر لیتر) | Cl ⁻ (میلی گرم بر لیتر) | T.S.S. (میلی گرم بر لیتر) | محتوای نفتی (میلی گرم بر لیتر) | هدایت (میکروزیمنس بر سانتی‌متر) | پ. هاش | کل مواد جامد محلول (میلی گرم بر لیتر) |
|------------------|------------------------------|----------------|--|--|---------------------------------|---|---------------------------------------|--------|--|
| پساب ورودی حوضچه | ۴۴۶ | ۸۵ | ۹۹۳ | ۶۰۲ | ۴/۵ | ۱۰ | ۱۹۳۵ | ۵/۹ | ۹۸۴ |
| پساب خروجی حوضچه | ۱۵۱۰ | ۸۵ | ۹۳۳ | ۶۰۲ | ۴/۵ | ۱۰ | ۱۹۳۵ | ۵/۹ | ۹۸۴ |

213

آماده‌سازی جاذب برای استفاده در تصفیه پساب

214
215 به جهت آماده سازی جاذب مناسب رای تصفیه پساب با استفاده از مکانیسم جذب-وا جذب در ابتدا مواد کربنی فعال شدند. برای تهیه کربن فعال،
216 مقدار مشخصی از جاذب را با ترازوی دیجیتال وزن کرده و سپس جاذب توزین شده را به محلول ده برابر رقیق شده از اصلاح کننده‌های سطح ()
217 یعنی اسیدسولفوریک (۹۵٪) و اسید نیتریک (۶۵٪) افزودیم. مخلوط آزمایش در دمای محیط به مدت حدود ۲۴ ساعت هم زده شد تا از فعال
218 سازی کامل کربن اطمینان حاصل شود. پس از آن، کربن فعال جمع‌آوری، شسته و در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲ ساعت در اتمسفر
219 نیتروژن کلسینه گردید.

روش تجربی تصفیه پساب از طریق حذف COD

220
221 جاذب ارزان، در دسترس و توانمند کربن فعال برای حذف COD از نمونه پسابهای جمع آوری شده از ورودی و خروجی حوضچه API با استفاده
222 از مکانیسم جذب-وا جذب به کار گرفته شد. در یک آزمایش نوعی در شرایط بهینه آزمایشگاهی، مقادیر معینی از جاذب با ۱۰۰ میلی‌لیتر از
223 نمونه‌های پساب جمع آوری شده از خروجی یا ورودی حوضچه ثقیل API در شرایط بهینه واکنش انکوبه شدند. پس از گذشت مدت زمان ۶۰
224 دقیقه با استفاده از سانتیفریوژ کربن فعال از نمونه پساب جدا شد و COD نمونه‌های تیمار شده اندازه‌گیری گردید. لازم به ذکر است که میزان
225 حذف COD برحسب درصد (بازده حذف) با استفاده از فرمول زیر محاسبه شد:

$$\text{بازده حذف (\%)} = \frac{\text{COD ثانویه} - \text{COD اولیه}}{\text{COD اولیه}} \times 100$$

226
227 لازم به ذکر است که RSD تکرارپذیری اندازه‌گیری‌ها کمتر از ۲ درصد برآورد گردید.

بهینه‌سازی چند متغیری فرایند تصفیه پساب با استفاده از روش سطح پاسخ

228
229 برای دستیابی به یک روش توانمند جهت تصفیه پسابهای مورد نظر با استفاده از کربن فعال شرایط واکنش بهینه سازی شدند. در مقایسه با روش
230 وقت گیر و غیر اقتصادی یک-فاکتور-در-یک-زمان روشهای بهینه‌سازی مقرون به صرفه‌ی مبتنی بر طراحی آزمایش انتخاب شدند. لازم به ذکر
231 است که از بین روش‌های بهینه سازی و مدل سازی مبتنی بر طراحی آزمایش روش سطح پاسخ (RSM) به عنوان روشی شناخته شده و کارآمد
232 در جهت بهینه‌سازی بسیاری از فرآیندهای آزمایشگاهی و صنعتی مورد استفاده قرار گرفته است، بنابراین در این پژوهش نیز از روش سطح پاسخ
233 برای مدل‌سازی و بهینه سازی فرایند تصفیه پسابهای پالایشگاه با استفاده از کربن فعال بهره گرفته شد. نکته قابل ذکر در این مورد آن است که
234 سطوح پایین و بالای پارامترهای موثر بر حذف COD از هر دو فاضلاب ورودی و خروجی حوضچه برای طراحی آزمایشی به روش سطح پاسخ
235 در جدول ۲ نشان داده شده است. همانطور که مشخص است زمان و مقدار جاذب دو عامل مهم از نظر اقتصادی و عملی می‌باشند. در واقع، بهینه
236 سازی این عوامل برای رسیدن به بهترین بازده حذف COD در زمان کمتر و مقدار بهینه جاذب، می‌تواند فرآیند حذف را اقتصادی و برای کاربرد
237 در مقیاس بزرگ مناسب کند. از این‌رو، زمان و مقدار جاذب به عنوان دو پارامتر موثر در فرآیند حذف برای انجام عملیات بهینه سازی انتخاب
238 شدند. علاوه بر این، pH محیط حذف می‌تواند بارهای سطحی جاذب‌ها را تغییر داده و در نتیجه بر بازده حذف تأثیر بگذارد، بنابراین pH نیز

239 بهینه‌سازی شد. عامل مهم دیگری که ممکن است بر ظرفیت جذب جذب ها و در نتیجه راندمان حذف تأثیر بگذارد دما است. بنابراین تأثیر دما
 240 بر فرآیند حذف نیز در نظر گرفته شد. به طور کلی اثر پارامترهای اصلی شامل زمان، پ.هاش، مقدار وزنی جاذب، و دمای فرآیند جذب سطحی بر
 241 بازده حذف COD از پسابهای مورد مطالعه با استفاده از روش سطح پاسخ مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین اثر برهم کنش بین پارامترهای
 242 مختلف نیز ارزیابی گردید و مدل مناسب برای هر تصفیه هر دو پساب با استفاده از کربن فعال به عنوان جاذب به وسیله روش سطح پاسخ ارائه
 243 گردیده و دقت، صحت، روایی و و پایایی نتایج مورد تایید قرار گرفت. در نهایت، در این مطالعه، بهینه‌سازی و مدل‌سازی چند متغیری با استفاده
 244 از نرم‌افزار Design-Expert به روش سطح پاسخ با طراحی CCD (۲۱ اجرا) برای دو نوع پساب پالایشگاه گاز انجام شد. برای پژوهش
 245 حاضر گفتنی است داده‌های تجربی ورودی و نیز داده های خروجی (بازده حذف از هر پساب) تحت اجرای طراحی CCD در جدول ۳ نشان
 246 داده شده است.

247 **جدول ۲:** سطوح پایین و بالای پارامترهای موثر بر حذف COD برای فاضلاب ورودی و خروجی API.

| پارامتر | یکا | Low level | High level |
|------------|----------|-----------|------------|
| مقدار جاذب | g/100 mL | ۱ | ۵ |
| pH | pH unit | ۲ | ۱۰ |
| دما | °C | ۲۵±۱ | ۴۹±۱ |
| زمان حذف | min | ۱۵ | ۶۰ |

248
 249
 250 **جدول ۳:** داده‌های تجربی ورودی و خروجی طراحی CDD

| شماره آزمون | جاذب (گرم بر ۱۰۰ میلی‌لیتر) | پ.هاش | دما (سانتی‌گراد) | زمان (دقیقه) | درصد حذف (پساب خروجی حوضچه) | درصد حذف (پساب ورودی حوضچه) |
|-------------|-----------------------------|-------|------------------|--------------|-----------------------------|-----------------------------|
| ۱ | ۳ | ۶ | ۳۷ | ۴۵ | ۲۸/۷ | ۷۷/۸ |
| ۲ | ۲ | ۸ | ۳۱ | ۶۰ | ۲۱/۹ | ۶۹/۹ |
| ۳ | ۳ | ۶ | ۳۷ | ۷۵ | ۲۳/۵ | ۶۵/۲ |
| ۴ | ۳ | ۶ | ۳۷ | ۴۵ | ۱۳/۷ | ۵۹/۸ |
| ۵ | ۳ | ۶ | ۳۷ | ۴۵ | ۲۱/۱ | ۵۵/۶ |
| ۶ | ۳ | ۶ | ۲۵ | ۴۵ | ۲/۷ | ۷۶/۲ |
| ۷ | ۳ | ۶ | ۳۷ | ۴۵ | ۹۳/۷ | ۸۷/۴ |
| ۸ | ۳ | ۶ | ۳۷ | ۱۵ | ۱۸/۱ | ۶۲/۵ |
| ۹ | ۲ | ۴ | ۳۱ | ۳۰ | ۳۲/۵ | ۵۱/۱ |
| ۱۰ | ۳ | ۶ | ۳۷ | ۴۵ | ۸۵/۷ | ۶۹/۲ |
| ۱۱ | ۴ | ۸ | ۳۱ | ۳۰ | ۲۷/۱ | ۶۹/۲ |
| ۱۲ | ۳ | ۱۰ | ۳۷ | ۴۵ | ۳۵/۸ | ۵۹/۴ |

| | | | | | | |
|----|---|---|----|----|------|-------|
| ۱۳ | ۱ | ۶ | ۳۷ | ۴۵ | ۱۷/۱ | ۳۲/۷ |
| ۱۴ | ۲ | ۴ | ۴۳ | ۳۰ | ۲۷/۲ | ۶۸/۱۶ |
| ۱۵ | ۵ | ۶ | ۳۷ | ۴۵ | ۳۳ | ۵۲/۵ |
| ۱۶ | ۳ | ۶ | ۴۹ | ۴۵ | ۲۱/۳ | ۶۰/۵ |
| ۱۷ | ۳ | ۲ | ۳۷ | ۴۵ | ۲۳/۷ | ۸۰ |
| ۱۸ | ۴ | ۴ | ۴۳ | ۶۰ | ۳۶/۳ | ۵۹/۲ |
| ۱۹ | ۴ | ۴ | ۳۱ | ۶۰ | ۳۵/۸ | ۷۸/۷ |
| ۲۰ | ۴ | ۸ | ۴۳ | ۳۰ | ۳۲/۴ | ۷۳/۵ |
| ۲۱ | ۲ | ۸ | ۴۳ | ۶۰ | ۲۵ | ۷۳/۲ |

