



# Electrode Morphology in Electrocoagulation: Experimental Evaluation of Chromium Removal Using Iron Electrodes

Amirhossein Rajabipour<sup>1\*</sup>, Mobin Vakili<sup>2</sup>, Hassan Jamali<sup>3</sup>

1. MSc. Former Graduate, Dept. of Water and Environmental Engineering, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran  
(Corresponding Author) [amir.raj@aut.ac.ir](mailto:amir.raj@aut.ac.ir)

2. MSc. Former Graduate, Dept. of Water and Environmental Engineering, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

3. MSc. Student, Dept. of Water and Environmental Engineering, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran



<https://doi.org/10.22093/wwj.2025.544298.3511>

Original Paper

## Abstract

Chromium is a highly toxic and carcinogenic pollutant commonly found in industrial effluents such as electroplating, tanning, and dye manufacturing, posing a serious risk to human health and the environment. Among modern treatment methods, electrocoagulation has attracted wide attention due to its simplicity, high efficiency, and no need for external chemical coagulants. In this study, the removal of chromium from aqueous solutions using the EC process was investigated in two parts. In the first part, the effects of three key parameters: current density, initial concentration, and reaction time, on removal efficiency and operating cost were modeled and optimized using Response Surface Methodology. The results showed that current density had a consistently positive effect on removal efficiency, while the influence of reaction time depended on conditions, becoming significant only at current densities above 90 A/m<sup>2</sup> and in interaction with initial concentration. In contrast, increasing initial concentration had an inverse effect, reducing removal efficiency by up to 8.1%. Regarding operating costs, the effects of time and concentration were limited, while current density was the main driver, raising costs by up to 161.57% when increased from 48 to 132 A/m<sup>2</sup>. In the second part, the role of electrode surface morphology was examined under optimized conditions, including one solid electrode and three perforated electrodes with hole diameters of 4, 8 and 15 mm. The findings indicated that perforated electrodes reduced removal efficiency due to decreased active surface area, with the 4 mm electrode lowering removal efficiency by 6.27%. However, hole diameter played a decisive role, as enlarging the diameter from 4 to 8 mm improved efficiency by 2.63%. Moreover, perforated electrodes significantly reduced operational costs, achieving up to 30.9% savings compared to solid electrodes. The reduction in operational cost with perforated electrodes is attributed to the lower system output voltage due to reduced active surface area and the decreased initial corrosion resistance at perforation edges, both of which lead to lower energy consumption and improved economic performance of the process. Overall, the results demonstrate that simultaneous optimization of operational conditions and electrode surface design can improve the efficiency and cost-effectiveness of the EC process for chromium removal. The perforated electrode with 8 mm holes was identified as the optimal choice, balancing high removal efficiency with reduced operating costs.

**Keywords:**  
Electrocoagulation,  
Electrode, Chromium,  
Design of Experiment,  
Electrode Morphology.



Received: Mar. 8, 2025  
Revised: Apr. 26, 2025  
Accepted: May 23, 2025

### To cite this article:

Rajabipour, A., Vakili, M., Jamali, H., 2025. Electrode morphology in electrocoagulation: experimental evaluation of chromium removal using iron electrodes. *Water and Wastewater*, 36(2), 82-106. <https://doi.org/10.22093/wwj.2025.544298.3511>.

© The Author(s).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Use your device to scan and  
read the article online





## 1. Introduction

Growing populations and industrial advancement have resulted in considerable pollution of water resources from multiple sources, affecting both quality and accessibility. Heavy metals, especially chromium, are among the most dangerous pollutants, entering the environment via the release of industrial effluents from industries such as electroplating, tanning, and steel production (Vakili et al., 2025). Hexavalent chromium (Cr(VI)), exhibit significant toxicity, environmental persistence, and potential for bioaccumulation, presenting major health risks such as liver and kidney damage, along with an elevated cancer risk (Hosseini et al., 2021). Therefore, the management and reduction of chromium levels in water sources has become as a key priority in environmental engineering (Peng and Guo, 2020).

Electrocoagulation has attracted considerable interest as a modern and effective technique. The EC process uses controlled dissolution of metal electrodes, usually iron or aluminum, to produce coagulating agents in situ, facilitating the elimination of various pollutants, including chromium ions (Genawi et al., 2020). A number of variables affect how effective the EC process is, but the electrode material and surface properties are one of the most important parameters (El-Gawad et al., 2023). Iron electrodes are widely used because of their cost-effectiveness, accessibility, and high efficacy in producing  $Fe^{2+}$  and  $Fe^{3+}$  ions, which generate insoluble iron hydroxides that function as coagulants. Although considerable research has concentrated on optimizing operational parameters like current density and pH, the physical geometry and surface shape of the electrodes have received less attention.

The configuration and shape of the electrode surface are important for improving the effective contact area and allowing mass transfer (Thakur et al., 2023, Ebba et al., 2022). Electrodes with modified surfaces, including grooves, perforations, or textured roughness, can increase the reactive surface area, facilitate more uniform current distribution, and enhance the metal dissolution process (Hakizimana et al., 2017). This study aims to investigate the effect of electrode shape changes, particularly via perforation, on the efficiency of the electrocoagulation process for chromium removal using iron electrodes. This work's innovation lies in the systematic assessment of how changing the electrode's physical surface affects removal percentage and treatment cost.

## 2. Methods and materials

The experimental setup included a 1-liter standard glass. The study was conducted in a batch electrocoagulation reactor containing a 1-liter glass beaker equipped with two parallel iron electrodes ( $8 \times 10$  cm, 0.15 cm thickness) arranged in a monopolar configuration, submerged to a depth of 7 cm with a 1.5 cm inter-electrode spacing as shown in Fig. 1. A TwinTex-DC-SP1305D power supply supplied the direct current, while a magnetic stirrer maintained solution homogeneity at 60 rpm. Synthetic wastewater was prepared by dissolving  $K_2Cr_2O_7$  in deionized water, with initial Cr(VI) concentrations varying from 50 to 500 mg/L. NaCl (1 g/L) was introduced to enhance conductivity. The study was structured in two phases (Kumar and Basu, 2023). In the first phase, Response Surface Methodology<sup>1</sup> with a Central Composite Design was used to investigate and optimize the effects of three independent variables: reaction time, current density, and initial Cr(VI) concentration.

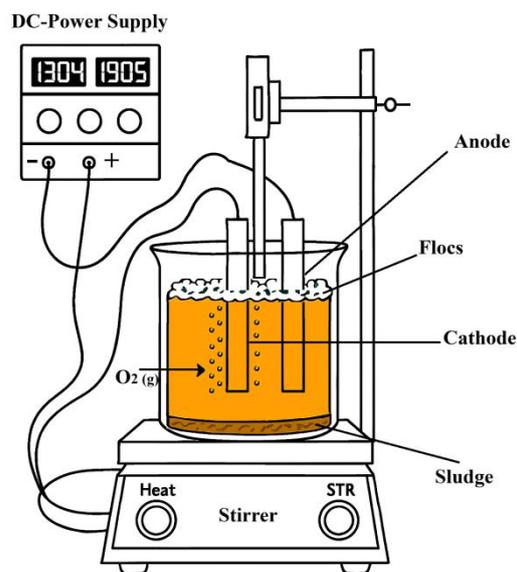


Fig. 1. Electrocoagulation cell schematic

The software Design-Expert 12 was utilized to develop the experimental design, covering factorial, axial, and center points. Quadratic polynomial models were developed to find a correlation between the independent variables and two primary responses: chromium removal efficiency (%) and operational cost (US\$/m<sup>3</sup>). The operational cost was calculated based on

<sup>1</sup> Response Surface Methodology (RSM)



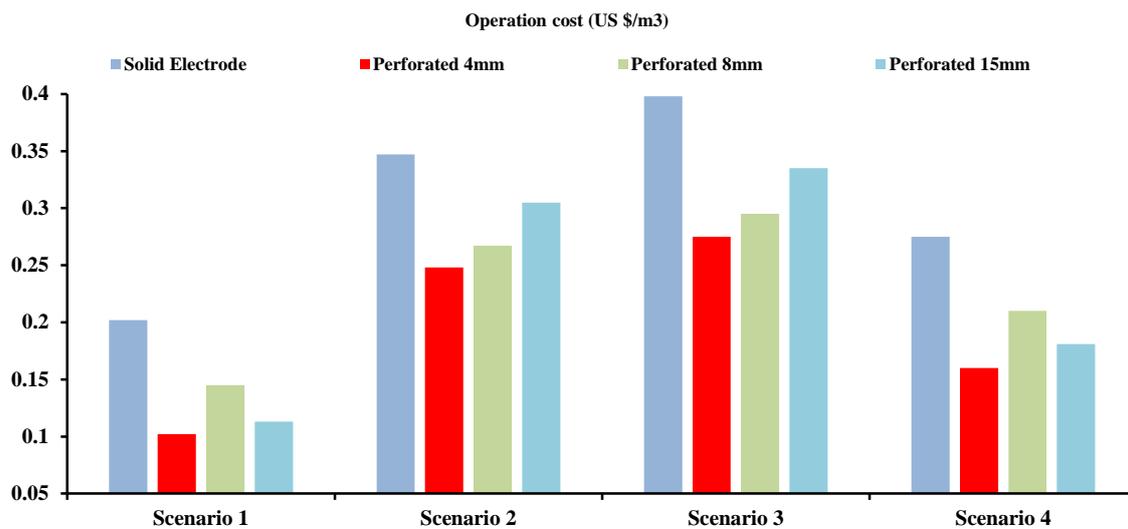


Fig. 2. Electrode surface effect on operation cost

energy and electrode usage. In the second phase, the optimal operational conditions identified by the RSM analysis were used to investigate the effect of electrode surface modification. The iron electrodes were perforated with holes of three different diameters: 4 mm, 8 mm, and 15 mm. The efficiency of these perforated electrodes was systematically assessed in comparison to a solid (non-perforated) electrode across four optimal conditions identified through the desirability function in the RSM optimization. The concentration of Cr(VI) was measured using a Hatch DR6000 spectrophotometer according to the standard 1,5-Diphenylcarbazine method (USEPA 8023) (Zongo et al., 2009).

### 3. Results and discussion

RSM facilitated the development of predictive models for chromium removal efficiency and operational costs. The final regression equations, following the elimination of insignificant terms, showed a strong correlation with the experimental data, as evidenced by  $R^2$  values of 0.9588 for removal efficiency and 0.9048 for operational cost. The Analysis of Variance<sup>1</sup> confirmed the statistical significance of both models (Bajpai et al., 2021). The findings demonstrated distinct influences of current density, reaction time, and initial concentration on removal efficiency. Current density exhibited a consistent positive effect. At an initial chromium concentration of 141 mg/L, raising current density from 48 to 132 A/m<sup>2</sup> improved removal efficiency by 4.1%, consistent with enhanced Fe dissolution and hydroxide formation. Reaction time showed

conditional behavior at 141 mg/L; extending time from 5.5 to 12.5 min increased efficiency by 4.98%, yet its effect was negligible below 90 A/m<sup>2</sup>.

Conversely, initial concentration exerted a negative impact; increasing from 141 to 408 mg/L reduced removal by 6.98%. Operational cost analysis indicated minor effects of reaction time and concentration but a dominant role of current density, with costs rising by 161.57% when current density increased from 48 to 132 A/m<sup>2</sup>, primarily due to higher electrode consumption and energy demand.

The findings from this second phase showed a distinct trade-off between removal efficiency and operational costs. In every scenario, the solid electrode achieved the highest removal efficiency, reaching approximately 96% in the optimal case as illustrated in Fig. 2. This is attributed to the increased available surface area for electrochemical reactions. Nonetheless, the solid electrode also resulted in the highest operational costs. The use of perforations markedly decreased operational costs.

The electrode with 4 mm perforations consistently produced the lowest operational cost, approximately half that of the solid electrode in the most advantageous scenario. The drop in cost is likely attributable to enhanced current distribution and reduced electrical resistance. Although the 4 mm electrode showed slightly lower removal efficiency, the electrode featuring 8 mm perforations appeared to be the most balanced option. It achieved a removal efficiency comparable to the solid electrode in some cases, while simultaneously achieving a significant reduction in operational costs. The 15 mm

<sup>1</sup> Analysis of Variance (ANOVA)



perforations typically incurred greater costs and exhibited less consistent removal efficiencies than the 8 mm design, indicating that an excessive perforation diameter can adversely affect performance by excessively reducing the effective electrode surface area. These results indicate that a carefully selected perforation geometry, specifically an 8 mm diameter in this study, can reach an optimal level, improving the economic feasibility of the electrocoagulation process without dramatically decreasing its treatment performance.

#### 4. Conclusion

This study clearly demonstrated a two-phase approach that improved the electrocoagulation process for chromium removal. The initial optimization using Response Surface Methodology developed accurate models for

predicting removal efficiency and operational cost, identifying current density and reaction time as the main parameters. The following investigation into electrode surface modification showed that physical design significantly influences process performance and economics. Although solid electrodes offer maximum removal efficiency, perforating electrodes is a viable approach to substantially lower operating costs. An electrode featuring 8 mm perforations was determined to be the optimal design, providing an excellent balance between higher removal efficiency and lowered energy and material usage. This research highlights the importance of electrode geometry as an important consideration in the development of more efficient and cost-effective electrocoagulation systems for industrial wastewater treatment.