251

252

بررسی سینتیک فرایند جذب

253 برای ارزیابی مرحله کنترل سرعت واکنش‌های فرایند جذب در طول حذف COD از هر دو پساب ورودی و خروجی حوضچه‌ی API با استفاده

254 از کربن فعال، مدل‌های سینتیکی شبه مرتبه دو، ایلوویچ، و انتشار-ذره بررسی شدند. انطباق داده‌های حذف با مدل جنبشی بر اساس میزان خطی

255 بودن نمودارهای حاصله برای هر مدل جنبشی انجام پذیرفت به طوری که مدلی که بیشترین ضریب همبستگی را نشان می‌داد به عنوان مدل

256 توصیف کننده‌ی سینتیک جذب انتخاب گردید.

257

258 نتایج و بحث

تعیین مشخصه‌ی جاذب

260 کربن فعال به عنوان جاذب مورد استفاده در این پژوهش با استفاده از آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی به جهت تعیین اندازه و مورفولوژی،

261 آنالیز پراش پرتو ایکس برای تعیین خواص بلوری و نیز آنالیز BET برای تعیین ویژگیهای سطح از جمله مساحت ویژه سطح به عنوان عامل

262 تاثیرگذار در فرایند تصفیه فاضلاب، مورد بررسی قرار گرفت

آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی

264 برای تعیین مشخصه‌ی کربن فعال، ابتدا از تصویربرداری میکروسکوپ الکترونی روبشی برای بررسی خواص مورفولوژیکی آن استفاده شد، نتایج

265 در شکل ۱ نشان داده شده است. بر اساس این تصویر، کربن فعال ساختار بسیار متخلخلی دارد که آن را برای استفاده به عنوان جاذب مناسب

266 می‌کند. قابل توجه است که اندازه حفره‌ی کربن فعال بیش از ۵-۱ میکرومتر است.

آنالیز پراش پرتو ایکس

268 کربن فعال با استفاده از آنالیز پراش پرتو ایکس برای تعیین خواص بلوری و نیز میزان آمورف بودن ساختاری مورد بررسی و تعیین مشخصه قرار

269 گرفت. بدین منظور طیف XRD جاذب برای ارزیابی در بازه ۱۰ تا ۸۰ درجه ثبت گردید تا ساختار بلوره‌ای آن ارزیابی گردد. نتایج حاصل از این

270 آنالیز در شکل ۱ نشان داده شده اند. مطابق این شکل، الگوی XRD قله (دماغه) اصلی کربن فعال را در ۲۰-۳۰ درجه نشان داد که با مطالعات
271 قبلی سازگار است (۲۶).

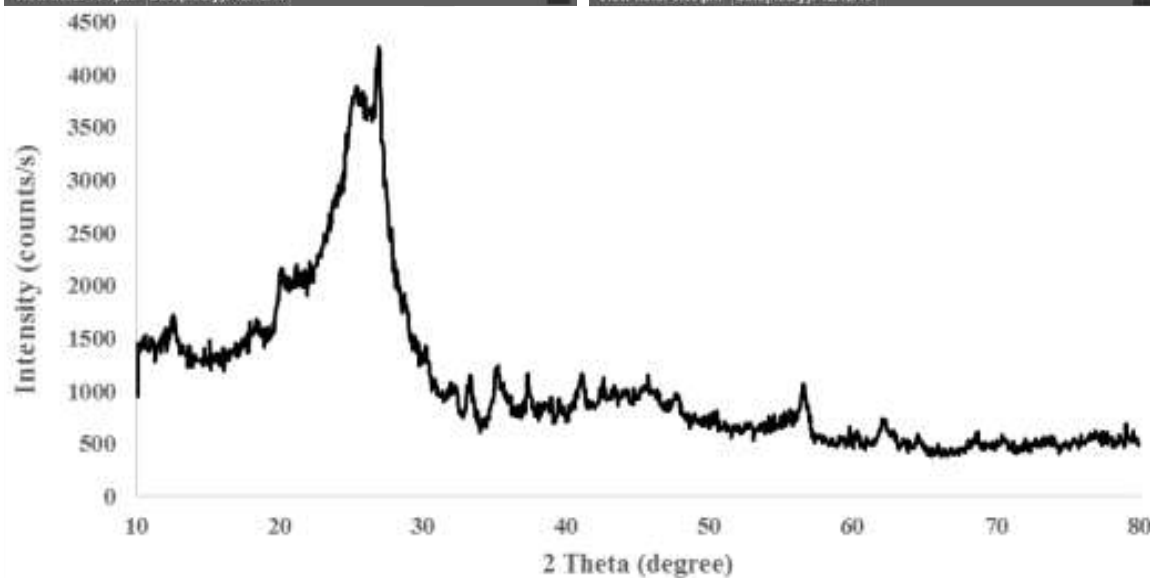
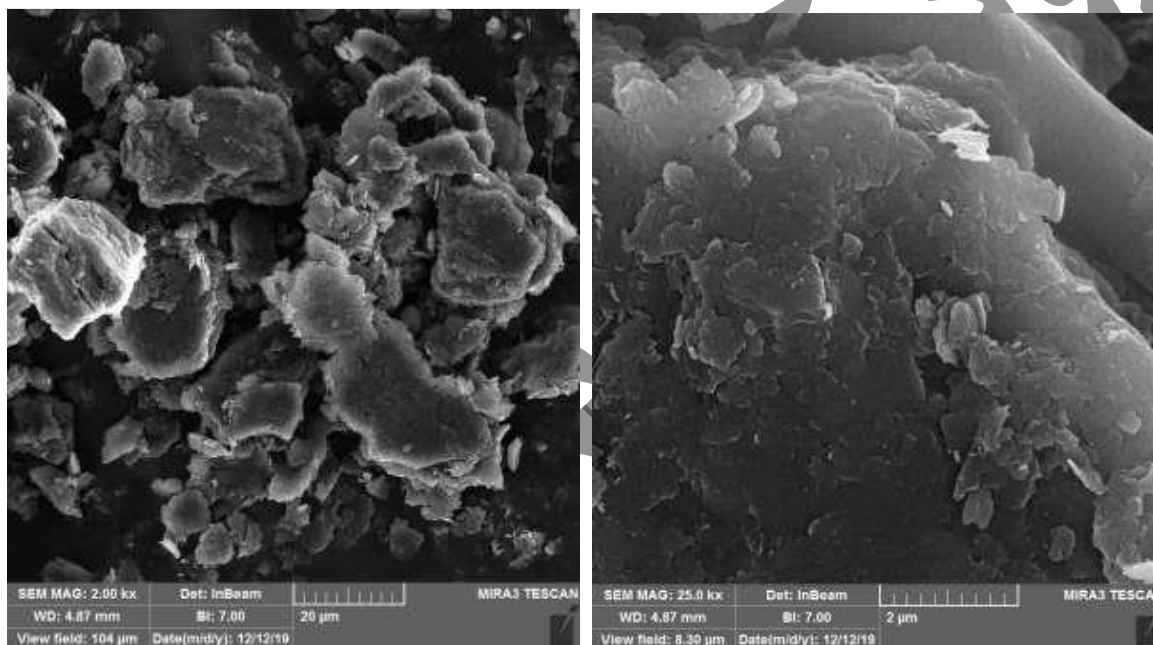
272 بررسی مشخصات سطح جاذب

273 آنالیز BET برای تعیین ویژگیهای سطح از جمله مساحت ویژه سطح به عنوان عامل تاثیرگذار در فرایند تصفیه فاضلاب، مورد بررسی قرار گرفت

274 نتایج حاصل از این بررسی نشان داد که کربن فعال مورد استفاده در این پژوهش سطح ویژه‌ای به اندازه ۸۹۷ مترمربع بر گرم دارا می‌باشد. به

275 علاوه، قطر منافذ جاذب مورد استفاده در حدود ۲۰ نانومتر برآورد گردید. مطابق نتایج حاصل از این بررسی می‌توان نتیجه گرفت که کربن فعال

276 تهیه شده در این پژوهش می‌تواند به عنوان یک جاذب با توان عملیاتی بالا در تصفیه پساب با استفاده از مکانیسم جذب-واجذب ظاهر شود.



شکل ۱: تصاویر ثبت شده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی از جاذب در بزرگنمایی کم (چپ) و زیاد (راست) و نیز طیف پراش پرتو ایکس

جاذب کربن فعال در بازه ۱۰ تا ۸۰ درجه (پایین).