# ارزیابی اثرگذاری تغییر سطح الکتروود بر عملکرد فرایند انعقاد الکتریکی در حذف کروم با استفاده از الکتروودهای آهنی

امیرحسین رجبی پور<sup>۱\*</sup>، مبین وکیلی<sup>۲</sup>، حسن جمالی<sup>۳</sup>

- ۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه آب و محیطزیست، دانشکده مهندسی عمران و محیطزیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران (نویسنده مسئول) [amir.raj@aut.ac.ir](mailto:amir.raj@aut.ac.ir)
- ۲- دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه آب و محیطزیست، دانشکده مهندسی عمران و محیطزیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران
- ۳- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه آب و محیطزیست، دانشکده مهندسی عمران و محیطزیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران



<https://doi.org/10.22093/wwj.2025.544298.3511>

مقاله پژوهشی

## چکیده

واژه‌های کلیدی:  
انعقاد الکتریکی، الکتروود، کروم، طراحی آزمایش، مورفولوژی سطح

کروم یکی از آلاینده‌های بسیار سمی و سرطان‌زا در پساب‌های صنعتی مانند آبکاری، دباغی و تولید رنگ است و تهدیدی جدی برای سلامت انسان و محیطزیست محسوب می‌شود. انعقاد الکتریکی به دلیل سادگی، کارایی بالا و عدم نیاز به مواد شیمیایی خارجی، از روش‌های نوین و مورد توجه برای حذف آلاینده‌ها است. در این پژوهش، حذف کروم از محیط آبی با استفاده از این فرایند در دو فاز بررسی شد. در فاز اول، اثر چگالی جریان، غلظت اولیه و زمان واکنش بر کارایی حذف و هزینه عملیاتی با طراحی آزمایش سطح پاسخ، مدل‌سازی و بهینه‌سازی شد. نتایج نشان داد افزایش چگالی جریان همواره کارایی حذف را ارتقا می‌دهد، درحالی‌که اثر زمان تنها در چگالی‌های بالاتر از  $90 \text{ A/m}^2$  و در برهم‌کنش با غلظت اولیه مثبت بود. غلظت اولیه رفتار معکوس داشت و حداکثر  $8/1$  درصد کارایی را کاهش داد. از نظر هزینه عملیاتی، چگالی جریان عامل اصلی افزایش آن بود و رشد از  $48$  به  $161/57$   $\text{A/m}^2$ ،  $132$  درصد هزینه را افزایش داد، درحالی‌که زمان و غلظت آلاینده اثر محدودی داشتند. در فاز دوم، تأثیر مورفولوژی سطح الکتروود شامل الکتروود صاف و سه نوع سوراخ‌دار با قطرهای  $4$ ،  $8$  و  $15$  میلی‌متر در شرایط بهینه بررسی شد. کاهش سطح فعال در الکتروودهای سوراخ‌دار به‌ویژه در الکتروود  $4$  میلی‌متری موجب افت کارایی  $6/27$  درصدی شد، اما افزایش قطر از  $4$  به  $8$  میلی‌متر کارایی را  $2/63$  درصد بهبود داد. علاوه بر این، الکتروودهای سوراخ‌دار هزینه عملیاتی را تا  $30/9$  درصد کاهش دادند که ناشی از کاهش ولتاژ خروجی سیستم به دلیل سطح فعال کمتر و همچنین کاهش مقاومت اولیه خوردگی در نواحی لبه سوراخ‌ها است که در مجموع مصرف انرژی را پایین آورد. یافته‌ها بیانگر آن است که بهینه‌سازی هم‌زمان شرایط عملیاتی و طراحی سطح الکتروود می‌تواند کارایی حذف کروم را افزایش و هزینه عملیاتی فرایند را کاهش دهد. در این میان، الکتروود سوراخ‌دار  $8$  میلی‌متری به‌عنوان گزینه بهینه معرفی شد که علاوه بر دستیابی به کارایی حذف مناسب، کاهش چشمگیری در هزینه عملیاتی فرایند ایجاد کرد.



دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۱۸

اصلاح: ۱۴۰۴/۲/۶

پذیرش: ۱۴۰۴/۳/۲

از دستگاه خود برای اسکن و خواندن مقاله به صورت آنلاین استفاده کنید



برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام فرمایید:

رجب‌پور، ا.ح.، وکیلی، م.، جمالی، ح.، ۱۴۰۴، ارزیابی اثرگذاری تغییر سطح الکتروود بر عملکرد فرایند انعقاد الکتریکی در

حذف کروم با استفاده از الکتروودهای آهنی. *آب و فاضلاب*. ۳۶ (۲)، ۸۲-۱۰۶.

<https://doi.org/10.22093/wwj.2025.544298.3511>



© The Author(s).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)



## ۱- مقدمه

آب به عنوان یکی از اساسی ترین عناصر حیات، نقش تعیین کننده‌ای در سلامت انسان و پایداری اکوسیستم‌ها دارد. با رشد جمعیت، توسعه صنعتی و تغییرات کاربری اراضی، منابع آب سطحی و زیرزمینی با آلودگی‌های متنوعی مواجه شده‌اند که کیفیت و دسترسی به آب سالم را تحت تأثیر قرار داده است (Vakili et al., 2025).

یکی از آلاینده‌های مهم و خطرناک در منابع آبی، فلزات سنگین به ویژه کروم است که می‌تواند از طریق تخلیه پساب‌های صنعتی مانند صنایع آبکاری، دباغی، تولید رنگ و فولادسازی وارد محیط زیست شود (Kuroda et al., 2003). ترکیبات کروم به خصوص کروم شش ظرفیتی، دارای سمیت بالا، پایداری زیاد در محیط و قابلیت تجمع زیستی هستند و می‌توانند مشکلات جدی بهداشتی از جمله آسیب به کبد و کلیه، اختلالات پوستی و افزایش خطر ابتلا به سرطان را به دنبال داشته باشند (Hosseini et al., 2021).

مدیریت و کاهش غلظت کروم در منابع آبی، به دلیل اثرات زیان‌بار آن بر سلامت و محیط زیست، به یکی از اولویت‌های مهم در حوزه مهندسی محیط زیست تبدیل شده است. تاکنون روش‌های گوناگونی برای حذف کروم از آب و فاضلاب استفاده شده‌اند که شامل فرایندهای فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی می‌شوند. در این میان، روش‌های الکتروشیمیایی به عنوان یک رویکرد نوین و کارآمد، به ویژه در سال‌های اخیر توجه بسیاری را جلب کرده‌اند (Peng and Guo, 2020).

یکی از این روش‌ها، فرایند انعقاد الکتریکی است که با استفاده از انحلال کنترل شده الکتروودهای فلزی و تولید عوامل انعقادی در محل، قابلیت حذف طیف وسیعی از آلاینده‌ها از جمله یون‌های کروم را فراهم می‌آورد (Li and Wang, 2025). فرایند انعقاد الکتریکی یک روش تصفیه الکتروشیمیایی است که در آن از جریان الکتریکی مستقیم یا متناوب برای حل کردن کنترل شده فلزات الکتروود، معمولاً آهن یا آلومینیوم، در محیط آبی استفاده می‌شود (El-Gawad et al., 2023).

با اعمال جریان الکتریکی، یون‌های فلزی از سطح آند آزاد شده و در محیط پراکنده می‌شوند. این یون‌ها به سرعت در واکنش با گونه‌های هیدروکسیل موجود در آب، هیدروکسیدهای فلزی

نامحلول تشکیل می‌دهند که نقش عوامل انعقادی را ایفا می‌کنند. این مواد انعقادی با بار مثبت، ذرات معلق، کلوئیدی و مولکول‌های آلاینده با بار منفی را خنثی کرده و از طریق فرایندهای لخته‌سازی و ته‌نشینی، آن‌ها را از فاز مایع جدا می‌کنند (Genawi et al., 2020).

یکی از ویژگی‌های مهم انعقاد الکتریکی، تولید در جای عوامل انعقادی است. به این معنا که ماده شیمیایی منعقدکننده مستقیماً در محل و حین فرایند تولید می‌شود و نیازی به افزودن مواد شیمیایی خارجی نیست. علاوه بر خنثی‌سازی بار، لخته‌های تشکیل شده می‌توانند آلاینده‌ها را از طریق جذب سطحی، تشکیل کمپلکس و یا هم‌رسوبی حذف کنند. در این فرایند، کاتد نیز نقش مهمی ایفا می‌کند و اغلب با واکنش احیای آب یا یون‌های موجود، در پایداری pH و تشکیل لخته‌های مؤثرتر سهیم است (Thakur et al., 2023).

کارایی انعقاد الکتریکی به عوامل متعددی وابسته است که از جمله مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به جنس و شکل الکتروود، شدت و نوع جریان الکتریکی، زمان واکنش، فاصله بین الکتروودها، هدایت الکتریکی محلول و ویژگی‌های فیزیکی - شیمیایی آلاینده اشاره کرد. این فرایند به دلیل مزایایی همچون کارایی بالای حذف آلاینده‌ها، سادگی تجهیزات، امکان استفاده برای طیف وسیعی از پساب‌ها و کاهش مصرف مواد شیمیایی، در سال‌های اخیر به طور گسترده‌ای در تصفیه آب و فاضلاب مورد توجه قرار گرفته است (Thakur et al., 2019, Zeboudji et al., 2013).

الکتروودها به عنوان جزء کلیدی در فرایندهای الکتروشیمیایی، نقش تعیین کننده‌ای در بازدهی و کارایی سیستم‌های تصفیه آب و فاضلاب ایفا می‌کنند. در فرایند انعقاد الکتریکی، الکتروودها نه تنها به عنوان منبع تولید عوامل انعقادی عمل می‌کنند، بلکه مشخصات فیزیکی و شیمیایی آن‌ها بر سرعت واکنش‌ها، میزان انحلال فلز و در نهایت کارایی حذف آلاینده‌ها تأثیر مستقیم دارد؛ بنابراین الکتروودها نقش کلیدی در عملکرد فرایند انعقاد الکتریکی ایفا می‌کنند و مشخصات آن‌ها می‌تواند مستقیماً بر بازدهی فرایند تأثیر بگذارد. جنس الکتروود، نوع یون‌های فلزی آزاد شده در محلول را تعیین کرده و قابلیت لخته‌سازی را مشخص می‌کند. سطح مؤثر و تخلخل الکتروود بر میزان تماس یون‌های آزاد شده با آلاینده‌ها اثرگذار است، در حالی که ساختار سطحی و زبری می‌تواند در



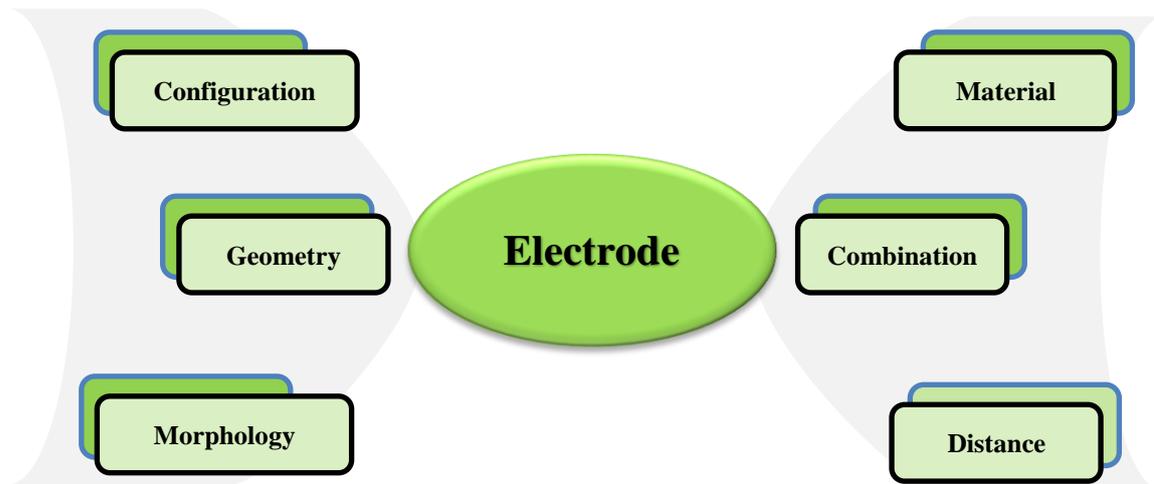


Fig. 1. Electrode based parameters

شکل ۱- پارامترهای وابسته به الکترود

سطحی علاوه بر بهبود کارایی حذف آلاینده، می‌توانند پدیده‌های نامطلوبی مانند پسیویشن<sup>۱</sup> یا تجمع رسوبات روی سطح الکترود را کاهش دهند. پسیویشن پدیده‌ای است که طی آن سطح الکترود در اثر تشکیل یک لایه نازک و پایدار از محصولات خوردگی یا اکسیدهای فلزی پوشانده می‌شود. این لایه غیرفعال مانع از ادامه انحلال الکترود و آزادسازی یون‌های فلزی شده و در نتیجه کارایی فرایند انعقاد الکتریکی را کاهش می‌دهد. به بیان دیگر، پسیویشن باعث افزایش مقاومت سطحی الکترود و محدود کردن واکنش‌های الکتروشیمیایی می‌شود و در شرایط عملیاتی طولانی مدت یکی از عوامل اصلی افت کارایی محسوب می‌شود. در نتیجه، طراحی بهینه سطح الکترود یکی از راهکارهای مؤثر برای ارتقاء عملکرد فرایند انعقاد الکتریکی است.

با توجه به پژوهش‌های گسترده‌ای که تاکنون در زمینه حذف کروم با روش انعقاد الکتریکی انجام شده است، در جدول ۱ پژوهش‌های انجام شده در سال‌های اخیر مرور شده‌اند. این پژوهش‌ها، شرایط عملیاتی مختلفی از جمله جنس الکترودها، چگالی جریان، زمان واکنش و سایر عوامل مؤثر بر فرایند را بررسی کرده‌اند. همچنین، در برخی از این پژوهش‌ها از روش‌های آماری برای طراحی و بهینه‌سازی آزمایش‌ها استفاده شده است.

هدف از این بررسی، ارائه یک دیدگاه جامع از پژوهش‌های اخیر، مقایسه عملکرد روش‌های مختلف و شناسایی نقاط قوت و

افزایش نواحی فعال الکتروشیمیایی نقش داشته باشد. علاوه بر این، فاصله بین الکترودها و آرایش هندسی آن‌ها در تعیین توزیع جریان و کاهش افت ولتاژ مؤثرند. همچنین ضخامت و مقاومت به خوردگی الکترودها، طول عمر و پایداری عملکرد سیستم را تحت تأثیر قرار می‌دهد. مجموعه این عوامل به صورت ترکیبی کارایی فرایند را در زمینه حذف آلاینده، کاهش مصرف انرژی و بهینه‌سازی هزینه عملیاتی مشخص می‌کنند (Hakizimana et al., 2017).

الکترودهای آهنی به دلیل قیمت مناسب، دسترسی آسان و توانایی بالای تولید یون‌های  $Fe^{2+}$  و  $Fe^{3+}$ ، یکی از پرکاربردترین گزینه‌ها در انعقاد الکتریکی محسوب می‌شوند. این یون‌ها پس از آزاد شدن از سطح آند، با یون‌های هیدروکسیل در محلول واکنش داده و هیدروکسیدهای آهن نامحلول تشکیل می‌دهند که به عنوان عامل انعقادی عمل کرده و آلاینده‌هایی مانند یون‌های کروم را از فاز مایع حذف می‌کنند. علاوه بر این، آهن در مقایسه با برخی فلزات دیگر، لخته‌های متراکمی تولید می‌کند که قابلیت ته‌نشینی بالاتری دارند (Mollah et al., 2001).

همان‌طور که در شکل ۱ پارامترهای وابسته به الکترود نشان داده شده است، ساختار و شکل سطح الکترود نقش مهمی در افزایش سطح تماس مؤثر و بهبود انتقال جرم دارد. الکترودهای با سطح تغییر شکل یافته، مانند سطوح شیاردار، سوراخ‌دار یا زبرشده، می‌توانند باعث افزایش سطح واکنش‌پذیر، توزیع یکنواخت‌تر جریان الکتریکی و بهبود فرایند انحلال فلز شوند. این تغییرات

<sup>1</sup> Passivation



جدول ۱- مهم‌ترین پژوهش‌های سال‌های اخیر انجام شده در خصوص حذف کروم با استفاده از روش انعقاد الکتریکی

**Table 1.** The most recent studies in chromium removal by electrocoagulation

Description	Design on experiment (DOE)	Parameters	Electrode type	Ref.
Removal of chromium from concentrated ammonium nitrate: electrocoagulation with iron electrode in plug flow reactor	–	Time, Flow rate, Current intensity	Fe, SS	(Costigan et al., 2025)
Optimization of chromium removal from synthetic wastewater through electrocoagulation process combined with natural coagulant using response surface methodology	RSM-CCD	pH, Current density, Reaction time, Initial concentration	Al	(Chen et al., 2024)
Modeling of chromium removal by electrocoagulation using iron electrode in a continuous reactor	–	Initial concentration, pH, Current density, Electrical conductivity	Fe	(Hojabri et al., 2024)
Energy-optimized electrocoagulation with brass electrode for simultaneous removal of nickel and chromium from synthetic wastewater: Parametric and economic evaluation	–	Current density, Initial concentration, Electrode spacing, Electrode material, Electrolyte type	Brass, Fe, Al, Cu	(Patel et al., 2024)
Economic performance evaluation of electrocoagulation for chromium treatment using Taguchi method	Taguchi L9	Current density, Initial concentration, pH	Al	(Kumar and Basu, 2023)
Simultaneous removal of chromium and fluoride by electrocoagulation–flotation: application of aluminum and iron electrode combination as anode	Classic	Anode material, pH, Current intensity, Cl <sup>-</sup> concentration, Initial concentration	Fe, Al	(Aoudj et al., 2015)

ارزیابی‌های انرژی و اقتصادی را نیز لحاظ کردند که دیدگاه جامع‌تری در زمینه انتخاب الکترود فراهم می‌سازد (Patel et al., 2024).

علاوه بر این، در پژوهش دیگری از روش طراحی آزمایش‌ها (Taguchi) برای ارزیابی عملکرد اقتصادی فرایند انعقاد الکتریکی در حذف کروم با الکترود آلومینیومی استفاده شد و اثر pH، چگالی جریان و غلظت اولیه را بهینه‌سازی شد (Kumar and Basu, 2023).

یکی از جنبه‌های نوآورانه این پژوهش، رویکرد مرحله‌ای و نظام‌مند آن در بررسی فرایند انعقاد الکتریکی برای حذف فلز سنگین کروم است. بر اساس مرور ادبیات، ابتدا اثر پارامترهای پرتکرار و تأثیرگذار مانند چگالی جریان، غلظت اولیه آلاینده و زمان واکنش به صورت جامع ارزیابی شد. سپس به منظور دستیابی به شرایط بهینه و تعیین روابط تعاملی بین متغیرها، از روش طراحی آزمایش رویه پاسخ مرکب مرکزی استفاده شد و سناریوهای بهینه فرایند استخراج شدند. نوآوری اصلی این پژوهش در گام بعدی

ضعف انعقاد الکتریکی در حذف کروم است تا زمینه‌ای برای بهبود و توسعه این روش فراهم شود. به عنوان نمونه، در پژوهشی با استفاده از الکترودهای آهنی و فولاد ضد زنگ در یک راکتور پلاگ فلو<sup>۱</sup>، به حذف کروم از آمونیوم نیترات پرداخته شد. نتایج این پژوهش نشان داد که تغییر جنس الکترود و نوع جریان می‌تواند بر بازده حذف تأثیرگذار باشد (Costigan et al., 2025).

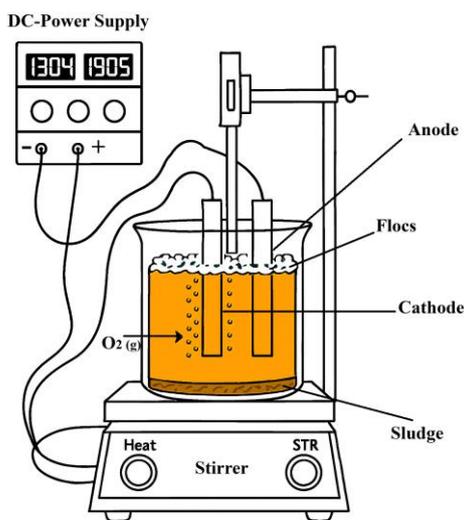
در پژوهش دیگری، چن و همکاران بهینه‌سازی حذف کروم از فاضلاب مصنوعی را با استفاده از الکترود آلومینیومی و بهره‌گیری از یک منعقدکننده طبیعی از طریق روش سطح پاسخ طرح مرکب مرکزی<sup>۲</sup> انجام و نشان دادند که پارامتر pH، اثر تعیین‌کننده‌ای بر بازدهی فرایند دارند (Chen et al., 2024).

در همین راستا، پاتل و همکاران در یک پژوهش کامل، با استفاده از الکترودهای متنوع شامل برنج، آهن، آلومینیوم و مس، به حذف هم‌زمان نیکل و کروم از فاضلاب مصنوعی پرداختند و

<sup>1</sup> Plug Flow Reactor (PER)

<sup>2</sup> Response Surface Method – Central Composite Design (RSM-CCD)





**Fig. 2.** Electrocoagulation reactor  
 شکل ۲- سیستم انعقاد الکتریکی استفاده شده

یکنواختی در محلول و افزایش بازده فرایند، از دستگاه همزن الکترومغناطیسی Hotplate Stirrer – LabTech استفاده شد. سرعت همزن روی ۶۰ دور بر دقیقه تنظیم شد و یک میله مغناطیسی استوانه‌ای به طول ۵ سانتی‌متر برای مخلوط‌سازی محتویات سلول به کار رفت.

اندازه‌گیری غلظت کروم (VI) بر اساس روش ۸۰۲۳ مورد تأیید سازمان حفاظت محیط‌زیست ایالات متحده<sup>۱</sup> و با بهره‌گیری از دستگاه اسپکتروفتومتر مدل Hatch DR6000 انجام شد (Zongo, et al., 2009). برای این منظور، پودر معرف اختصاصی تشخیص کروم مناسب این دستگاه، تهیه شده از آزمایشگاه دکتر بغدادی، استفاده شد. عملیات توزین الکترودها و سایر مواد با ترازوی دیجیتال مدل Kern-PLS360 با دقت ۰/۱۰۰ گرم انجام شد. کلیه آزمایش‌ها تحت شرایط یکنواخت و در دمای محیط آزمایشگاهی (۲۳ تا ۲۵ درجه سلسیوس) اجرا شد.

در این پژوهش، به‌منظور تغییر سطح مؤثر الکترودها، عملیات سوراخ‌کاری بر روی صفحات الکترودی انجام شد. همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، سوراخ‌ها در سه قطر مختلف ۰/۴، ۰/۸ و ۱/۵ میلی‌متر ایجاد شدند تا اثر تغییر سطح تماس و عبور جریان بر کارایی فرایند بررسی شود. عملیات سوراخ‌کاری با استفاده از

تعریف یک پارامتر جدید برای بررسی سطح مؤثر الکترودها و نقش آن در کارایی فرایند است. موضوعی که تاکنون کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در نهایت، با طراحی و استفاده از الکترودهای سوراخ‌دار و بهره‌گرفتن از طراحی آزمایش کلاسیک، اثر این اصلاح ساختاری در شرایط بهینه بر کارایی حذف کروم و هزینه عملیاتی بررسی شد که می‌تواند رویکردی نوین در ارتقای عملکرد سامانه‌های انعقاد الکتریکی محسوب شود.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- مواد شیمیایی و تجهیزات استفاده شده

در این پژوهش، سلول انعقاد الکتریکی مورد استفاده به یک منبع تغذیه جریان مستقیم مدل TwinTex-DC-SP1305D متصل بود که وظیفه انتقال جریان الکتریکی به الکترودها را بر عهده داشت. الکترودها از جنس آهن به ابعاد ۸×۱۰ سانتی‌متر با ضخامت ۰/۱۵ سانتی‌متر انتخاب شد که ۷ سانتی‌متر از طول آن‌ها درون محلول قرار گرفت. فاصله بین الکترودها در تمام آزمایش‌ها ۱/۵ سانتی‌متر ثابت نگه داشته شد. این فاصله، همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، سلول مورد استفاده یک بشر شیشه‌ای استاندارد ۱ لیتری بود. این سیستم شامل دو الکترودهای موازی با آرایش تک‌قطبی بود که به منبع تغذیه متصل شدند. برای ایجاد

<sup>1</sup> 1,5- Diphenylcarbazide Method



آلاینده‌ها لحاظ شده و اعتبار علمی نتایج افزایش یافته است.

## ۲-۲- روش انجام آزمایش‌ها

پیش از آغاز آزمایش‌ها، تمامی مراحل با رعایت استانداردهای معتبر بین‌المللی طراحی و اجرا شد. به منظور تهیه محلول استوک کروم (VI) با غلظت ۱۰۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر، مقدار ۲۸/۲۹۷ گرم از پتاسیم دی‌کرومات با خلوص ۹۹ درصد (خریداری شده از شرکت Merck) در یک لیتر آب مقطر حل شد. غلظت اولیه کروم، به‌عنوان یکی از پارامترهای اصلی واکنش، در بازه ۵۰ تا ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر تنظیم شد و برای دستیابی به غلظت‌های مورد نظر، محلول استوک به‌طور متناسب رقیق‌سازی شد. به منظور افزایش هدایت الکتریکی محلول، ۱ گرم در لیتر نمک NaCl با خلوص ۹۹/۲ درصد (Merck) به آن افزوده شد. هرچند pH و هدایت الکتریکی جزء متغیرهای اصلی پژوهش نبودند، مقدار آن‌ها در طول آزمایش‌ها اندازه‌گیری شد تا از قرار داشتن در محدوده‌های بهینه اطمینان حاصل شود (Kumar et al., 2023).

الکتروودها پیش از هر آزمایش با محلول رقیق HCl شسته شده و سپس با کاغذ سمباده با درجه زبری ۸۰۰ صیقل داده شدند. پس از شستشو با آب مقطر، الکتروودها به‌منظور خشک‌سازی به مدت ۴ ساعت در آون با دمای ۵۵ درجه سلسیوس قرار گرفتند و در ادامه وزن آن‌ها با دقت ثبت شد. اجرای این مراحل باهدف تضمین صحت نتایج و جلوگیری از ورود آلاینده‌های خارجی به محلول انجام شد.

دستگاه دریل ستونی رومیزی مجهز به مته‌های فولادی پرسرعت<sup>۱</sup> انجام شد که قابلیت ایجاد سوراخ‌های دقیق با لبه‌های یکنواخت را فراهم کرد. پیش از سوراخ‌کاری، محل دقیق سوراخ‌ها بر روی سطح الکتروود با استفاده از قلم سنبه علامت‌گذاری شد تا از انحراف مته جلوگیری شود. برای جلوگیری از تغییر شکل یا خمیدگی صفحات حین عملیات، الکتروودها در گیره نگهدارنده محکم شده و فرایند در سرعت مناسب (۲۰۰ دور بر دقیقه) انجام شد.

برای ارائه تحلیل دقیق عملکرد الکتروودها، سطح مؤثر مستغرق هر الکتروود با در نظر گرفتن ابعاد واقعی و تأثیر سوراخ‌ها محاسبه شد. سطح فعال الکتروود بدون سوراخ برابر  $56 \text{ cm}^2$  بود. الکتروودهای سوراخ‌دار نیز بر اساس قطر سوراخ‌ها و مساحت ازدست‌رفته سطح، محاسبه شدند. سطح فعال الکتروود سوراخ‌دار ۱۵ میلی‌متری برابر  $38/233 \text{ cm}^2$ ، الکتروود سوراخ‌دار ۸ میلی‌متری برابر  $43/434 \text{ cm}^2$  و الکتروود سوراخ‌دار ۴ میلی‌متری برابر  $39/412 \text{ cm}^2$  بود. کاهش سطح مؤثر نسبت به الکتروود بدون سوراخ به ترتیب  $34/4$ ،  $20/2$  و  $29/6$  درصد برای الکتروودهای ۱۵، ۸ و ۴ میلی‌متری بود. این داده‌ها امکان مقایسه دقیق بین الکتروودها و تحلیل اثر سوراخ‌کاری بر عملکرد و کارایی انعقاد الکتریکی را فراهم می‌کند. به این ترتیب، تغییرات در سطح فعال مستغرق که الکتروود ۸ میلی‌متری کمترین میزان کاهش سطح فعال و الکتروود ۱۵ میلی‌متری بیشترین کاهش مساحت فعال الکتروود را داشتند، به‌طور مستقیم در تحلیل انرژی مصرفی و کارایی حذف

<sup>۱</sup> High Speed Steels (HSS)

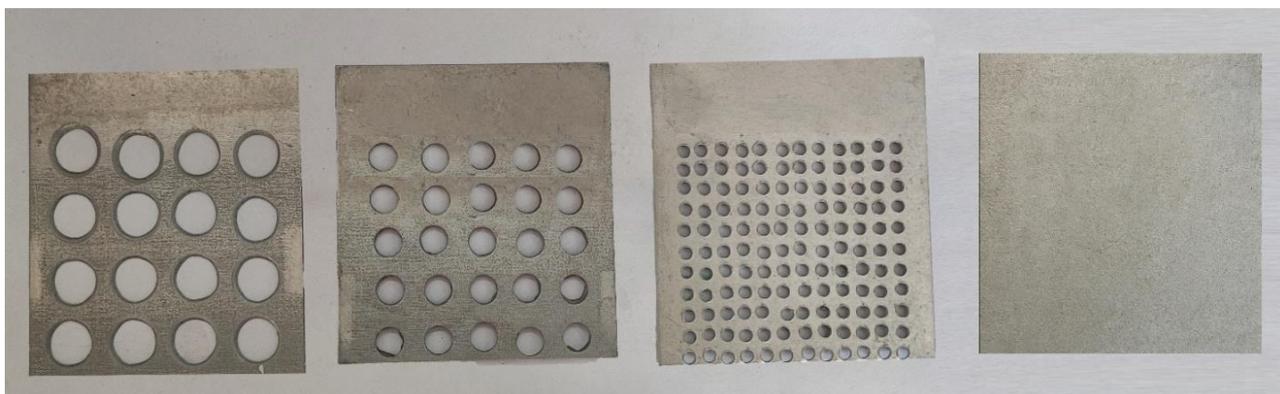


Fig. 3. Different electrode surface morphology

شکل ۳- نحوه تغییر در سطح الکتروودهای مورد استفاده



گرفته شد تا شرایط دوران پذیرش طرح فراهم شود (Khorram and Fallah, 2018).