مدل‌سای فرایند تصفیه پساب با استفاده از روش سطح پاسخ

مطابق تحقیقات انجام شده (۲۷) وقتی دو یا چند پارامتر در یک فرایند مؤثر هستند، تعیین شرایط بهینه‌ی دقیق با روش مرسوم بهینه‌سازی یک-

عامل-در-یک-زمان بسیار دشوار است زیرا در این شرایط علاوه بر اینکه یک فاکتور به خودی خود می‌تواند بر پاسخ موثر واقع شود، اثر هر

فاکتور بر فاکتور دیگر و به عبارت دیگر برهم کنش بین فاکتورها نیز بر پاسخ اثر به سزایی دارد. این درحالی است که روش مرسوم بهینه‌سازی

یک-عامل-در-یک-زمان تمامی پارامترهای موثر بر یک فرایند را مستقل از هم در نظر می‌گیرد و اثرات متقابل پارامترها بر یک دیگر و بر پاسخ

را نادیده در نظر گرفته و ناچیز می‌داند. درحالی نتایج آزمایشات تجربی نشان می‌دهد که پارامترهای مختلف بر یک دیگر اثرات برهمکنشی

داشته و این برهمکنش بین پارامترهای مختلف بر میزان پاسخ اثرات چشمگیری می‌گذارد. بنابراین برای فایق آمدن به این مشکل روش مرسوم

بهینه‌سازی یک-عامل-در-یک-زمان، در این شرایط، بهینه‌سازی و مدل‌سازی چند متغیره برای مثال روش بهینه‌سازی سطح پاسخ برای ارزیابی

بهترین شرایط توسط محققان توصیه می‌شود (۲۷). در این پژوهش، طراحی بهینه‌سازی و مدل‌سازی توسط نرم‌افزار Design-Expert با

استفاده از روش سطح پاسخ انجام شد. قابل ذکر است که در روش سطح پاسخ با طراحی آزمایش، هدف بهینه‌سازی پاسخی است که متأثر از

چندین متغیر مستقل (عامل) باشد. مجموعه‌ای از آزمون‌ها (اجرا) که در آن تغییراتی در متغیرهای ورودی اعمال می‌شود تا دلایل تغییرات در پاسخ

را شناسایی کنند، طراحی می‌گردد. پس از مدل‌سازی با طراحی I-Optimal، ۲۱ آزمون توسط شبیه‌ساز از طریق تغییر این عوامل برای

بهینه‌سازی شرایط عملیاتی به دست آمد. در مورد ورودی API، مدل‌سازی سطح پاسخ یک مدل درجه ۲ با تبدیل پیشنهادی ریشه دوم پاسخ برای

نمایش داده‌های تجربی ارائه کرد.

$$\text{Sqrt}(\text{COD})(\%) = 8.07 + 0.38A - 0.31B - 0.1C + 0.04D - 0.11AB - 0.28AC - 0.54AD + 0.065BC + 0.24BD - 0.29CD$$

که A، B، C و D نماینده‌ی دوز جاذب، pH (پ. هاش)، دما و زمان هستند. همان‌طور که از این فرمول مشاهده می‌شود، دوز جاذب و زمان

تأثیر مثبتی بر بازدهی حذف از ورودی API دارند درحالی‌که دما و پ. هاش اثر منفی دارند. در مورد پساب خروجی حوضچه، یک مدل خطی بر

اساس تجزیه و تحلیل آماری داده‌های مدل سطح پاسخ به دست آمد:

$$1/\text{COD}(\%) = 0.038 + 5.39A + 1.37 - 5.31C + 1.3D$$

همان‌طور که از این فرمول مشاهده می‌شود، pH، مقدار جاذب و زمان تأثیر مثبتی بر حذف COD از پساب خروجی استخر گرانژی API دارند

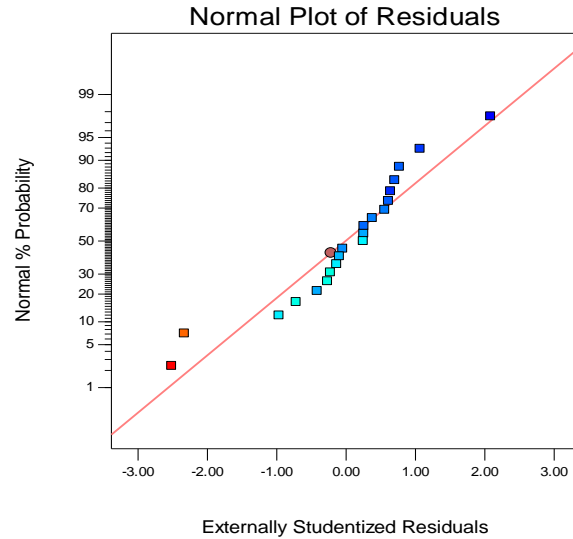
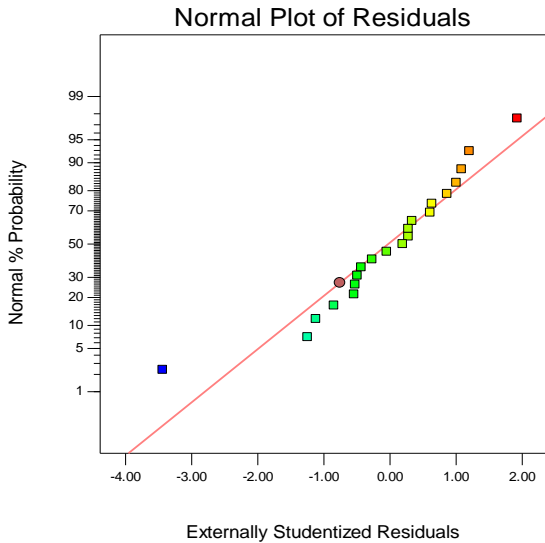
در حالی که دمای واکنش اثر منفی نشان می‌دهد، به این معنی که با افزایش مقدار جاذب و زمان واکنش بازده حذف COD افزایش و با افزایش

دمای واکنش، حذف COD کاهش یافت.

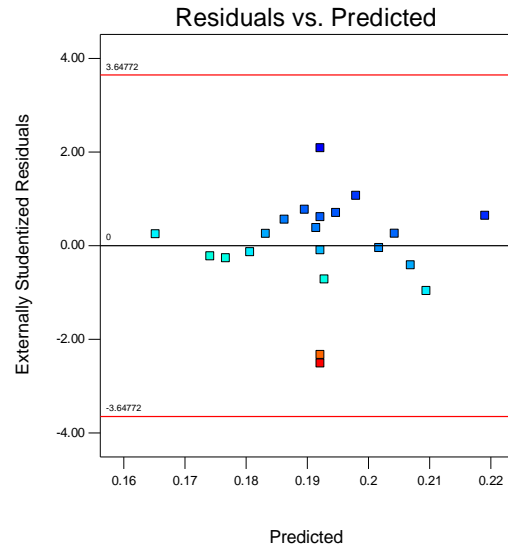
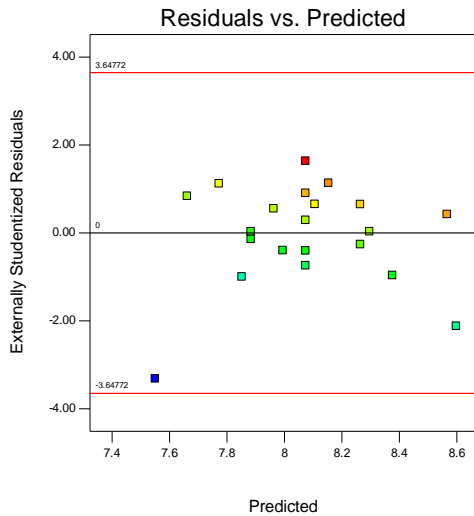
اعتبارسنجی مدل پیشنهادی با استفاده از روش‌های آماری

304 نتایج آنالیز آماری با استفاده از نرم افزار Design-Expert نشان داد که برای تصفیه پساب جمع آوری شده از ورودی حوضچه API با استفاده
305 از کربن فعال به عنوان جاذب یک مدل درجه ۲ با تبدیل پیشنهادی ریشه دوم پاسخ از طریق مدل سازی سطح پاسخ برای نمایش داده های تجربی
306 قابل ارائه است. در حالی که در مورد پساب خروجی حوضچه، یک مدل خطی بر اساس تجزیه و تحلیل آماری داده های مدل سطح پاسخ به دست
307 آمد. با این وجود برای ارزیابی دقت و صحت مدل های پیشنهادی می بایست آنالیزهای مختلف آماری صورت گیرد تا بتوان با دقت ادعا نمود که
308 مدل های حاصله نتایج خطای سیستماتیک و تصادفی در فرایند آزمایش نیستند و مدل قابلیت پشتیبانی نتایج تجربی آزمایش را دارد. بدین منظور و
309 برای ارزیابی دقت مدل های پیشنهادی، از چندین روش اعتبارسنجی مانند نمودارهای توزیع طبیعی داده ها، نمودارهای باکس-کاکس و غیره
310 استفاده گردید (۲۸). در قدم اول از تجزیه و تحلیل توزیع باقیمانده ها به عنوان یک روش شناخته شده برای بررسی صحت یک مدل استفاده
311 گردید. همان طور که گزارش شده است اگر خطاهای آزمایشی تصادفی باشند، باقیمانده ها (انحراف بین مقادیر پیش بینی شده توسط مدل و مقادیر
312 تجربی) از توزیع نرمال پیروی می کنند (۲۹). برای آنکه بتوان از توزیع طبیعی خطاها در آزمایش اطمینان حاصل نمود روش سطح پاسخ نمودارهای
313 توزیع طبیعی را در اختیار قرار داد. بنابراین برای بررسی توزیع نرمال خطاهای آزمایشی می توان نمودار نرمال را استفاده کرد. نمودارهای نرمال
314 نتایج تجربی ورودی و خروجی حوضچه API در شکل ۲ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که وقتی نقاط نمودارهای احتمال توزیع طبیعی
315 باقیمانده ها در یک خط مستقیم قرار می گیرند، می توان نتیجه گرفت که خطاهای آزمایشی معمولاً با میانگین صفر و واریانس ثابت اما ناشناخته
316 توزیع می شوند (۳۰). در شکل ۲ نمودارهای نرمال ورودی و خروجی حوضچه مطابقت عالی نقاط را با خط مستقیم نشان می دهند که بیان می دارند
317 که خطاهای آزمایشی تقریباً با میانگین صفر توزیع شده اند. از این رو، این داده ها درستی مدل های انتخاب شده و تبدیل آن ها را برای پساب های
318 ورودی و خروجی حوضچه نشان می دهند. با وجود اینکه نمودار توزیع طبیعی خطاها صحت مدل را تایید می کند اما این تنها آنالیز مورد اتکا
319 برای بررسی دقت آزمایش نیست بنابراین برای بررسی دقت روش و مدل ارائه شده از روش دیگری استفاده گردید. بدین منظور و برای بررسی
320 دقت مدل های ارائه شده برای تصفیه هر دو پساب جمع آوری شده از ورودی و خروجی حوضچه از ترسیم هیستوگرام توزیع باقیمانده ها استفاده
321 گردید. نمودار هیستوگرام توزیع باقیمانده باید یک پراکندگی تصادفی با پراکندگی های مساوی در بالا و پایین محور X را نشان دهد [۳۱]. نمودار
322 هیستوگرام توزیع باقیمانده ی پساب های ورودی و خروجی حوضچه ی API در شکل ۲ نشان داده شده است و پراکندگی های مساوی در بالا و
323 پایین محور X در این شکل ها نشان می دهد که مدل های ارائه شده دقیق و صحیح هستند و هیچ دلیل منطقی برای مشکوک شدن به فرض
324 واریانس های ثابت یا مستقل وجود ندارد.

325



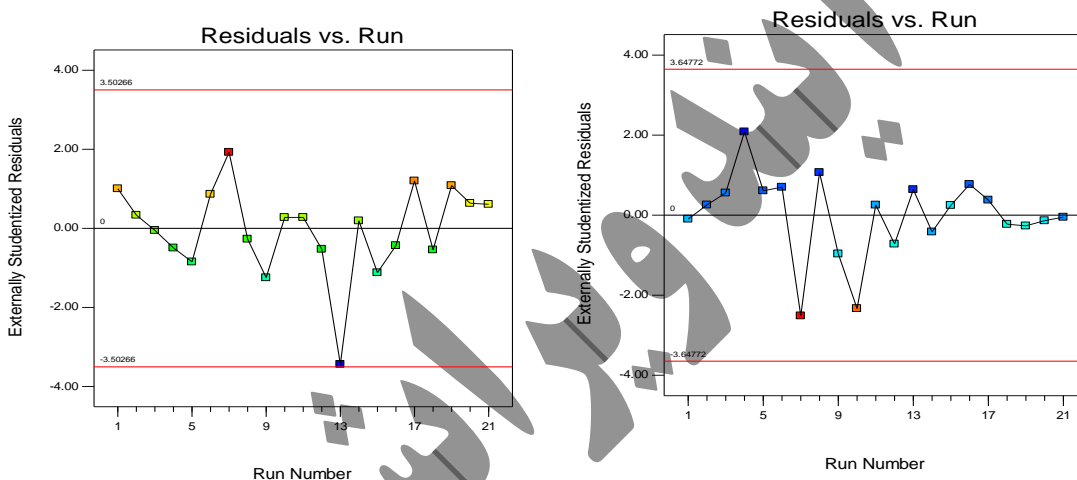
326



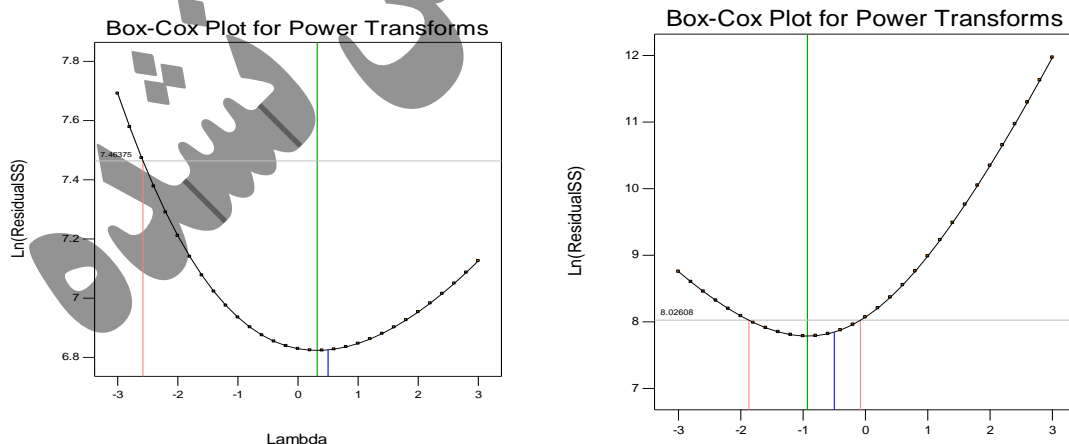
327

- 328 **شکل ۲:** نمودارهای توزیع طبیعی نتایج تجربی برای تصفیه پساب جمع آوری شده از ورودی (چپ، بالا) و خروجی (راست، بالا) حوضچه و نیز
- 329 نمودار هیستوگرام توزیع باقیمانده برای تصفیه پساب ورودی (چپ، پایین) و خروجی (راست، پایین) حوضچه با استفاده از کربن فعال به عنوان
- 330 جاذب و از طریق مکانیسم جذب-واجذب پس از تایید دقت و صحت مدل‌های پیشنهاد شده برای تصفیه دو پساب جمع آوری شده از حوضچه،
- 331 برای اطمینان یافتن بیشتر از دقت مدل‌های پیشنهادی سومین راه برای بررسی دقت مدل‌های ارائه شده جهت حذف COD نیز با استفاده از تهیه
- 332 نمودار باقیمانده‌ها در مقابل آزمون‌های تجربی مورد ارزیابی قرار گرفت. بدین منظور نمودار باقیمانده‌ها در مقابل آزمون‌های تجربی برای هر دو
- 333 پساب جمع آوری شده از ورودی و خروجی حوضچه‌ی API در شکل ۳ نشان داده شده است. شکل ۳ نشان می‌دهد که هر دو نمودار برای پساب
- 334 ورودی و خروجی حوضچه هیچ الگوی واضحی ندارند و برابر هستند. پراکندگی در بالا و پایین محور X در این شکل‌ها نشان‌دهنده‌ی درست بودن

335 مدل‌های ارائه شده است. پس از آنکه دقت و صحت مدل‌های پیشنهادی توسط نرم افزار برای تصفیه پسابهای جمع آوری شده از ورودی و خروجی
 336 حوضچه API با استفاده از کربن فعال به عنوان یک جاذب توانمند و در دسترس از طریق مکانیسم جذب-واجذب اعتبارسنجی گردید، برای
 337 تعیین دقت تبدیل‌های ریاضی توصیه شده‌ی نرم‌افزار، نمودار باکس-کاکس برای پساب‌های ورودی و خروجی حوضچه تهیه گردید. در واقع نمودار
 338 باکس-کاکس مناسب‌ترین تبدیل توانی را که می‌تواند برای داده‌ها اعمال شود را نشان می‌دهد (۳۱). نمودارهای فوق برای پساب‌های ورودی و
 339 خروجی حوضچه‌ی API در شکل ۳ نشان داده شده است. در مورد پساب ورودی API، ریشه مربع با لامبدا برابر ۰/۵ و بهترین لامبدا برابر
 340 ۰/۳۲ توسط نرم‌افزار توصیه می‌شود در حالی که برای پساب خروجی API، معکوس COD با لامبدا برابر ۰/۵- و بهترین لامبدا برابر ۰/۹۳- با
 341 استفاده از نرم‌افزار به دست آمد.
 342



343



344

345 **شکل ۳:** نمودار باقیمانده‌ها در مقابل آزمون‌های تجربی برای تصفیه پساب‌های جمع‌آوری شده از ورودی (چپ، بالا) و خروجی (راست، بالا)

346 حوضچه و نیز نمودارهای باکس-کاکس برای تصفیه پساب ورودی (چپ، پایین) و خروجی (راست، پایین) حوضچه با استفاده از کربن فعال به

347 عنوان جاذب و از طریق مکانیسم جذب-واجذب

348
349 **بررسی پایایی مدل پیشنهادی با استفاده از آنالیز واریانس**

350 همانطور که مشخص است در کنار بررسی دقت و صحت یک مدل می‌بایست پایایی مدل نیز مورد ارزیابی و اعتبارسنجی قرار گیرد. براین این

351 منظور مناسبترین آنالیز آماری در دسترس آنالیز واریانس است بنابراین برای اعتبارسنجی بیشتر دقت مدل پیشنهادی و نیز تایید پایایی نتایج،

352 بررسی نتایج ANOVA مدل مورد استفاده قرار گرفت. از این رو، در این راستا، مدل‌های پیشنهادی برای هر دو فاضلاب ورودی و خروجی

353 استخر ثقلی API با روش ANOVA مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج آنالیز ANOVA برای فاضلاب ورودی و خروجی استخر

354 گرانشی API به ترتیب در جدول ۴ و جدول ۵ نشان داده شده است. همانطور که در این جداول نشان داده شده است، مدل‌های توصیه شده

355 حذف COD قابل توجهی را از هر دو فاضلاب ورودی و خروجی از استخر گرانشی API (P-value کمتر از ۰/۰۰۰۱) نشان دادند. علاوه بر

356 این، عدم تناسب غیر قابل توجه برای هر دو مدل توصیه شده برای نمایش حذف COD از ورودی و خروجی API نشان داد که مدل به خوبی

357 با داده‌های تجربی برازش می‌کند. قابل توجه است که مقادیر P کمتر از ۰/۰۵ نشان دهنده معنی دار بودن شرایط مدل بود، در حالی که مقدار

358 بیشتر از ۰/۱ معنی دار نبود.