این طراحی امکان برآزش مدل ریاضی درجه دو و استخراج اثرات خطی، درجه دوم و تعاملی متغیرها بر پاسخها را فراهم کرد. پس از طراحی آزمایشها با استفاده از روش RSM-CCD با استفاده از نرم افزار Design Expert 12 آزمایشها در انعقاد الکتریکی با شرایط مشخص شده انجام شدند. در نتیجه، پس از به دست آمدن معادلات مربوط به مدل‌های کارایی حذف و هزینه عملیاتی، اعتبارسنجی آنها با استفاده از شاخص‌های آماری مانند ضریب تعیین ( $R^2$ )، آنالیز واریانس<sup>۲</sup> و بررسی نمودار خطای باقیماندهها<sup>۳</sup> انجام شد. این تحلیلها به منظور ارزیابی دقت مدلها و اطمینان از برآزش مناسب آنها بر داده‌های تجربی انجام شد (Bajpai et al., 2021). پس از تعیین شرایط بهینه، برای کمی‌سازی اثر سطح مؤثر الکتروود به‌عنوان یک پارامتر نو، آزمایش‌های تکمیلی با الکتروود آهنی صاف و سوراخ‌دار (الگوی یکنواخت) انجام شد. سطح مؤثر هر پیکربندی با در نظر گرفتن مساحت خالص محاسبه شد. نتایج این بخش با شرایط بهینه استخراج شده از CCD مقایسه شد تا سهم واقعی تغییر شکل سطح در افزایش کارایی، کاهش انرژی و بهبود هزینه عملیاتی روشن شد. پس از پایان هر آزمایش، سلول انعقاد الکتریکی به مدت ۳۰ دقیقه در حالت سکون قرار گرفت تا فرایند ته‌نشینی محلول و ذرات معلق به‌طور کامل انجام شود. این مرحله علاوه بر ایجاد شرایط یکسان برای نمونه‌برداری، به بهبود رسوب‌گذاری لخته‌ها نیز کمک کرد. برای اندازه‌گیری غلظت یون کروم، ۵۰ میلی‌لیتر نمونه از بخش میانی سلول با استفاده از پیپت برداشت شد. سپس برای حذف ذرات ریز و ناخالصی‌ها، نمونه از کاغذ صافی عبور داده شد تا از ورود لخته‌های باقیمانده به دستگاه جلوگیری و دقت نتایج تضمین شود. در ادامه، نمونه‌های برداشت شده بر اساس دستورالعمل استاندارد ۸۰۲۳ تا ۱۲۵ برابر رقیق‌سازی شدند تا از تأثیر غلظت‌های بالای کروم بر عملکرد اسپکتروفتومتر پیشگیری شود. این فرایند رقیق‌سازی در سه مرحله و هر بار با پنج مرتبه تکرار انجام شد.

به‌منظور بررسی اثر عوامل مؤثر بر فرایند، مدل‌سازی و بهینه‌سازی شرایط عملیاتی، از روش رویه پاسخ استفاده شد. این روش یک ابزار آماری ریاضی برای مدل‌سازی و تحلیل فرایندهایی است که پاسخ آنها تحت تأثیر چند متغیر قرار دارد. در میان طرح‌های مختلف RSM، طرح مرکب مرکزی به دلیل کارایی بالا در برآزش مدل‌های درجه دوم و امکان بررسی اثرات تعاملی عوامل، انتخاب شد. در این پژوهش سه پارامتر مستقل شامل غلظت اولیه کروم (VI)، چگالی جریان و زمان واکنش به‌عنوان متغیرهای اصلی در نظر گرفته شدند. با تعریف این سه پارامتر در پنج سطح مختلف، ماتریس آزمایشی شامل ۲۰ آزمایش بر اساس طرح مرکب مرکزی ایجاد شد که شامل ۶ نقطه فاکتوریل، ۶ نقطه محوری و ۸ نقطه مرکزی بود. در این طراحی آزمایش، لازم است مقدار واقعی متغیرها به‌صورت کدنویسی شده بیان شوند تا مقایسه و تحلیل آنها ساده‌تر شود. کدنویسی متغیرها باعث می‌شود که اثر عوامل مختلف در یک بازه استاندارد (بین -۱ تا +۱) بررسی شود و امکان مقایسه بین پارامترهایی که دارای واحدها و محدوده‌های متفاوت هستند فراهم شود. برای این منظور از معادله ۱ استفاده می‌شود (Khorram and Fallah, 2018)

$$X_i = \frac{(X_i - X_0)}{\delta X} \quad (1)$$

که در آن  $X_0$  مقدار واقعی متغیر،  $X_i$  مقدار متغیر در نقطه مرکزی و  $\delta X$  بازه تغییرات متغیر است. به این ترتیب، تمامی مقدار متغیرها به‌صورت بدون واحد و در محدوده‌ای استاندارد قرار می‌گیرند. علاوه بر این، یکی از ویژگی‌های مهم طرح مرکب مرکزی قابلیت دوران‌پذیری<sup>۱</sup> آن است. از آنجاکه مکان نقطه بهینه پیش از انجام آزمایش مشخص نیست، لازم است از طرحی استفاده شود که در تمامی جهت‌ها دقت یکسانی داشته باشد. این موضوع از طریق انتخاب مقدار مناسب برای ضریب  $\alpha$  محقق می‌شود. مقدار  $\alpha$  از رابطه  $\alpha = (N_F)^{1/4}$  محاسبه می‌شود که در آن  $N_F = 2^K$  و  $K$  تعداد فاکتورهای اصلی دوران‌پذیر را نشان می‌دهد. در این پژوهش مقدار  $\alpha$  برابر ۱/۶۸۲ در نظر

<sup>2</sup> Analysis of Variance (ANOVA)

<sup>3</sup> Residuals Plots

<sup>1</sup> Rotatability



برق صنعتی و متوسط قیمت آهن عمده‌فروشی در بازار ایران در سال ۱۴۰۴<sup>۲</sup> هستند. خوردگی الکترودها را می‌توان از کاهش وزن الکترودها در اثر اکسیداسیون آند تعریف کرد. این کاهش از طریق کم کردن وزن الکترودها در آخر آزمایش از وزن اندازه‌گیری شده الکترودها در ابتدای آزمایش به دست می‌آید. همچنین در طول آزمایش ولتاژ خروجی منبع تغذیه در بازه‌های زمانی ۳۰ ثانیه‌ای ثبت شد. ثبت این داده‌ها به دلیل اهمیت ولتاژ در محاسبه انرژی مصرفی فرایند انجام شد، زیرا ولتاژ یکی از مؤلفه‌های اصلی در تعیین مصرف انرژی است که با استفاده از معادله ۴ محاسبه می‌شود (Kumar et al., 2023)

$$C_{\text{energy}} = \int_0^t V I dt / v = V I t / v \quad (4)$$

که در آن

$C_{\text{energy}}$  انرژی الکتریکی مصرفی بر حسب کیلووات ساعت بر مترمکعب است،  $I$  چگالی جریان بر حسب آمپر،  $V$  ولتاژ بر حسب ولت،  $t$  زمان بر حسب دقیقه و  $v$  حجم سلول انعقاد الکتریکی است.

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- مدل‌سازی فرایند حذف کروم با انعقاد الکتریکی

برای تحلیل و پیش‌بینی کارایی حذف کروم و هزینه عملیاتی در فرایند انعقاد الکتریکی، از روش طراحی آزمایش و مدل‌سازی آماری استفاده شد. در این پژوهش، سه پارامتر اصلی شامل چگالی جریان، زمان واکنش و غلظت اولیه به‌عنوان متغیرهای ورودی در نظر گرفته شدند و کارایی حذف کروم و هزینه عملیاتی فرایند به‌عنوان متغیر پاسخ انتخاب شدند. به‌منظور تعیین بازه مناسب تغییرات این پارامترها، ابتدا مجموعه‌ای از پیش‌آزمایش‌ها انجام و محدوده بهینه اولیه مشخص شد. سپس در قالب طرح مرکب مرکزی، آزمایش‌ها به‌گونه‌ای طراحی شدند که امکان بررسی اثرات خطی، درجه دوم و متقابل متغیرها بر کارایی حذف فراهم شود (Kumar et al., 2024).

در جدول ۲ سطوح در نظر گرفته شده برای پارامترهای ورودی ارائه شده است. داده‌های حاصل از آزمایش‌ها با برآزش معادلات چندجمله‌ای درجه دوم تحلیل شدند و مدل ریاضی کارایی حذف

<sup>۲</sup> قیمت دلار ۹۰۰۰۰ تومان در نظر گرفته شد.

پس از تعیین غلظت ثانویه کروم بعد از اتمام آزمایش کارایی حذف کروم مطابق معادله ۲ محاسبه شد (Kumar et al., 2023)

$$\text{Chromium removal efficiency (\%)} = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100 \quad (2)$$

که در آن

$C_0$  و  $C_t$  مربوط به غلظت آلاینده پس از انجام آزمایش در محلول تصفیه شده و غلظت اولیه آلاینده است.

هزینه‌های عملیاتی فرایندهای تصفیه آب و فاضلاب شامل بخش‌های مختلفی از جمله هزینه انرژی الکتریکی مصرفی، هزینه الکترود و مواد شیمیایی، هزینه نیروی انسانی، هزینه تعمیر و نگهداری تجهیزات و هزینه‌های جانبی مانند دفع لجن و سایر ضایعات است. با این حال، با توجه به ماهیت فرایند مورد مطالعه، برخی از این مؤلفه‌ها سهم بیشتری در هزینه‌های کلی دارند. در فرایند انعقاد الکتریکی، بخش عمده هزینه عملیاتی مربوط به مصرف انرژی الکتریکی و میزان انحلال الکترودها است؛ زیرا عملکرد سیستم به‌طور مستقیم با این دو عامل مرتبط است. سایر هزینه‌ها مانند دستمزد نیروی انسانی، تعمیر و نگهداری، یا دفع لجن به‌شدت وابسته به شرایط محلی، نوع واحد تصفیه و سیاست‌های اقتصادی هر منطقه هستند و به همین دلیل در پژوهش‌های آزمایشگاهی که با مقیاس کوچک و شرایط کنترل شده انجام می‌شوند، قابل تعمیم‌پذیری و محاسبه دقیق نیستند. بر این اساس مطابق معادله ۳، در این پژوهش تنها هزینه‌های مربوط به مصرف انرژی الکتریکی و انحلال الکترودها به‌عنوان شاخص‌های اصلی هزینه عملیاتی در نظر گرفته شدند (Ebba et al., 2021). این انتخاب علاوه بر ساده‌سازی محاسبات، امکان مقایسه دقیق‌تر کارایی فرایند تحت شرایط مختلف عملیاتی را فراهم می‌کند

$$\text{Operation Cost} = aC_{\text{energy}} + bC_{\text{electrodes}} \quad (3)$$

که در آن

$C_{\text{energy}}$  بر حسب  $(\text{kWh}/\text{m}^3)$  و  $C_{\text{electrodes}}$  بر حسب  $(\text{kg Fe}/\text{m}^3)$  کمیت‌های محاسبه شده در تصفیه کروم با استفاده از فرایند انعقاد الکتریکی هستند.  $a$  و  $b$  به ترتیب ضرایب<sup>۱</sup> مربوط به متوسط قیمت

<sup>۱</sup>  $C_{\text{energy}} = 0.0108 \text{ US } \$ / \text{KWh}$ ,  $C_{\text{electrodes}} = 0.507 \text{ US } \$ / \text{Kg Fe}$



جدول ۲- محدوده پارامترهای استفاده شده در مدل  
Table 2. The range of model used in the model

Parameter	Unit	Symbol	Parameter range				
			-α	-1	0	1	α
Time	Min	A	3	5.5	9	12.5	15
Current density	A/m <sup>2</sup>	B	20	48	90	132	160
Initial concentration	Mg/L	C	50	141	275	409	500

عملیاتی و شناسایی عوامل کلیدی، ابزار مناسبی فراهم آورد (Bajpai et al., 2021, Kumar et al., 2024).

### ۲-۳- ارزیابی دقت مدل‌های مختلف فرایند

اعتبارسنجی مدل یکی از مراحل کلیدی در روش طراحی آزمایش‌های سطح پاسخ است که هدف آن اطمینان از صحت، دقت و توانایی پیش‌بینی مدل توسعه یافته برای کارایی حذف و هزینه عملیاتی فرایند است. برای ارزیابی قابلیت اعتماد مدل‌ها، چند ابزار آماری مهم به کار گرفته شد تا عملکرد مدل به‌طور جامع بررسی شود (Bajpai et al., 2021). ابتدا، ضریب تعیین محاسبه شد تا میزان توانایی مدل در توضیح تغییرات مشاهده شده در داده‌های تجربی مشخص شود و نشان دهد چه درصدی از تغییرات کارایی حذف یا هزینه عملیاتی توسط مدل قابل پیش‌بینی است. علاوه بر این، آنالیز واریانس برای بررسی معناداری مدل و هر یک از پارامترهای آن انجام شد و اثرات تعاملی و مربعی عوامل نیز ارزیابی شد تا اطمینان حاصل شود که مدل رفتار سیستم را به درستی شبیه‌سازی می‌کند. در نهایت، نمودارهای خطای باقیمانده تحلیل شدند تا توزیع خطاها و هرگونه انحراف احتمالی از مفروضات مدل شناسایی شود. ترکیب این سه روش اعتبارسنجی چارچوبی جامع و قابل اعتماد برای تأیید دقت و صحت مدل را فراهم می‌آورد و اطمینان می‌دهد که نتایج مدل را می‌تواند برای پیش‌بینی عملکرد فرایند در شرایط مختلف استفاده شود (Bajpai et al., 2021).