359 **جدول ۴:** نتایج تحلیل واریانس (ANOVA) برای مدل سطح پاسخ برای ورودی API

| Source | SS ^a | MS ^b | F-Value | P-value Prob > F | Significance of source |
|-------------|-----------------|-----------------|---------|---------------------|---------------------------|
| Model | 0.49 | 0.070 | 19.45 | < 0.0001 | Significant |
| A | 0.073 | 0.073 | 20.25 | 0.0008 | Significant |
| B | 0.049 | 0.049 | 13.54 | 0.0012 | Significant |
| C | 0.017 | 0.017 | 4.63 | 0.0001 | Significant |
| D | 0.11 | 0.11 | 31.71 | < 0.0001 | Significant |
| AB | 0.20 | 0.20 | 10.78 | < 0.0001 | Significant |
| AC | 0.053 | 0.053 | 14.70 | 0.0416 | Significant |
| AD | 0.20 | 0.20 | 55.09 | 0.0031 | Significant |
| BC | 0.02 | 0.020 | 5.63 | 0.0021 | Significant |
| BD | 0.049 | 0.049 | 13.33 | < 0.0001 | Significant |
| CD | 0.056 | 0.056 | 15.25 | < 0.0001 | Significant |
| Lack of Fit | 0.079 | 0.003 | 0.49 | 0.8335 | Not significant |

360

361 **جدول ۵:** نتایج تحلیل واریانس (ANOVA) برای مدل سطح پاسخ برای خروجی API

| Source | SS ^a | MS ^b | F-Value | P-value Prob > F | Significance of source |
|--------|-----------------|-----------------|---------|---------------------|---------------------------|
| Model | 0.57 | 0.065 | 24.36 | < 0.0001 | Significant |
| A | 0.22 | 0.22 | 59.91 | 0.003 | Significant |
| B | 0.11 | 0.11 | 31.71 | < 0.0001 | Significant |
| C | 0.19 | 0.19 | 51.74 | < 0.0001 | Significant |
| D | 0.09 | 0.09 | 24.51 | 0.001 | Significant |

362

363 **بررسی تأثیر برهم کنش بین پارامترهای مؤثر در بازده فرآیند تصفیه پساب**

364 همانطور که می دانیم وقتی دو یا چند پارامتر در یک فرآیند مؤثر هستند، تعیین شرایط بهینه‌ی دقیق با روش مرسوم بهینه‌سازی یک-عامل-در-

365 یک-زمان بسیار دشوار است زیرا در این شرایط علاوه بر اینکه یک فاکتور به خودی خود می تواند بر پاسخ موثر واقع شود، اثر هر فاکتور بر فاکتور

366 دیگر و به عبارت دیگر برهم کنش بین فاکتورها نیز بر پاسخ اثر به سزایی دارد. این درحالی است که روش مرسوم بهینه‌سازی یک-عامل-در-

367 یک-زمان تمامی پارامترهای مؤثر بر یک فرآیند را مستقل از هم در نظر می گیرد و اثرات متقابل پارامترها بر یک دیگر و بر پاسخ را نادیده در

368 نظر گرفته و ناچیز می داند. درحالی نتایج آزمایشات تجربی نشان می دهد که پارامترهای مختلف بر یک دیگر اثرات برهمکنشی داشته و این

369 برهمکنش بین پارامترهای مختلف بر میزان پاسخ اثرات چشمگیری می گذارد. بنابراین به منظور بررسی برهم کنش بین عوامل مختلف که بر

370 حذف COD از ورودی و خروجی حوضچه API تأثیر می گذارند، نمودارهای سه بعدی توسط نرم افزار Design-Expert تهیه شدند.

371 نمودارهای سه بعدی تأثیر دو عامل را بر پاسخ در یک محدوده در سطح طراحی نشان می دهند. از سوی دیگر، در نمودارهای سه بعدی، حذف

372 COD با در نظر گرفتن دو عامل در یک زمان مورد مطالعه قرار می گیرد و دیگری در یک مقدار ثابت نگه داشته می شود (۱). نمودارهای سه بعدی

373 برهم کنش متغیرهای مختلف برای حذف COD % از ورودی حوضچه API در شکل ۴ نشان داده شده است. نتایج نشان می دهد که حذف

374 COD % با افزایش دوز جاذب در مقدار پ. هاش ثابت افزایش یافته است. با این حال، در یک دوز جاذب ثابت، افزایش مقدار پ. هاش نمی تواند

375 به طور قابل توجهی بر حذف COD % از ورودی حوضچه API تأثیر بگذارد. در مقابل، در یک مقدار جاذب ثابت، حذف COD % با افزایش

376 زمان افزایش می یابد، به طور مشابه، افزایش مقدار جاذب در یک زمان ثابت نیز منجر به افزایش درصد حذف COD از ورودی حوضچه می گردد.

377 علاوه بر این، نمودارهای سه بعدی برهم کنش متغیرهای مختلف بر حذف COD % از خروجی حوضچه API نیز تهیه شد و نتایج

378 در شکل ۴ نشان داده شده است. نتایج نشان داده شده در شکل ۴ حاکی از آن است که برهم کنش قابل توجهی بین متغیرها وجود ندارد. عدم وجود

379 اثر برهم کنش بر فرآیند جذب از پساب خروجی حوضچه صحت مدل خطی پیش بینی شده توسط نرم افزار را برای حذف COD از خروجی حوضچه

380 API تأیید می کند. نمودارهای سه بعدی نشان می دهد که اثر برهم کنش قابل توجهی برای حذف COD از نمونه های جمع آوری شده از

381 خروجی حوضچه وجود ندارد و بنابراین می توان از اثرات ناچیز مشاهده شده در این مورد چشم پوشی نمود. ضمن اینکه در مورد نمونه های جمع

382 آوری شده از ورودی حوضچه نیز باید گفت که یکی از پارامترهای اساسی در انجام آزمایش و بهینه سازی روش در نظر گرفتن محدودیتهای

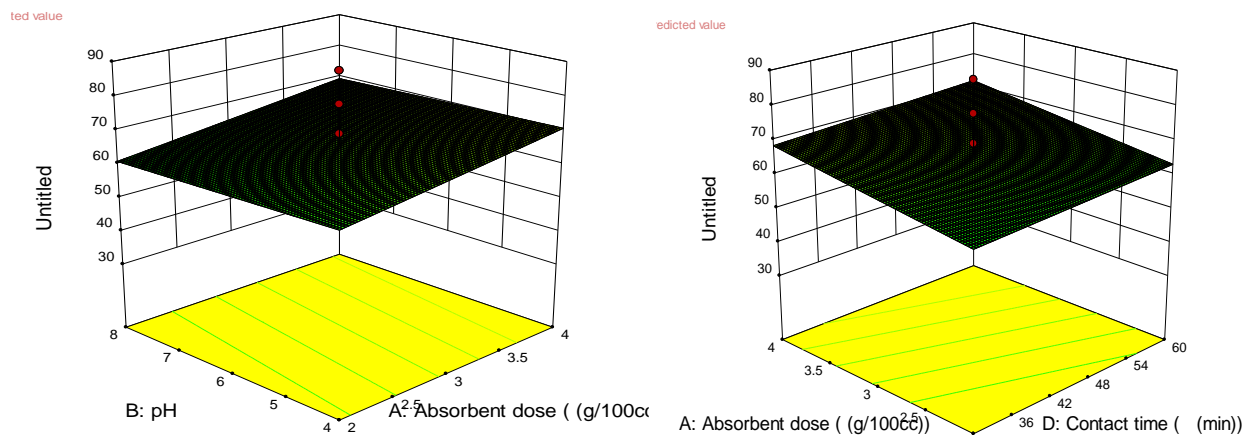
383 اقتصادی و نیز صرفه جویی در زمان می باشد. در صورتی که محدوده ها به مقادیر بالاتر تغییر می کردند به عنوان مثال با افزایش مقدار جاذب

384 به ۶ میلی گرم از ۴ میلی گرم، هزینه افزایش پیدا می کرد اما بازده حذف تغییر شگفتی نمی یافت در واقع با افزایش محدوده زمانی و مقدار جاذب

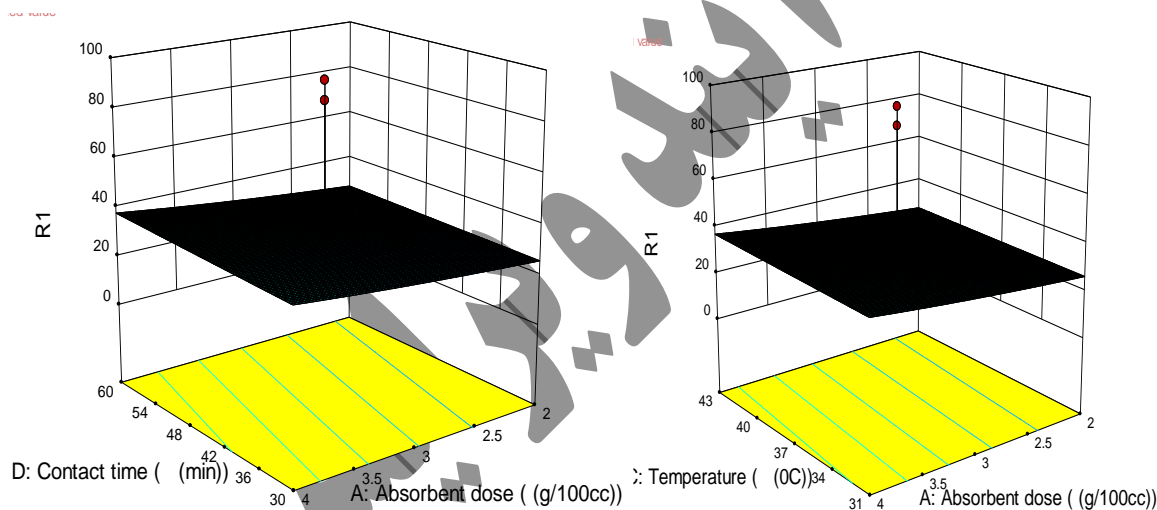
385 (هزینه) علیرغم اینکه سطح پاسخ حالت معمولی به خود می گرفت ولی بازده حذف تنها ۶ درصد بهبود می یافت که با در نظر گرفتن فاکتورهای

386 زمان و هزینه از افزایش محدوده ها خودداری گردید

387



388



389

390 **شکل ۴:** نمودارهای سه‌بعدی برهم‌کنش متغیرهای مختلف برای حذف COD از پساب ورودی (بالا) و خروجی (پایین) حوضچه با استفاده از

391

کربن فعال به عنوان جاذب و از طریق مکانیسم جذب-واجذب.