### ۲-۳-۱- اعتبارسنجی مدل‌های مختلف با ضریب تعیین و نمودارهای خطای مانده

یکی از مهم‌ترین معیارهای آماری برای ارزیابی دقت و اعتبار مدل‌های ریاضی، ضریب تعیین است. این ضریب نشان می‌دهد چه

کروم و هزینه عملیاتی به ترتیب در قالب معادلات ۵ و ۶ بیان شد. این مدل‌ها با دقت زیادی قادر به پیش‌بینی عملکرد فرایند در شرایط مختلف بوده و مبنای بهینه‌سازی شرایط عملیاتی قرار گرفت

$$\text{Removal Efficiency} = 89.12 + 2.48 A + 2.33 B - 3.62 C + 1.27 A^2 \quad (5)$$

$$\text{Operation Cost} = 0.4272 + 0.0599 A + 0.1847 B + 0.0345 C - 0.0293 AC \quad (6)$$

در مدل‌سازی کارایی حذف و هزینه عملیاتی فرایند بر اساس روش طراحی آزمایش‌ها سطح پاسخ که یکی از متداول‌ترین روش‌ها برای بررسی تأثیر چندین عامل بر پاسخ و بهینه‌سازی فرایندها به شمار می‌آید، ابتدا مدل اولیه به صورت یک مدل درجه دوم<sup>۱</sup> در نرم‌افزار طراحی و تحلیل داده تعریف شد. این مدل شامل اثرات خطی، مربعی و تعاملی تمامی عوامل در نظر گرفته شده بود و هدف آن، شبیه‌سازی دقیق رفتار سیستم و پیش‌بینی پاسخ کارایی حذف و هزینه عملیاتی در سطوح مختلف پارامترها بود. پس از تعریف مدل درجه دوم، با استفاده از تحلیل آماری نتایج، پارامترهای غیر معنادار شناسایی شدند. این پارامترها اثر قابل توجهی بر پاسخ نشان نمی‌دهند و حضور آن‌ها موجب پیچیدگی غیرضروری مدل می‌شود. در این مرحله، مدل اولیه اصلاح شد و پارامترهای غیر اثرگذار حذف شد تا مدل کاهش یافته<sup>۲</sup> حاصل شود. مدل کاهش یافته مانند مدل کارایی حذف معادله ۵، ضمن حفظ دقت پیش‌بینی، ساده‌تر و قابل فهم‌تر بوده و تفسیر اثرات عوامل بر پاسخ را تسهیل می‌کند. این رویکرد امکان می‌دهد که مدل هم از نظر آماری معتبر باشد و هم برای بهینه‌سازی فرایند، پیش‌بینی شرایط

<sup>1</sup> Quadratic

<sup>2</sup> Reduced Model



جدول ۳- ضریب تعیین برای مدل‌های مختلف  
Table 3. Coefficient of determination of model

Model	Unit	Transformation	Coefficient of determination		
			R <sup>2</sup>	Adjusted R <sup>2</sup>	Predicted R <sup>2</sup>
Removal efficiency	%	None	0.9588	0.8673	0.7845
Operation cost	US \$	None	0.9048	0.8794	0.7916

رفتار باقیمانده‌ها تحلیل شود. این نمودارها اطلاعات مفیدی درباره عدم تطابق داده‌ها، رفتارهای غیرعادی مدل و میزان نرمال بودن توزیع باقیمانده‌ها ارائه می‌دهند. همچنین نشان می‌دهند که توزیع باقیمانده‌ها از الگوی خاصی پیروی نمی‌کند. بررسی نمودارهای باقیمانده ارائه شده در شکل‌های ۴ و ۵ نشان می‌دهد که نقاط به‌طور تصادفی در اطراف محور صفر پراکنده شده‌اند. این پراکندگی تصادفی بیانگر آن است که خطاها دارای توزیع نرمال بوده و واریانس آن‌ها همسان است. علاوه بر این، نبود روند یا الگوی منظم در باقیمانده‌ها نشان می‌دهد که مدل دچار بایاس سیستماتیک نبوده و فروض آماری رگرسیون به‌درستی برقرار است؛ بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که مدل ارائه شده برازش مناسبی دارد و برای پیش‌بینی کارایی حذف و هزینه عملیاتی قابل‌اعتماد است (Bajpai et al., 2021).

### ۳-۲-۲- آنالیز واریانس و بررسی اثرگذاری پارامترهای عملیاتی مدل‌های مختلف

آنالیز واریانس ابزاری است که برای بررسی اثر پارامترهای مختلف در مدل‌ها و تعیین اهمیت هر پارامتر در توضیح تغییرات مشاهده شده در پاسخ‌ها استفاده می‌شود (Bajpai et al., 2021). در این پژوهش، پارامترهای مختلف از جمله چگالی جریان، زمان واکنش و غلظت اولیه به‌عنوان متغیرهای مستقل در نظر گرفته شدند و اثر آن‌ها بر روی پاسخ موردنظر یعنی کارایی حذف بررسی شد. برای هرکدام از این پاسخ‌ها، آنالیز واریانس نشان می‌دهد که چه پارامترهایی و چه برهم‌کنش‌هایی بین این پارامترها تأثیرگذارتر از سایرین هستند و چگونه این تأثیرات می‌توانند به بهینه‌سازی فرایند کمک کنند.

نسبتی از تغییرات متغیر پاسخ توسط مدل پیش‌بینی شده قابل توضیح است. مقدار  $R^2$  بین صفر و یک قرار دارد. به‌طوری‌که مقدار نزدیک به یک بیانگر انطباق بالای داده‌های تجربی با مقدار پیش‌بینی شده توسط مدل هستند، در حالی که مقدار کمتر نشان‌دهنده ضعف مدل در توضیح تغییرات پاسخ می‌باشند. در واقع، ضریب تعیین میزان کاهش خطای باقیمانده را نسبت به تغییرات کل داده‌ها مشخص می‌کند و هرچه مقدار آن بیشتر باشد، مدل قدرت پیش‌بینی بیشتری دارد (Ebba et al., 2022, Bajpai et al., 2021).

به‌عنوان مثال همان‌طور که در جدول ۳ نشان داده شده است، برای مدل کارایی حذف، مقدار  $R^2$  به‌دست‌آمده  $0.9588$  بود که نشان داد مدل موردبررسی توانسته است بخش قابل‌توجهی از تغییرات داده‌ها را توضیح دهد و از نظر برازش اولیه بسیار مناسب به نظر می‌رسد. با این حال، از آنجاکه مقدار  $R^2$  همواره با افزودن متغیرهای جدید افزایش می‌یابد، استفاده از ضریب تعیین تعدیل‌شده<sup>۱</sup> اهمیت پیدا می‌کند. این شاخص اثر تعداد متغیرها و درجه آزادی را نیز در نظر می‌گیرد و در این پژوهش برابر با  $0.8673$  به‌دست آمد. اختلاف آن با مقدار  $R^2$  نشان می‌دهد که بخشی از متغیرهای وارد شده به مدل ارزش توضیحی محدودی داشته و موجب کاهش کارایی واقعی مدل شده‌اند. هرچند این وضعیت می‌تواند نشانه‌ای از بیش‌برازش<sup>۲</sup> مدل باشد، اما نتایج آنالیز واریانس، نمودارهای خطای باقیمانده و مقایسه مقدار پیش‌بینی شده با داده‌های واقعی بیانگر آن است که مدل همچنان دقت و قابلیت اعتماد مناسبی برای تحلیل و پیش‌بینی فرایند دارد.

در نهایت، نمودارهای خطای مانده مدل کارایی حذف و مدل هزینه عملیاتی به ترتیب در شکل‌های ۴ و ۵ بررسی شد تا توزیع و

<sup>1</sup> Adjusted R<sup>2</sup>

<sup>2</sup> Overfitting



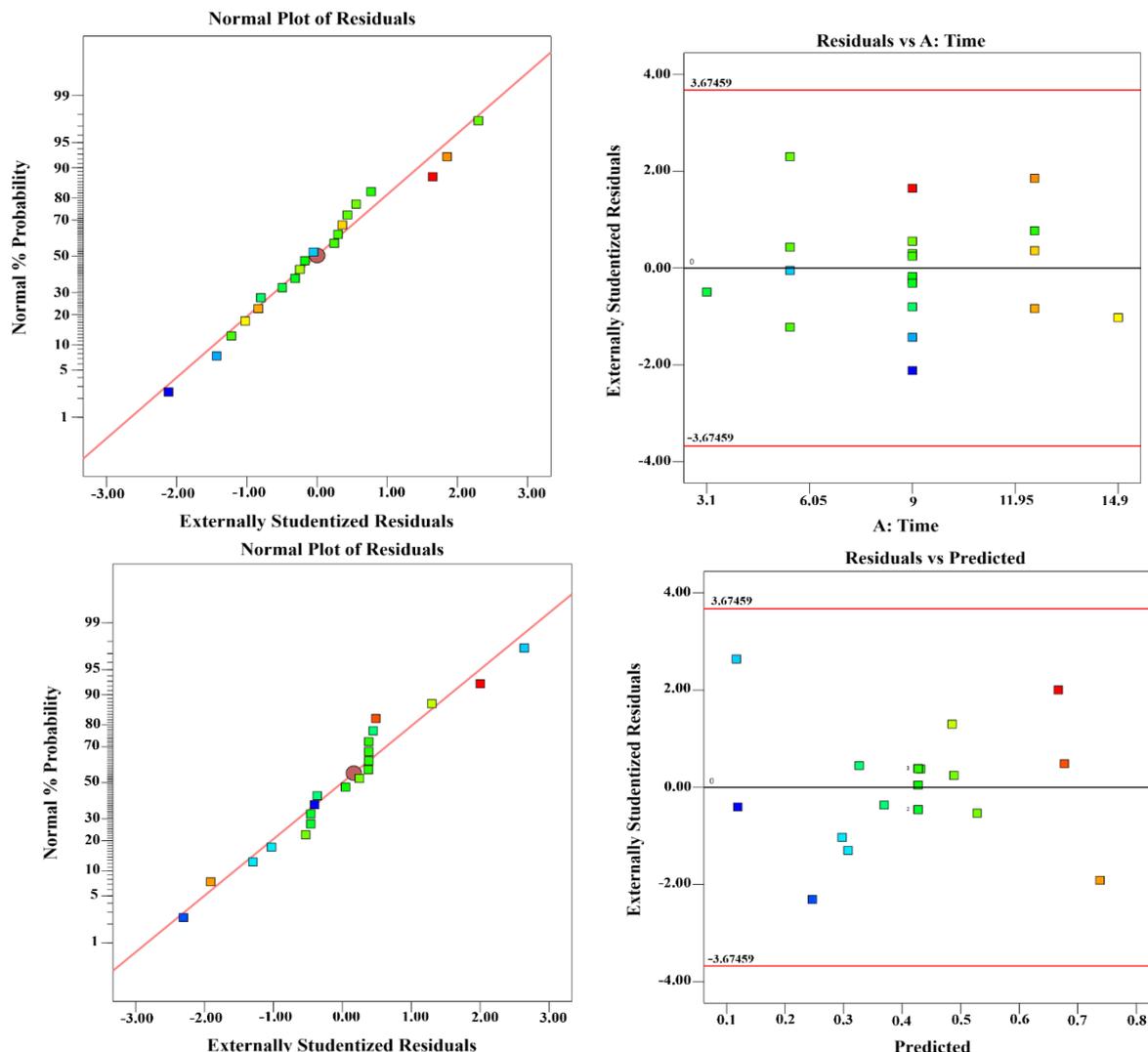


Fig. 4. Residual plots of removal efficiency model  
 شکل ۴- نمودار خطای مانده برای مدل کارایی حذف

مدل هزینه عملیاتی فرایند پارامتر چگالی جریان با داشتن پارامتر P بسیار پایین و مقدار F برابر با ۱۱۹/۷۶ در مدل تأثیرگذار بوده و میزان اثرگذاری آن در مدل نسبت به سایر پارامترها نیز بیشتر است.