392

بهینه‌سازی چند متغیره

393 مطابق تحقیقات انجام شده می‌توان گفت که روش سطح پاسخ یکی از قوی‌ترین و توانمندترین فن‌ها برای بررسی و بهینه‌سازی چند متغیری

394 فرآیندها می‌باشد زیرا در این روش علاوه بر اثرات پارامترهای اصلی بر پاسخ، اثر برهم‌کنش بین پارامترها نیز بر پاسخ فرایند در نظر گرفته می‌

395 شود و دستیابی به شرایط بهینه واکنش با در نظر گرفتن همزمان همه عوامل موثر بر پاسخ و با تعداد آزمایشات بسیار محدود که آن را از نظر

396 اقتصادی بسیار مقرون به صرفه می‌کند، امکان پذیر می‌گردد. نکته قابل توجه این است که نتایج حاصل از روش بهینه‌سازی سطح پاسخ به

397 مراتب دقیق‌تر از روش مرسوم بهینه‌سازی فرآیندها با استفاده از متدولوژی یک پارامتر در یک‌زمان است. از این‌رو، روش سطح پاسخ بر اساس

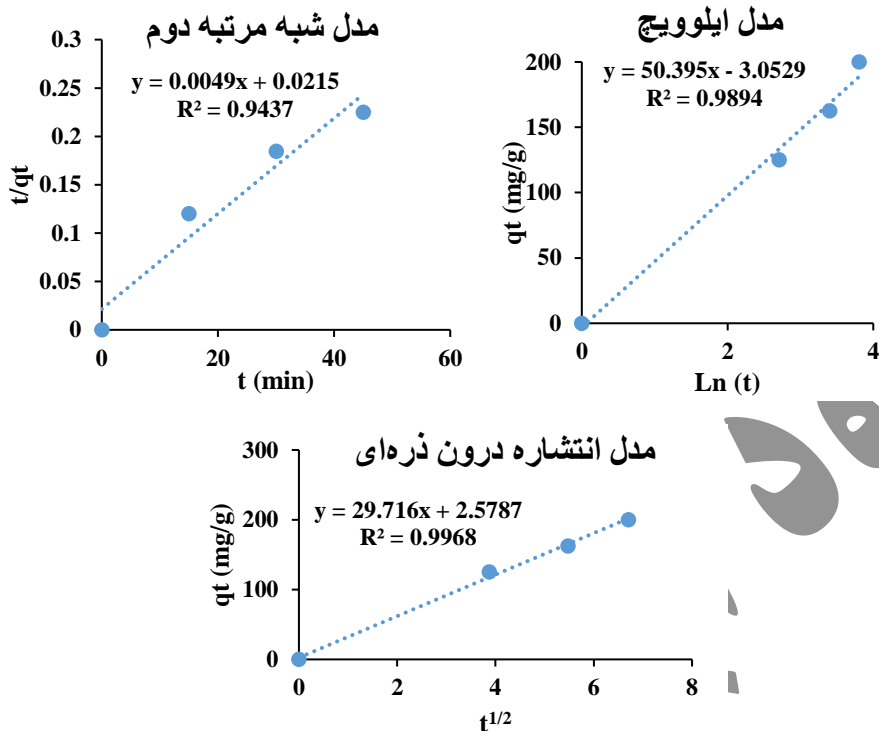
398 طراحی CCD از نوع l-optimal برای بهینه‌سازی شرایط واکنش جذب از پساب ورودی و خروجی حوضچه API انجام شد. نتایج برای
 399 بهینه‌سازی حذف COD از ورودی حوضچه API در شکل ۹ نشان داده شده است که شرایط بهینه را به شرح زیر نشان می‌دهد: دوز جذب
 400 برابر ۳/۴ گرم در ۱۰۰ میلی‌لیتر، دما برابر ۳۲ درجه سانتی‌گراد، پ. هاش برابر ۵/۶ و زمان تماس معادل ۳۶ دقیقه. در شرایط بهینه توصیه شده‌ی
 401 نرم‌افزار، نرم‌افزار پیش‌بینی کرد که حدود ۶۵/۸ درصد از COD ورودی حوضچه‌ی API را می‌توان با استفاده از کربن فعال به‌عنوان جذب
 402 حذف کرد. برای پساب جمع‌آوری شده از ورودی حوضچه API، شرایط بهینه را به شرح زیر توسط نرم‌افزار پیشنهاد گردید: مقدار گرم کربن
 403 فعال برابر ۴ گرم در ۱۰۰ میلی‌لیتر، دما برابر ۳۷ درجه سانتی‌گراد، پ. هاش برابر ۶ و زمان تماس معادل ۵۸ دقیقه. در شرایط بهینه‌ی توصیه شده‌ی
 404 نرم‌افزار، پیش‌بینی می‌گردد که حدود ۹۳ درصد از محتوای COD خروجی حوضچه‌ی API را می‌توان با به‌کارگیری کربن فعال به‌عنوان
 405 جذب حذف کرد.

بررسی سینتیک فرایند جذب

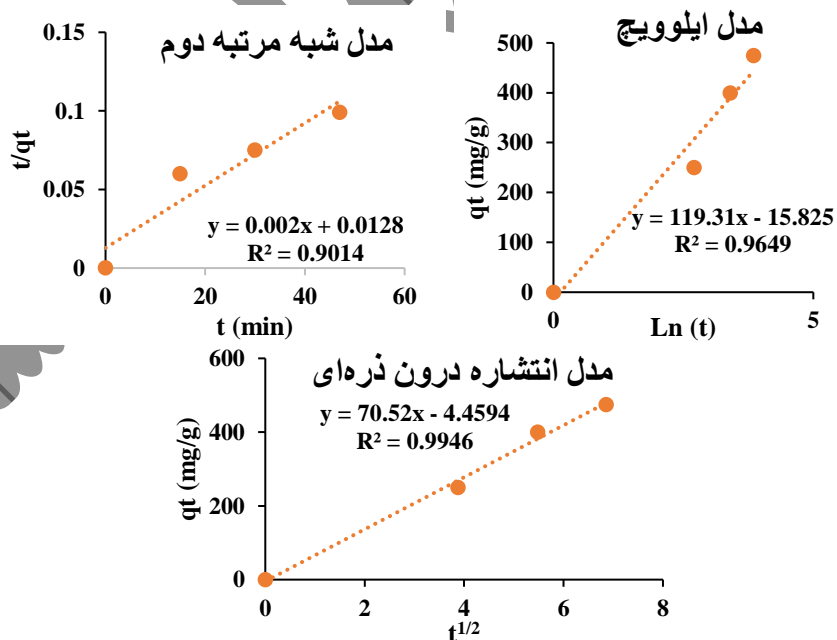
407 برای تعیین مشخصه‌ی مرحله‌ی کنترل سرعت واکنش‌های فرایند جذب در طول حذف COD از پساب حوضچه ثقلی API با استفاده از جذب
 408 کربن فعال، مدل‌های سینتیکی مدل‌های سینتیکی شبه مرتبه دوم، Elovich و انتشار درون ذره‌ای بررسی گردیده و میزان خطی بودن (R^2)
 409 به‌عنوان معیار برای تعیین این مهم که کدام مدل توانایی بیشتری در تبیین داده‌های تجربی دارد، استفاده شد (۵، ۱۴). برای انجام این کار ظرفیت
 410 جذب در زمان (t) (یعنی q_t) محاسبه شد. در این راستا ظرفیت جذب در زمان معین (q_t) به صورت زیر بدست آمد:

$$q_t = (C_0 - C_t/m) \times V$$

411 که در آن V (L) حجم محلول و m (g) جرم کربن فعال است. علاوه بر این، C_0 غلظت اولیه mg/L بر حسب C_t غلظت در هر زمان
 412 مشخص بر حسب mg/L است. پس از آن، منحنی جنبشی شبه مرتبه دوم با رسم t/q_t به عنوان تابعی از زمان رسم گردید در حالی که منحنی
 413 مدل جنبشی Elovich با رسم q_t در مقابل Lnt ترسیم شد. علاوه بر این، مدل انتشار درون ذره‌ای با رسم q_t به عنوان تابعی از $t^{1/2}$ به دست
 414 آمد. نتایج ارزیابی جنبشی برای فرایند جذب بر روی پساب ورودی و خروجی حوضچه ثقلی API به ترتیب در شکل ۵ و شکل ۶ نشان داده شده
 415 است. بر اساس این نمودارها، سینتیک جذب برای حذف COD از ورودی حوضچه API عمدتاً با مدل سینتیکی انتشار درون ذره سازگار است
 416 زیرا ضریب همبستگی (یعنی ۰/۹۹۶۶۸) معادله انتشار درون ذره به ۱/۰ نزدیکتر ضریب همبستگی مدل شبه مرتبه دوم (ضریب همبستگی =
 417 ۰/۹۴۳۷) و مدل جنبشی ایلوویچ (ضریب همبستگی = ۰/۹۸۹۴) برای حذف COD از فاضلاب ورودی است. به طور مشابه، حذف COD از
 418 فاضلاب جمع‌آوری شده از خروجی حوضچه نیز از مدل سینتیکی انتشار درون ذره پیروی می‌کند. ضریب همبستگی (یعنی ۰/۹۹۴۶) معادله انتشار
 419 درون ذره به ۱/۰ نزدیکتر ضریب همبستگی مدل شبه مرتبه دوم (ضریب همبستگی = ۰/۹۰۱۴) و مدل جنبشی ایلوویچ (ضریب
 420 همبستگی = ۰/۹۶۴۹) برای حذف COD از فاضلاب خروجی است.



424
425 **شکل ۵:** نتایج مطالعات جنبشی برای تصفیه پساب ورودی حوضچه با استفاده از کربن فعال به عنوان جاذب و از طریق مکانیسم جذب-



427
428
429 **شکل ۶:** نتایج مطالعات جنبشی برای تصفیه پساب خروجی حوضچه با استفاده از کربن فعال به عنوان جاذب و از طریق مکانیسم جذب-

430 **واجذب**

نتیجه گیری

431
432 در این مطالعه، بهینه سازی و مدل سازی چند متغیره تصفیه فاضلاب پالایشگاه گاز با استفاده از کربن فعال به عنوان یک جاذب با توان عملیاتی
433 بالا از طریق مکانیسم جذب انجام شد. جاذب با تصویربرداری SEM، FT-IR و XRD تعیین مشخصه شد. علاوه بر این، سطح ویژه جاذب
434 به عنوان یکی از مهم ترین عواملی که بر بازده جذب تأثیر می گذارد، توسط BET&BJH محاسبه شد و سطح ویژه ای به اندازه ۸۹۷ مترمربع بر
435 گرم را برای جاذب نشان داد. عوامل مؤثر بر حذف COD شامل مقدار جاذب، زمان تصفیه، دما و pH با بهینه سازی چند متغیری با استفاده از
436 نرم افزار طراحی آزمایش Design-Expert با روش سطح پاسخ (۲۱ اجرا) برای دو نوع پساب پالایشگاه گاز بهینه شد. نتایج برای بهینه سازی
437 حذف COD از ورودی حوضچه API در شکل ۹ نشان داده شده است که شرایط بهینه را به شرح زیر نشان می دهد: دوز جاذب برابر ۳/۴ گرم
438 در ۱۰۰ میلی لیتر، دما برابر ۳۲ درجه سانتی گراد، pH برابر ۵/۶ و زمان تماس معادل ۳۶ دقیقه. در شرایط بهینه توصیه شده ی نرم افزار، نرم افزار
439 پیش بینی کرد که حدود ۶۵/۸ درصد از COD ورودی حوضچه ی API را می توان با استفاده از کربن فعال به عنوان جاذب حذف کرد. برای
440 پساب جمع آوری شده از ورودی حوضچه API، شرایط بهینه را به شرح زیر توسط نرم افزار پیشنهاد گردید: مقدار گرم کربن فعال برابر ۴ گرم
441 در ۱۰۰ میلی لیتر، دما برابر ۳۷ درجه سانتی گراد، pH برابر ۶ و زمان تماس معادل ۵۸ دقیقه. در شرایط بهینه ی توصیه شده ی نرم افزار،
442 پیش بینی می گردد که حدود ۹۳ درصد از محتوای COD خروجی حوضچه ی API را می توان با به کارگیری کربن فعال به عنوان جاذب حذف
443 کرد. علاوه بر این، مطالعات سینتیکی برای هر دو پساب جمع آوری شده انجام شد. بر اساس مطالعات انجام شده، سینتیک جذب برای حذف
444 COD از پساب جمع آوری شده از ورودی و خروجی حوضچه API عمدتاً با مدل سینتیکی انتشار درون ذره سازگار است زیرا ضریب همبستگی
445 معادله انتشار درون ذره به ۱/۰ نزدیکتر از ضریب همبستگی مدل شبه مرتبه دوم و مدل جنبشی ایلوویج برای حذف COD از هر دو پساب
446 است.

تشکر و قدردانی

447 نویسندگان مایل اند از شورای پژوهشی دانشگاه آزاد اسلامی قدردانی کنند.

تعارض منافع

448 بنابر اظهار نویسندگان هیچ گونه تعارض منافع شناخته شده ای وجود ندارد.

مراجع

451
452 [1] Crini G, Lichtfouse E. Advantages and disadvantages of techniques used for wastewater
453 treatment. Environmental Chemistry Letters. 2019 Mar;17(1):145-55.

454 [2] Chai WS, Cheun JY, Kumar PS, Mubashir M, Majeed Z, Banat F, Ho SH, Show PL. A
455 review on conventional and novel materials towards heavy metal adsorption in wastewater
456 treatment application. Journal of Cleaner Production. 2021 May 10;296:126589.

- 457 [3] Farhadkhani M, Nikaeen M, Yadegarfar G, Hatamzadeh M, Pourmohammadbagher H,
458 Sahbaei Z, Rahmani HR. Effects of irrigation with secondary treated wastewater on
459 physicochemical and microbial properties of soil and produce safety in a semi-arid area.
460 Water research. 2018 Nov 1;144:356-64.
- 461 [4] Gao Q, Xu J, Bu XH. Recent advances about metal–organic frameworks in the removal of
462 pollutants from wastewater. Coordination Chemistry Reviews. 2019 Jan 1;378:17-31.
- 463 [5] Bagheria H, Honarvara B, Abbasib M, Esfandiaria N, Aboosadia ZA. Experimental
464 evaluation of Farashband gas refinery wastewater treatment through activated carbon and
465 natural zeolite adsorption process. DESALINATION AND WATER TREATMENT. 2021
466 Jun 1;225:190-202.
- 467 [6] Spellman FR, Medders L, Fuller P, Graham G. Handbook of Risk and Insurance Strategies
468 for Certified Public Risk Officers and Other Water Professionals. CRC Press; 2021 Oct 19.
- 469 [7] Liu Y, Ngo HH, Guo W, Peng L, Wang D, Ni B. The roles of free ammonia (FA) in
470 biological wastewater treatment processes: A review. Environment international. 2019 Feb
471 1;123:10-9.
- 472 [8] Del Rio-Chanona EA, Cong X, Bradford E, Zhang D, Jing K. Review of advanced physical
473 and data-driven models for dynamic bioprocess simulation: Case study of algae–bacteria
474 consortium wastewater treatment. Biotechnology and bioengineering. 2019
475 Feb;116(2):342-53.
- 476 [9] Li Y, Li M, Xiao K, Huang X. Reverse osmosis membrane autopsy in coal chemical
477 wastewater treatment: Evidences of spatially heterogeneous fouling and organic-inorganic
478 synergistic effect. Journal of Cleaner Production. 2020 Feb 10;246:118964.
- 479 [10] Al-Mamun MR, Kader S, Islam MS, Khan MZ. Photocatalytic activity
480 improvement and application of UV-TiO₂ photocatalysis in textile wastewater treatment:
481 A review. Journal of Environmental Chemical Engineering. 2019 Oct 1;7(5):103248.
- 482 [11] Hormozi Jangi SR, Akhond M, Dehghani Z. High throughput covalent
483 immobilization process for improvement of shelf-life, operational cycles, relative activity
484 in organic media and enzymatic kinetics of urease and its application for urea removal from
485 water samples. Process Biochemistry. 2020 Mar 1;90:102-12.

486 [12] Hormozi Jangi SR, Akhond M. High throughput urease immobilization onto a new
487 metal-organic framework called nanosized electroactive quasi-coral-340 (NEQC-340) for
488 water treatment and safe blood cleaning. *Process Biochemistry*. 2021 Jun 1;105:79-90.

489 [13] Hormozi Jangi SR, Davoudli HK, Delshad Y, Jangi MR, Jangi AR. A novel and
490 reusable multinanozyme system for sensitive and selective quantification of hydrogen
491 peroxide and highly efficient degradation of organic dye. *Surfaces and Interfaces*. 2020
492 Dec 1;21:100771.

493 [14] Ahmed SF, Mofijur M, Nuzhat S, Chowdhury AT, Rafa N, Uddin MA, Inayat A,
494 Mahlia TM, Ong HC, Chia WY, Show PL. Recent developments in physical, biological,
495 chemical, and hybrid treatment techniques for removing emerging contaminants from
496 wastewater. *Journal of hazardous materials*. 2021 Aug 15;416:125912.

497 [15] Zhu W, Lin Y, Kang W, Quan H, Zhang Y, Chang M, Wang K, Zhang M, Zhang
498 W, Li Z, Wei H. An aerogel adsorbent with bio-inspired interfacial adhesion between
499 graphene and MoS₂ sheets for water treatment. *Applied Surface Science*. 2020 May
500 15;512:145717.

501 [16] Lingamdinne LP, Koduru JR, Karri RR. A comprehensive review of applications
502 of magnetic graphene oxide based nanocomposites for sustainable water purification.
503 *Journal of environmental management*. 2019 Feb 1;231:622-34.