### ۳-۳- بهینه‌سازی اثرات هم‌زمان پارامترهای عملیاتی بر پاسخ‌های مختلف

فرایند انعقاد الکتریکی به دلیل تأثیرگذاری عوامل متعدد، از جمله زمان واکنش، چگالی جریان اعمالی و غلظت آلاینده، یک سیستم پیچیده محسوب می‌شود. به منظور یافتن شرایط بهینه برای حذف

آنالیز واریانس در این پژوهش با استفاده از معیار P-value و مقایسه مقدار آن با سطح اطمینان ۹۵ درصد برای هر پارامتر انجام شد. با در نظر گرفتن سطح اطمینان ۹۵ درصد، پارامترهایی که مقدار P آن‌ها کمتر از ۰/۰۵ باشد، به عنوان پارامترهای تأثیرگذار در مدل شناخته می‌شوند. علاوه بر این، با تحلیل نتایج آنالیز واریانس، پارامترهای غیر تأثیرگذار ( $P\text{-value} > 0/05$ ) شناسایی و همان‌طور که در جدول ۴ نشان داده شده است، از مدل حذف شدند تا دقت مدل‌ها افزایش یابد. این اصلاحات باعث کاهش پیچیدگی مدل و تمرکز بر پارامترهای کلیدی و اثرگذار شد که پیش‌بینی پذیری و کارایی آن را بهبود بخشید. به عنوان مثال در



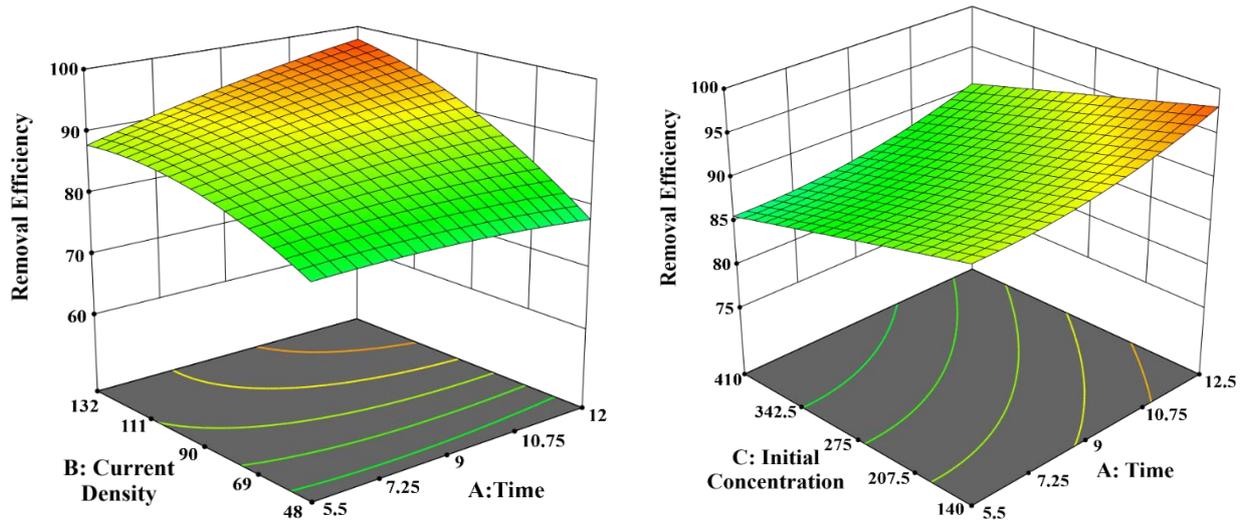


Fig. 5. Residual plots of operation cost model

شکل ۵- نمودار خطای مانده برای مدل هزینه عملیاتی

جدول ۴- آنالیز واریانس پارامترهای عملیاتی اثرگذار مدل‌های مختلف

Table 4. ANOVA for significant parameters of each model

Source	Symbol	Removal efficiency		Operation cost	
		F-value	P-value	F-value	P-value
Model	-	7.24	0.0019	35.62	<0.0001
Time	A	6.32	0.0238	13.85	0.0020
Current density	B	5.13	0.0388	119.76	<0.0001
Initial concentration	C	13.52	0.0022	4.60	0.0488
Interaction	AB	-	-	-	-
Interaction	AC	-	-	3.94	0.0496
Interaction	BC	-	-	-	-
Interaction	A <sup>2</sup>	6.44	0.0465	-	-
Interaction	B <sup>2</sup>	-	-	-	-
Interaction	C <sup>2</sup>	-	-	-	-

عملکرد فرایند انعقاد الکتریکی است. نتایج نشان داد که پارامتر چگالی جریان به‌طور مداوم و پایدار اثری مستقیم بر کارایی حذف دارد. به این معنا که با افزایش چگالی جریان، کارایی حذف نیز بهبود می‌یابد. به‌طور مشخص، در غلظت اولیه کروم برابر با  $141 \text{ mg/L}$ ، افزایش چگالی جریان از  $48 \text{ A/m}^2$  به  $132 \text{ A/m}^2$  منجر به افزایش کارایی حذف به میزان  $4/1$  درصد شد. این موضوع با اصول تئوریک فرایند انعقاد الکتریکی مطابقت دارد، زیرا افزایش چگالی جریان موجب افزایش نرخ انحلال الکتروود آهنی و

کروم و ارزیابی تأثیر هر یک از این پارامترها، همچنین برای کاهش هزینه‌های عملیاتی از طریق کاهش تعداد آزمایش‌ها، از روش طراحی آزمایش سطح پاسخ استفاده شد (Majiya et al., 2024). در این بخش، به‌منظور درک بهتر عملکرد فرایند، اثرات و برهم‌کنش‌های پارامترهای مذکور، مدل‌های کارایی حذف و هزینه عملیاتی در نمودارهای سه‌بعدی در شکل‌های ۶ و ۷ ارائه شدند. همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، نمودار سه‌بعدی کارایی حذف نشان‌دهنده رفتار متفاوت پارامترهای بررسی شده بر



در نهایت، اثر غلظت اولیه برخلاف دو پارامتر پیشین رفتاری معکوس با کارایی حذف داشت. به گونه‌ای که با افزایش غلظت اولیه از ۱۴۱ به ۴۰۸ mg/L در زمان ۱۲/۵ دقیقه، کارایی حذف به میزان ۶/۹۸ درصد کاهش یافت. این الگو در برهم‌کنش با چگالی جریان نیز مشاهده شد. به طوری که در چگالی جریان  $48 \text{ A/m}^2$  افزایش غلظت آلاینده از ۱۴۱ به ۴۰۸ mg/L موجب کاهش کارایی حذف به میزان ۶/۹۱ درصد شد. این پدیده ناشی از افزایش بار آلودگی در غلظت‌های بیشتر است، به گونه‌ای که سطح تولید شده لخته‌های هیدروکسیدی توانایی جذب و ته‌نشینی تمام یون‌های فلزی موجود را ندارد. علاوه بر این، تراکم بالای یون‌های کروم در محیط منجر به اشباع سریع‌تر سایت‌های جذب و کاهش کارایی فرایند می‌شود.

الگوی مشاهده شده در این پژوهش با یافته‌های سایر مطالعات نیز هم‌خوانی دارد. برای مثال، در پژوهشی که توسط کویا و همکاران گزارش شد که کارایی حذف یون‌های سنگین در چگالی جریان‌های بالاتر به‌طور محسوسی افزایش می‌یابد، هرچند که در زمان‌های بسیار طولانی به دلیل اشباع لخته‌ها، افزایش کارایی روند کندتری پیدا می‌کند (Koby et al., 2016). همین‌طور اکبال و همکاران تأکید کرده‌اند که زمان بهینه واکنش نقش کلیدی در رسیدن به کارایی زیاد بدون اتلاف انرژی دارد (Akbal and Camci, 2010). در این پژوهش نیز نتایج نشان دادند که بیشترین کارایی حذف در محدوده چگالی جریان‌های بالا و زمان واکنش طولانی حاصل شده که نشان‌دهنده هم‌سویی این نتایج با پژوهش‌های قبلی است.

همان‌گونه که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، برخلاف مدل کارایی حذف، نتایج مربوط به هزینه عملیاتی نشان می‌دهد که پارامترهای زمان واکنش و غلظت اولیه تأثیر چشمگیری بر هزینه عملیاتی فرایند ندارند. هرچند این دو پارامتر روند افزایشی بر هزینه عملیاتی دارند، اما این افزایش تقریباً خطی بوده و در محدوده‌های مختلف موجب جهش قابل توجهی در هزینه‌ها نمی‌شود. به عنوان مثال، افزایش غلظت آلاینده از ۱۴۱ به ۴۰۸ mg/L در چگالی جریان  $48 \text{ A/m}^2$  تنها موجب رشد ۱۳/۹۱ درصدی در هزینه عملیاتی شد. به همین ترتیب، افزایش زمان واکنش از ۵/۵ به ۱۲/۵ دقیقه در غلظت آلاینده ۴۰۸ mg/L نیز صرفاً افزایش ۱۵/۷۳ درصدی در هزینه عملیاتی فرایند را به همراه داشت. این

آزادسازی یون‌های فلزی بیشتر می‌شود. در نتیجه، تشکیل هیدروکسیدهای آهن تسریع شده و فرایند لخته‌سازی و ته‌نشینی آلاینده‌ها مؤثرتر انجام می‌شود. افزون بر این، کارایی بالاتر حذف کروم در جریان‌های بالاتر را می‌توان به واکنش‌های کاهش‌ی بین یون‌های Fe(II) و Cr(VI) نسبت داد که نقش کلیدی در کاهش کروم شش ظرفیتی دارند. در این شرایط، یون‌های Fe(II) آزاد شده از آند آهنی در محلول وارد واکنش با کروم شده و زمینه کاهش و ته‌نشینی مؤثر آن را فراهم می‌سازند (Zongo et al., 2009).

از سوی دیگر، اثر زمان واکنش رفتاری پیچیده‌تر و وابسته به سایر پارامترها نشان داد. نتایج برهم‌کنش زمان و غلظت اولیه بیانگر آن است که این پارامتر می‌تواند اثری مستقیم داشته باشد. به عنوان نمونه، در غلظت اولیه ۱۴۱ mg/L با افزایش زمان واکنش از ۵/۵ به ۱۲/۵ دقیقه، کارایی حذف به میزان ۴/۹۸ درصد بهبود یافت. این یافته نشان‌دهنده نقش مثبت زمان در فراهم‌سازی فرصت کافی برای تشکیل و تجمع لخته‌های فلزی است. با این حال، در تعامل زمان و چگالی جریان، رفتار پارامتر زمان همواره مستقیم نبوده است. به طوری که در چگالی جریان‌های کمتر از  $90 \text{ A/m}^2$  اثر زمان واکنش بر کارایی حذف معکوس بوده و افزایش زمان تأثیری بر بهبود کارایی نداشته است. در مقابل، با عبور از چگالی جریان  $90 \text{ A/m}^2$  اثر زمان تغییر ماهیت داده و به صورت مستقیم ظاهر شد. این روند منطقی است، زیرا در جریان‌های بالاتر، انحلال بیشتر آند آهنی و آزادسازی مقدار بیشتری از یون‌های آهن، فرصت کافی برای تشکیل هیدروکسیدهای فلزی و افزایش کارایی حذف را فراهم می‌کند.

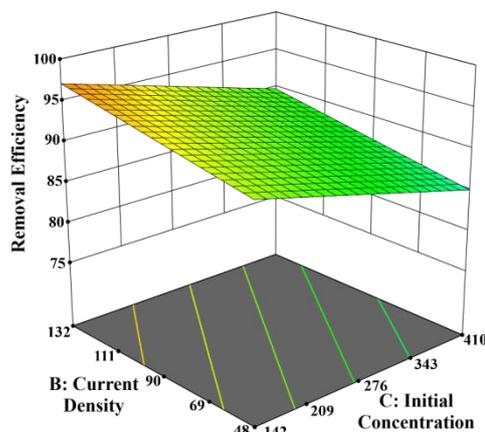


Fig. 6. 3-D Removal efficiency model

شکل ۶- عملکرد پارامترهای عملیاتی در مدل کارایی حذف

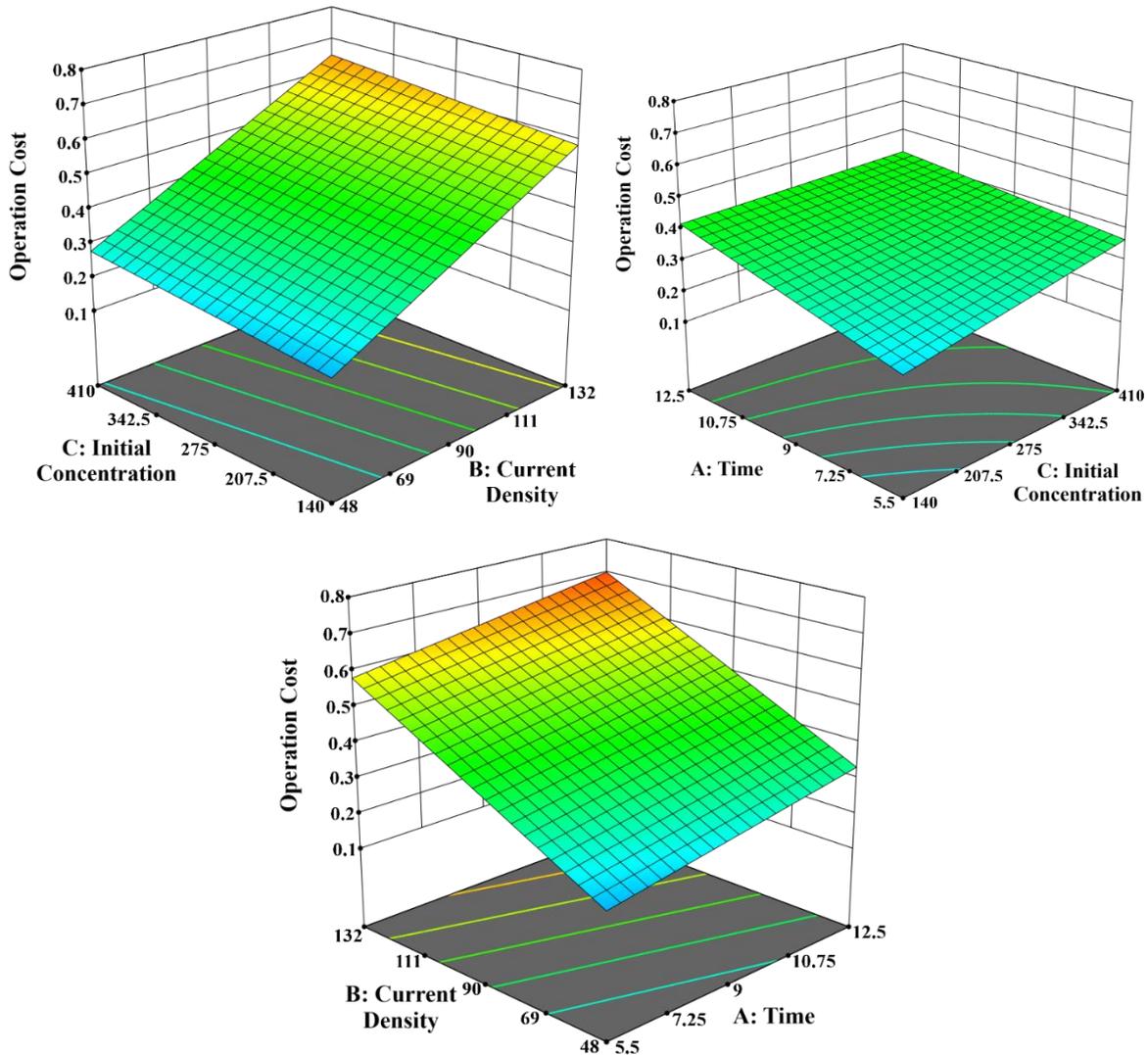


Fig. 7. 3-D Operation cost model

شکل ۷- عملکرد پارامترهای مؤثر در مدل هزینه عملیاتی

به‌عنوان نمونه، ابا و همکاران گزارش کردند که هزینه عملیاتی فرایند انعقاد الکتریکی رابطه‌ای مستقیم با چگالی جریان و مدت‌زمان دارد و در مقدار بیشینه این متغیرها، اگرچه کارایی حذف نزدیک به صددرصد است، اما هزینه فرایند به سطحی می‌رسد که برای کاربردهای صنعتی مقرون‌به‌صرفه نخواهد بود (Ebba et al., 2021). همچنین، دمیرباس و کویبا نیز در پژوهش خود نتیجه گرفتند که بهینه‌سازی شرایط عملیاتی برای رسیدن به تعادل بین بازده و هزینه از ضروریات اصلی کاربرد این روش در مقیاس واقعی است (Demirbas and Kobya, 2017).