504 [17] Abdi, J., & Abedini, H. (2020). MOF-based polymeric nanocomposite beads as an
505 efficient adsorbent for wastewater treatment in batch and continuous systems: Modelling
506 and experiment. *Chemical Engineering Journal*, 400, 125862.

507 [18] Saleh TA. Protocols for synthesis of nanomaterials, polymers, and green materials
508 as adsorbents for water treatment technologies. *Environmental Technology & Innovation*.
509 2021 Nov 1;24:101821.

510 [19] Moazed H, Viraraghavan T. Removal of oil from water by bentonite organoclay.
511 *Practice Periodical of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste Management*. 2005
512 Apr;9(2):130-4.

513 [20] Aliyu UM, El-Nafaty UA, Muhammad IM. Oil removal from crude oil polluted
514 water using banana peel as sorbent in a packed column. *Journal of Natural Sciences
515 Research*. 2015;5(2):157-62.

- 516 [21] Mowla D, Karimi G, Salehi K. Modeling of the adsorption breakthrough behaviors
517 of oil from salty waters in a fixed bed of commercial organoclay/sand mixture. *Chemical*
518 *Engineering Journal*. 2013 Feb 15;218:116-25.
- 519 [22] Weremfo A, Abassah-Oppong S, Adulley F, Dabie K, Seidu-Larry S. Response
520 surface methodology as a tool to optimize the extraction of bioactive compounds from
521 plant sources. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2023 Jan 15;103(1):26-36.
- 522 [23] Asgher M, Arshad S, Qamar SA, Khalid N. Improved biosurfactant production
523 from *Aspergillus niger* through chemical mutagenesis: characterization and RSM
524 optimization. *SN Applied Sciences*. 2020 May;2(5):1-1.
- 525 [24] Tripathi M, Bhatnagar A, Mubarak NM, Sahu JN, Ganesan P. RSM optimization
526 of microwave pyrolysis parameters to produce OPS char with high yield and large BET
527 surface area. *Fuel*. 2020 Oct 1;277:118184.
- 528 [25] Pereira LM, Milan TM, Tapia-Blácido DR. Using Response Surface Methodology
529 (RSM) to optimize 2G bioethanol production: A review. *Biomass and Bioenergy*. 2021
530 Aug 1;151:106166.
- 531 [26] Bansal RC, Goyal M. Activated carbon adsorption. CRC press; 2005 May 24.
- 532 [27] Nguyen XC, Ly QV, Nguyen TT, Ngo HT, Hu Y, Zhang Z. Potential application
533 of machine learning for exploring adsorption mechanisms of pharmaceuticals onto
534 biochars. *Chemosphere*. 2022 Jan 1;287:132203.
- 535 [28] Akhond M, Hormozi Jangi SR, Barzegar S, Absalan G. Introducing a nanozyme-
536 based sensor for selective and sensitive detection of mercury (II) using its inhibiting effect
537 on production of an indamine polymer through a stable n-electron irreversible system.
538 *Chemical Papers*. 2020 Apr;74(4):1321-30.
- 539 [29] Noshadi I, Amin NA, Parnas RS. Continuous production of biodiesel from waste
540 cooking oil in a reactive distillation column catalyzed by solid heteropolyacid: optimization
541 using response surface methodology (RSM). *Fuel*. 2012 Apr 1;94:156-64.
- 542 [30] Zhang Y, Liu P, Jiang L, Jiangbo G, Yang X. Following performance of solid
543 particle and liquid phases inside a hydrocyclone. *International Journal of Coal Preparation*
544 *and Utilization*. 2021 Oct 3;41(10):693-710.

- 545 [31] Chaudhary A, Sharma S, Verma A. Optimization of WEDM process parameters for
546 machining of heat treated ASSAB'88 tool steel using Response surface methodology
547 (RSM). *Materials Today: Proceedings*. 2022 Jan 1;50:917-22.
- 548 [32] Zahmatkesh S, Far SS, Sillanpää M. RSM-D-optimal modeling approach for COD
549 removal from low strength wastewater by microalgae, sludge, and activated carbon-case
550 study mashhad. *Journal of Hazardous Materials Advances*. 2022 Aug 1;7:100110.
- 551 [33] Wang J, Wang S, Chen C, Hu J, He S, Zhou Y, Zhu H, Wang X, Hu D, Lin J.
552 Treatment of hospital wastewater by electron beam technology: Removal of COD,
553 pathogenic bacteria and viruses. *Chemosphere*. 2022 Dec 1;308:136265.
- 554 [34] Hu R, Liu Y, Zhu G, Chen C, Hantoko D, Yan M. COD removal of wastewater
555 from hydrothermal carbonization of food waste: Using coagulation combined activated
556 carbon adsorption. *Journal of Water Process Engineering*. 2022 Feb 1;45:102462.
- 557 [35] Boulahbal M, Malouki MA, Canle M, Redouane-Salah Z, Devanesan S, AlSalhi
558 MS, Berkani M. Removal of the industrial azo dye crystal violet using a natural clay:
559 Characterization, kinetic modeling, and RSM optimization. *Chemosphere*. 2022 Nov
560 1;306:135516.
- 561 [36] Gupta S, Patel P, Mondal P. Biofuels production from pine needles via pyrolysis:
562 Process parameters modeling and optimization through combined RSM and ANN based
563 approach. *Fuel*. 2022 Feb 15;310:122230.
- 564 [37] Kumari B, Tiwary RK, Yadav M. Non linear regression analysis and RSM
565 modeling for removal of Cr (VI) from aqueous solution using PANI@ WH composites.
566 *Materials Chemistry and Physics*. 2022 Oct 15;290:126457.
- 567 [38] Mahmodi K, Mostafaei M, Mirzaee-Ghaleh E. Detecting the different blends of
568 diesel and biodiesel fuels using electronic nose machine coupled ANN and RSM methods.
569 *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2022 Jun 1;51:101914.
- 570 [39] Beyan SM, Prabhu SV, Sissay TT, Getahun AA. Sugarcane bagasse based activated
571 carbon preparation and its adsorption efficacy on removal of BOD and COD from textile
572 effluents: RSM based modeling, optimization and kinetic aspects. *Bioresource Technology*
573 *Reports*. 2021 Jun 1;14:100664.

- 574 [40] Kermani V, Hashemabadi SH. Numerical analysis and RSM modeling of
575 microthermal flowmeter performance. *International Journal of Thermal Sciences*. 2022
576 Sep 1;179:107626.
- 577 [41] Parsaee Z, Karachi N, Abrishamifar SM, Kahkha MR, Razavi R. Silver-choline
578 chloride modified graphene oxide: Novel nano-bioelectrochemical sensor for celecoxib
579 detection and CCD-RSM model. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2018 Jul 1;45:106-15.
- 580 [42] Chen LC, Teo TA, Liu CL. The geometrical comparisons of RSM and RFM for
581 FORMOSAT-2 satellite images. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 2006
582 May 1;72(5):573-9.
- 583 [43] Brown D. A mathematical model of the Gac/Rsm quorum sensing network in
584 *Pseudomonas fluorescens*. *Biosystems*. 2010 Sep 1;101(3):200-12.
- 585 [44] Mahmudi K, Mostafaei M, Mirzaee-Ghaleh E. Detecting the different blends of
586 diesel and biodiesel fuels using electronic nose machine coupled ANN and RSM methods.
587 *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2022 Jun 1;51:101914.
- 588 [45] Jo K, Jo Y, Suhr JK, Jung HG, Sunwoo M. Precise localization of an autonomous
589 car based on probabilistic noise models of road surface marker features using multiple
590 cameras. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2015 Jul
591 16;16(6):3377-92.
- 592 [46] Taylor KE, Stouffer RJ, Meehl GA. An overview of CMIP5 and the experiment
593 design. *Bulletin of the American meteorological Society*. 2012 Apr;93(4):485-98.
- 594 [47] Chen VC, Tsui KL, Barton RR, Meckesheimer M. A review on design, modeling
595 and applications of computer experiments. *IIE transactions*. 2006 Apr 1;38(4):273-91.
- 596 [48] Chen VC, Tsui KL, Barton RR, Meckesheimer M. A review on design, modeling
597 and applications of computer experiments. *IIE transactions*. 2006 Apr 1;38(4):273-91.
- 598 [49] Franceschini G, Macchietto S. Model-based design of experiments for parameter
599 precision: State of the art. *Chemical Engineering Science*. 2008 Oct 1;63(19):4846-72.
- 600 [50] Boroujerdi R, Paul R. Introducing Graphene–Indium Oxide Electrochemical
601 Sensor for Detecting Ethanol in Aqueous Samples with CCD-RSM Optimization.
602 *Chemosensors*. 2022 Jan 24;10(2):42.
- 603 [51] Mokhtar A, Abdelkrim S, Boukoussa B, Hachemaoui M, Djelad A, Sassi M,
604 Abboud M. Elimination of toxic azo dye using a calcium alginate beads impregnated with

605 NiO/activated carbon: Preparation, characterization and RSM optimization. International
606 Journal of Biological Macromolecules. 2023 Feb 9:123582.

607 [52] Fajdek-Bieda A, Perec A, Radomska-Zalas A. Application of RSM Method for
608 Optimization of Geraniol Transformation Process in the Presence of Garnet. International
609 Journal of Molecular Sciences. 2023 Jan 31;24(3):2689.

610 [53] Mali P, Kamble P, Aware C, Suryawanshi S, Jadhav J. Extraction optimization of
611 anti-Parkinson's medication L-DOPA and bioactive compounds from Mucuna
612 atropurpurea (Roxb.) Wight & Arn. with biomedical potential: RSM based desirability
613 function approach. Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants. 2023
614 Apr 1;34:100451.

پایند وید اپس نشده