در حالی است که تأثیر چگالی جریان بر هزینه عملیاتی بسیار برجسته‌تر بوده و نمی‌توان آن را نادیده گرفت. به‌گونه‌ای که افزایش چگالی جریان از ۴۸ به  $132 \text{ A/m}^2$  باعث رشد  $161/57$  درصدی در هزینه عملیاتی شد. این پدیده ناشی از آن است که افزایش چگالی جریان به‌طور مستقیم موجب افزایش مصرف انرژی الکتریکی و نیز تسریع در انحلال الکترودها می‌شود (Mollah et al., 2001). در نتیجه، هم مصرف الکترود و هم مصرف انرژی به‌طور هم‌زمان افزایش یافته و هزینه‌های عملیاتی با شیب بیشتری رشد می‌کنند. این یافته‌ها با سایر پژوهش‌های مرتبط نیز مطابقت دارد.



جدول ۵- شرایط بهینه برای این پژوهش الویت بندی شده بر اساس میزان مطلوبیت

Table 5. Optimal condition for present study and prioritized based on the desirability

Scenario	Time	Current density	Initial concentration	Predicted responses		Desirability
				Removal efficiency	Operation cost	
I	12.51	48.378	141.29	94.16	0.297	0.720
II	5.49	48.378	141.29	89.21	0.119	0.715
III	6.09	48.379	141.29	89.23	0.134	0.707
IV	5.49	63.368	141.29	90.05	0.185	0.700

و تحلیل شده‌اند. این نتایج امکان مقایسه مستقیم بین سطوح مختلف الکتروود و تأثیر آن‌ها بر کارایی حذف و هزینه عملیاتی را فراهم می‌سازد. بررسی تغییرات نشان می‌دهد که اصلاح سطح الکتروود از طریق سوراخ کاری می‌تواند نقش قابل توجهی در بهبود کارایی انعقاد الکتریکی داشته باشد، چراکه با افزایش سطح فعال تماس و بهبود توزیع جریان الکتریکی، شرایط بهتری از منظر بهره‌وری و اقتصادی با عملکرد یکسان مهیا می‌شود (Dias et al., 2019).

بررسی نتایج حاصل از آزمایش‌های تکمیلی در شرایط بهینه شکل ۸ نشان می‌دهد که تغییر سطح الکتروود از طریق سوراخ کاری تأثیر قابل توجهی بر کارایی حذف دارد. در تمامی سناریوهای بهینه، الکتروودهای بدون سوراخ کاری<sup>۲</sup> بیشترین کارایی حذف را نشان دادند که بیانگر کارایی بالای سطح پیوسته در تولید مواد منعقدکننده بیشتر و ایجاد لخته‌های پایدار است. به‌طور خاص، در سناریو ۲ بیشترین کارایی حذف (حدود ۹۶ درصد) با استفاده از الکتروود بدون سوراخ کاری حاصل شد. با این حال، نتایج الکتروودهای سوراخ دار نیز نشان داد که افزایش قطر سوراخ‌ها تا حدی می‌تواند شرایط هیدرودینامیکی و توزیع جریان را بهبود دهد. نتایج به‌دست آمده نشان داد که در تمامی سناریوها افزایش قطر سوراخ کاری از ۴ به ۸ میلی‌متر منجر به بهبود قابل توجه کارایی حذف کروم شد. این موضوع را می‌توان به بهبود شرایط هیدرودینامیکی، افزایش سطح تماس مؤثر و توزیع یکنواخت‌تر جریان الکتریکی نسبت داد که در نهایت تولید گونه‌های انعقادی و تشکیل لخته‌های پایدارتر را تسهیل می‌کند (Dias et al., 2019).

<sup>2</sup> Solid Electrode

### ۳-۴- بررسی اثرگذاری تغییرات سطح الکتروود بر عملکرد فرایند انعقاد الکتریکی

پس از پایان طراحی آزمایش و تحلیل نتایج، در بخش بهینه‌سازی نرم‌افزار Design Expert، ۶۵ حالت بهینه از شرایط آزمایش بر اساس مقدار مطلوبیت و پاسخ‌ها پیشنهاد می‌شود. در این قسمت، نرم‌افزار با بررسی ترکیب‌های مختلف پارامترها و تأثیر آن‌ها، به شرایطی می‌رسد که بهترین نتیجه را برای دستیابی به هدف موردنظر دارد. در این پژوهش، هدف اصلی پیشینه کردن کارایی حذف و کمینه‌سازی هزینه عملیاتی فرایند انعقاد الکتریکی با اهمیت یکسان در هر مدل تعریف شد. بر اساس این اهداف، شرایط بهینه برای هر وضعیت آزمایشگاهی بر اساس میزان مطلوبیت<sup>۱</sup> مرتب و در جدول ۵ نمایش داده شده است. این بهینه‌سازی کمک می‌کند تا بهترین شرایط آزمایش را که بیشترین تأثیر را در حذف کروم با کمترین هزینه عملیاتی، شناسایی کرده و برای بررسی تأثیر تغییرات سطح الکتروود استفاده شود.

در این بخش، به‌منظور بررسی تأثیر تغییرات سطح مؤثر الکتروود بر عملکرد فرایند انعقاد الکتریکی، پس از تعیین شرایط بهینه عملیاتی مطابق جدول ۵ که در چهار سناریو تعریف شد، آزمایش‌های تکمیلی طراحی و اجرا شدند. برای این منظور، سطح الکتروود با چهار الگوی متفاوت سوراخ کاری اصلاح شد تا تغییر در مساحت فعال الکتروود و توزیع جریان بررسی شود. این تغییرات به‌صورت سیستماتیک در قالب چهار سناریوی بهینه شناسایی شده از طراحی آزمایش اعمال شدند. در مجموع، ۱۶ آزمایش تکمیلی با ترکیب این چهار نوع سوراخ کاری و شرایط بهینه استخراج شده انجام شد. نتایج حاصل از این آزمایش‌ها در شکل‌های ۸ و ۹ ارائه

<sup>1</sup> Desirability



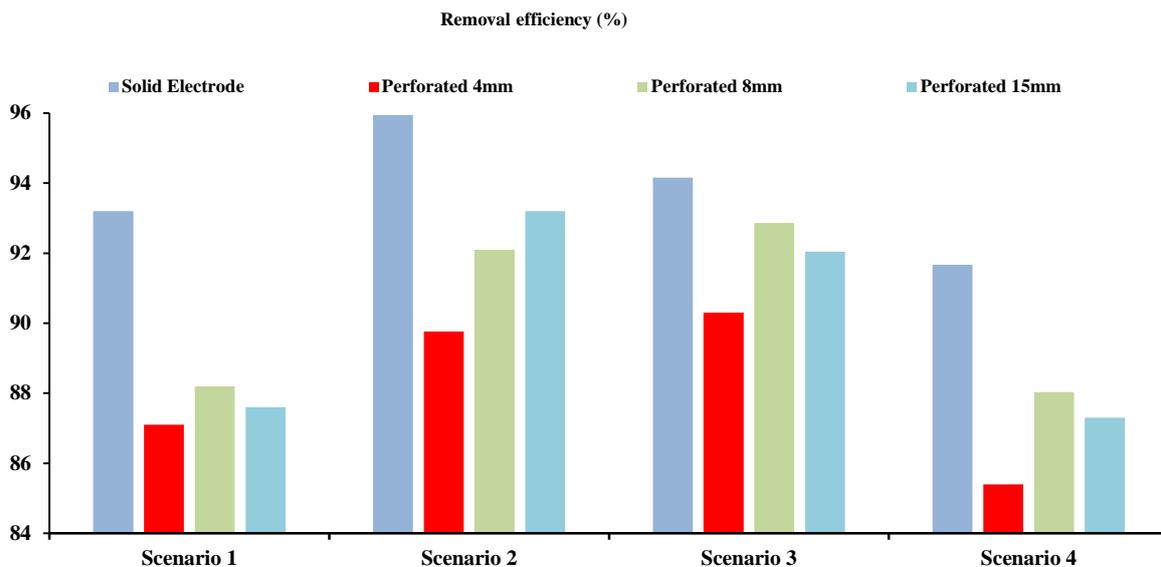


Fig. 8. Electrode surface effect on removal efficiency

شکل ۸- اثر تغییر سطح الکترود بر مدل کارایی حذف

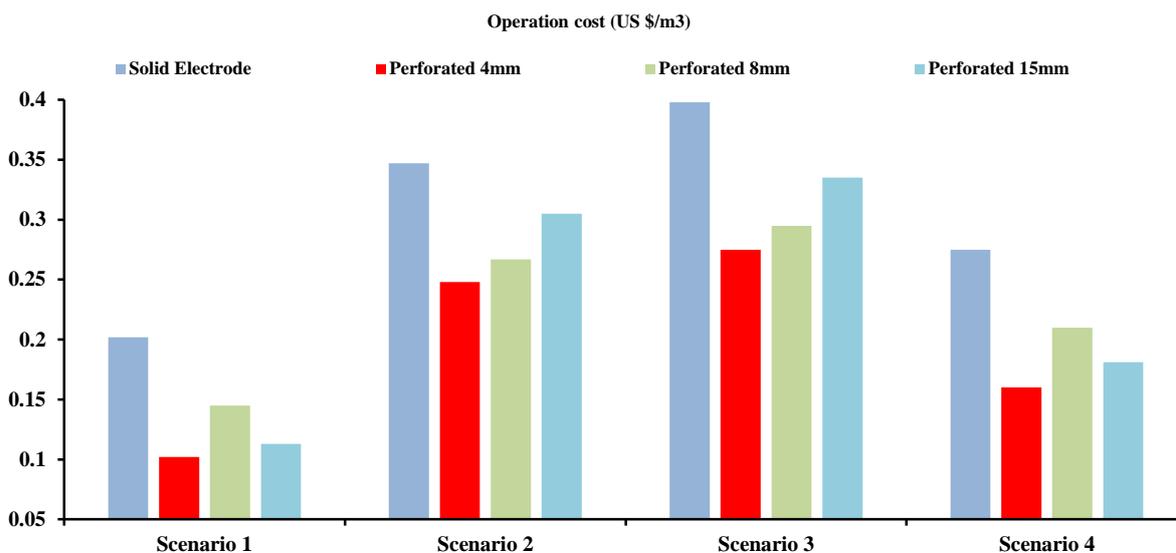


Fig. 9. Electrode surface effect on operation cost

شکل ۹- اثر تغییر سطح الکترود بر مدل هزینه عملیاتی

نتیجه گرفت که وجود یک قطر بهینه سوراخ کاری نقش کلیدی در دستیابی به بهترین کارایی حذف دارد، به طوری که در این پژوهش الکترودهای با قطر سوراخ مناسب حتی کارایی معادل با الکترودهای بدون سوراخ ارائه دادند. این یافته‌ها با گزارش‌های سایر پژوهشگران در مرور ادبیات نیز هم‌خوانی دارد. برای مثال، دیاس با همکاران و همچنین کرودا با همکاران نشان دادند که تغییر

با این حال، همان‌طور که در سناریوهای ۱، ۳ و ۴ نشان داده شده است، نتایج مربوط به الکترودهای با سوراخ ۱۵ میلی‌متری بیانگر آن است که افزایش پیوسته قطر سوراخ الزاماً به ارتقای کارایی حذف منجر نمی‌شود. در واقع، قطر بیش‌ازحد بزرگ می‌تواند موجب کاهش سطح مؤثر الکترود و ایجاد ناپایداری در جریان الکتریکی شده و از این طریق عملکرد فرایند را محدود کند. بنابراین، می‌توان



عمدتاً به دلیل کاهش ولتاژ خروجی و مصرف انرژی فرایند اتفاق افتاد که با کاهش سطح فعال مستغرق همراه شد؛ سطح فعال این الکتروود  $39/412 \text{ cm}^2$  بود و نسبت به الکتروود بدون سوراخ  $29/6$  درصد کاهش یافت. کاهش سطح مؤثر باعث کاهش مقدار ماده مصرفی در الکتروود شد و همان‌طور که اشاره شد با کاهش قابل توجه مصرف انرژی همراه است. در نتیجه منجر به کاهش هزینه عملیاتی می‌شود، اما در عین حال توانایی الکتروود در تولید لخته‌ها و حذف کروم تحت تأثیر قرار گرفته و کارایی حذف آن در مقایسه با سایر الکتروودها کمتر بود.

به‌طور کلی، نتایج حاکی از آن است که سوراخ‌کاری الکتروودها می‌تواند نقش مؤثری در کاهش هزینه‌های عملیاتی ایفا کند. در میان الکتروودهای بررسی‌شده، سوراخ  $4$  میلی‌متر کمترین هزینه عملیاتی را به همراه داشت، در حالی که سوراخ  $8$  میلی‌متر بهترین تعادل میان کارایی حذف و هزینه عملیاتی را فراهم آورد. سطح فعال این الکتروود  $43/434 \text{ cm}^2$  بود که تنها  $20/2$  درصد کاهش نسبت به الکتروود بدون سوراخ داشت؛ بنابراین، کاهش مصرف انرژی و ولتاژ خروجی همچنان قابل توجه بود و هزینه عملیاتی کاهش یافت، اما به دلیل حفظ بخش عمده‌ای از سطح فعال، کارایی حذف کروم به میزان مطلوب باقی ماند؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که قطر سوراخ الکتروودها نقش دوگانه‌ای در تعیین عملکرد کارایی حذف و هزینه عملیاتی ایفا می‌کند. از یک سو، سطح فعال الکتروود تحت تأثیر قطر سوراخ کاهش می‌یابد. بررسی‌ها نشان داد که الکتروود سوراخ‌دار  $8$  میلی‌متری کارایی حذف بهتری نسبت به الکتروودهای  $4$  و  $15$  میلی‌متری که کاهش سطح بیشتری داشتند، ارائه می‌دهد. این نتیجه بیانگر اهمیت تعیین قطر سوراخ برای حفظ سطح فعال بهینه است.

از سوی دیگر، سوراخ‌ها جریان الکتریکی را در اطراف لبه‌های خود توزیع می‌کنند و منجر به توزیع یکنواخت‌تر یون‌های فلزی در حجم محلول می‌شوند. این شرایط مقاومت الکتریکی الکتروودها را کاهش داده و مصرف انرژی و مصرف الکتروود را کم می‌کند. اگرچه تفاوت بین الکتروودهای سوراخ‌دار در کاهش هزینه عملیاتی چندان معنادار نیست، همه آن‌ها نسبت به الکتروود بدون سوراخ کاهش قابل توجهی را نشان می‌دهند. در نتیجه، قطر  $8$  میلی‌متری تعادل مناسبی میان کاهش سطح فعال و کاهش مقاومت الکتریکی ایجاد می‌کند و به همین دلیل این قطر به‌عنوان نقطه بهینه انتخاب شد؛

هندسه و سطح مؤثر الکتروود می‌تواند بر کارایی حذف آلاینده‌ها در فرایند انعقاد الکتریکی اثرگذار باشد و الکتروودهای با سطح اصلاح شده عملکرد بهتری نسبت به صفحات صاف در شرایط خاص دارند (Dias et al., 2019, Kuroda et al., 2003).

نتایج به‌دست آمده از بررسی هزینه عملیاتی در شکل ۹ نشان داد که در تمامی سناریوها، الکتروود بدون سوراخ بیشترین میزان هزینه عملیاتی (مصرف انرژی + مصرف الکتروود) را داشته است. این امر بیانگر آن است که ایجاد سوراخ بر سطح الکتروود سبب بهبود توزیع جریان، کاهش مقاومت الکتریکی شده و همچنین کاهش جرم مصرفی الکتروود ناشی از کاهش سطح فعال می‌شود. در نتیجه هزینه عملیاتی فرایند کاهش می‌یابد. در مقایسه میان الکتروودهای سوراخ‌دار، مشخص شد که سوراخ‌کاری با قطر  $4$  میلی‌متر در اکثر سناریوها کمترین هزینه عملیاتی را به همراه داشته است. به‌طوری‌که در سناریو ۱، هزینه عملیاتی آن تقریباً نصف الکتروود بدون سوراخ به دست آمد. این موضوع نشان می‌دهد که در این شرایط، سطح تماس کافی برای واکنش‌های الکتروشیمیایی فراهم شده و هم‌زمان افت انرژی الکتریکی نیز در حداقل مقدار خود قرار دارد.

از سوی دیگر، الکتروود سوراخ‌دار با قطر  $8$  میلی‌متر اگرچه اندکی هزینه عملیاتی بالاتری نسبت به قطر  $4$  میلی‌متر داشت، اما در بخش کارایی حذف کروم نشان داده شد که بهبود قابل توجهی در بازدهی فرایند ایجاد می‌کند؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که قطر  $8$  میلی‌متر نقطه تعادلی میان دستیابی به کارایی حذف مطلوب و کنترل هزینه عملیاتی است. در مقابل، سوراخ‌کاری با قطر  $15$  میلی‌متر اگرچه در برخی شرایط کارایی قابل قبولی نشان داد، اما همان‌طور که در سناریوهای ۲ و ۳ مشخص شد، هزینه عملیاتی آن نسبت به سوراخ‌های  $4$  و  $8$  میلی‌متر به ترتیب به‌طور میانگین  $14$  و  $22$  درصد افزایش یافت. علت این امر را می‌توان کاهش سطح مؤثر واکنش و توزیع غیریکنواخت جریان الکتریکی در اثر افزایش بیش‌از حد قطر سوراخ‌ها دانست.

همچنین بررسی مقدار هزینه عملیاتی در چهار سناریو انجام شده نشان داد که بیشترین هزینه عملیاتی در سناریو ۳ و برای الکتروود بدون سوراخ با مقدار حدود  $0/398 \text{ US\$/m}^3$  مشاهده شد، در حالی که کمترین مقدار مربوط به سناریو ۱ با الکتروود سوراخ‌دار  $4$  میلی‌متر و برابر با حدود  $0/1 \text{ US\$/m}^3$  بود. این کاهش هزینه



فرایند انعقاد الکتریکی نه تنها قادر به حذف مؤثر کروم است، بلکه می‌تواند در سطح اقتصادی نیز رقابتی باشد.

در ادامه برای بررسی اثر مورفولوژی الکتروود بر کارایی سیستم، سطح الکتروود با چهار الگوی متفاوت سوراخ‌کاری اصلاح شد تا تغییر در مساحت فعال الکتروود و توزیع جریان بررسی شود. آزمایش‌های انجام شده در نقاط بهینه به دست آمده در فاز اول، نشان داد که تغییر سطح مؤثر می‌تواند نقطه بهینه جدیدی میان کارایی و هزینه ایجاد کند. الکتروودهای صاف بدون سوراخ‌کاری، هرچند بالاترین کارایی حذف را در سناریو ۲ (تا ۹۶ درصد) ایجاد کردند، اما هزینه عملیاتی آن‌ها در برخی شرایط به  $US\$/m^3$  ۰/۳۹۸ رسید که تقریباً ۳ برابر بالاتر از برخی حالات اصلاح شده بود. سوراخ‌کاری با قطر ۴ میلی‌متر هزینه را به‌طور قابل‌توجهی کاهش داد (تا حدود  $US\$/m^3$  ۰/۱۹) اما کارایی حذف اندکی پایین‌تر از حالت بدون سوراخ‌کاری باقی ماند. در مقابل، سوراخ‌کاری با قطر ۸ میلی‌متر بهینه‌ترین شرایط را به ارمغان آورد. به‌طوری‌که در سناریو ۲ کارایی حذف بیش از ۹۰ درصد همراه با هزینه عملیاتی حدود  $US\$/m^3$  ۰/۲۷ حاصل شد. سوراخ‌کاری بیش از حد (قطر ۱۵ میلی‌متر) به دلیل کاهش سطح مؤثر الکتروود و توزیع نامناسب جریان، هم کارایی و هم هزینه را در وضعیت نامطلوبی قرار داد.

در نهایت می‌توان نتیجه گرفت که به‌کارگیری الکتروودهای سوراخ‌دار علاوه بر حفظ کارایی قابل‌قبول در حذف آلاینده‌ها، موجب کاهش چشمگیر مصرف انرژی و هزینه عملیاتی می‌شود. با این‌حال، تعیین اندازه بهینه سوراخ‌ها نقش کلیدی در فرایند بهینه‌سازی دارد. نتایج این پژوهش نشان داد که افزایش قطر سوراخ‌ها تا ۸ میلی‌متر موجب بهبود کارایی سیستم می‌شود، اما افزایش بیشتر قطر سوراخ‌ها نه تنها موجب کاهش سطح مؤثر الکتروود می‌شود، بلکه درصد حذف را نیز کاهش می‌دهد. از این‌رو، انتخاب قطر مناسب سوراخ‌کاری می‌تواند به‌عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل در دستیابی به تعادل میان بازده و بهره‌وری انرژی در فرایند انعقاد الکتریکی مطرح باشد.

#### ۵- قدردانی

نویسندگان از حمایت‌های دانشگاه صنعتی امیرکبیر و آزمایشگاه محیط‌زیست دانشکده عمران کمال تشکر و قدردانی را دارند.

زیرا هم کارایی حذف را حفظ می‌کند و هم هزینه عملیاتی را کاهش می‌دهد. انتخاب قطر بهینه سوراخ‌کاری نه تنها کارایی فرایند انعقاد الکتریکی را افزایش می‌دهد، بلکه موجب بهبود اقتصادی فرایند نیز خواهد شد.

#### ۴- نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این پژوهش، فرایند انعقاد الکتریکی برای حذف کروم شش ظرفیتی از محیط آبی با استفاده از الکتروودهای آهنی در دو فاز مجزا بررسی و بهینه‌سازی شد. نتایج این پژوهش نشان داد که فرایند انعقاد الکتریکی با استفاده از الکتروودهای آهنی، رویکردی کارآمد و اقتصادی برای حذف یون‌های کروم از محیط‌های آبی به‌شمار می‌آید.

در این پژوهش از افزودن مقدار کمی نمک NaCl (یک گرم در لیتر) به‌عنوان الکتروولیت کمکی به‌منظور بهبود هدایت الکتریکی استفاده شد. باوجود اینکه مقدار افزوده شده بسیار اندک بوده و فرض بر این است که تأثیر قابل‌توجهی بر نتایج فرایند نداشته باشد، اما باید توجه داشت که ورود حتی مقدار کم یون کلر می‌تواند به‌عنوان یک متغیر مداخله‌گر مطرح شود. از این‌رو این موضوع به‌عنوان یکی از محدودیت‌های پژوهش در نظر گرفته شده و توصیه می‌شود در پژوهش‌های آینده تأثیر احتمالی یون کلر و محصولات جانبی ناشی از آن بر مکانیسم و بازدهی فرایند به‌طور دقیق‌تر بررسی شود. طراحی آزمایش و تحلیل داده‌ها با استفاده از روش سطح پاسخ بیانگر آن بود که سه پارامتر کلیدی شامل چگالی جریان، زمان واکنش و غلظت اولیه نقش تعیین‌کننده‌ای در عملکرد فرایند دارند. مدل‌های ریاضی توسعه‌یافته با ضریب تعیین ( $R^2$ ) بالا (۰/۹۵۸۸) برای کارایی حذف و  $0/9048$  برای هزینه عملیاتی، توانایی خوبی در پیش‌بینی رفتار فرایند از خود نشان دادند.

نتایج مدل‌سازی نشان داد که افزایش چگالی جریان و زمان واکنش، کارایی حذف را به‌طور مستقیم بهبود می‌بخشد، در حالی‌که غلظت اولیه اثر معکوس بر آن دارد. در این فاز چهار سناریو بهینه فرایند تعیین شده که برای مثال با چگالی جریان  $48 A/m^2$ ، زمان واکنش  $12/5$  دقیقه و غلظت اولیه حدود  $141 mg/L$ ، کارایی حذف کروم به بیش از ۹۴ درصد و هزینه عملیاتی به کمتر از  $US\$/m^3$  ۰/۳ رسید. این مقدار نشان داد که در شرایط کنترل شده،



## References

- Akbal, F. and Camci, S., 2010. Comparison of electrocoagulation and chemical coagulation for heavy metal removal. *Chemical Engineering and Technology*, 33, 1655-1664. <https://doi.org/10.1002/ceat.201000091>.
- Aoudj, S., Khelifa, A., Drouiche, N., Belkada, R. and Miroud, D., 2015. Simultaneous removal of chromium (VI) and fluoride by electrocoagulation–electroflotation: application of a hybrid Fe-Al anode. *Chemical Engineering Journal*, 267, 153-162. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.12.081>.
- Bajpai, M., Katoch, S. S., Kadier, A. and Ma, P. C., 2021. Treatment of pharmaceutical wastewater containing cefazolin by electrocoagulation (EC): optimization of various parameters using response surface methodology (RSM), kinetics and isotherms study. *Chemical Engineering Research and Design*, 176, 254-266. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2021.10.012>.
- Chen, N., Cui, X., Sun, X., Yang, X., Yang, W., Ren, N. et al., 2024. Advanced Cr (VI) removal from wastewater using migrating electric field-assisted electrocoagulation combined with capacitive deionization technology. *Journal of Water Process Engineering*, 63, 105445. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.105445>.
- Costigan, E., Wu, S., Eckelman, M., Fernandez, L., Mueller, A., Alshawabkeh, A. et al., 2025. Chromium removal from concentrated ammonium-nitrate solution: electrocoagulation with iron in a plug-flow reactor. *Separation and Purification Technology*, 354, 129353. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.129353>.
- Demirbas, E. and Kobya, M., 2017. Operating cost and treatment of metalworking fluid wastewater by chemical coagulation and electrocoagulation processes. *Process Safety and Environmental Protection*, 105, 79-90. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2016.10.013>.
- Dias, O. A., Muniz, E. P. and Da Silva Porto, P. S., 2019. Electrocoagulation using perforated electrodes: an increase in metalworking fluid removal from wastewater. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, 139, 113-120. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2019.03.021>.
- Ebba, M., Asaithambi, P. and Alemayehu, E., 2021. Investigation on operating parameters and cost using an electrocoagulation process for wastewater treatment. *Applied Water Science*, 11, 175. <https://doi.org/10.1007/s13201-021-01517-y>.
- Ebba, M., Asaithambi, P. and Alemayehu, E., 2022. Development of electrocoagulation process for wastewater treatment: optimization by response surface methodology. *Heliyon*, 8. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09383>.
- El-Gawad, H. A., Hassan, G. K., Aboelghait, K. M., Mahmoud, W. H., Mohamed, R. and Afify, A. A., 2023. Removal of chromium from tannery industry wastewater using iron-based electrocoagulation process: experimental; kinetics; isotherm and economical studies. *Scientific Reports*, 13, 19597. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-46848-9>.
- Genawi, N. M., Ibrahim, M. H., El-Naas, M. H. and Alshaik, A. E., 2020. Chromium removal from tannery wastewater by electrocoagulation: optimization and sludge characterization. *Water*, 12, 1374. <https://doi.org/10.3390/w12051374>.
- Hakizimana, J. N., Gourich, B., Chafi, M., Stiriba, Y., Vial, C., Drogui, P. et al., 2017. Electrocoagulation process in water treatment: a review of electrocoagulation modeling approaches. *Desalination*, 404, 1-21. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2016.10.011>.
- Hojabri, S., Rajic, L., Zhao, Y. and Alshawabkeh, A. N., 2024. Simulation of hexavalent chromium removal by electrocoagulation using iron anode in flow-through reactor. *Journal of Hazardous Materials*, 476, 135195. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.135195>.



- Hosseini, S. A., Samani, M. R. and Toghraie, D., 2021. Removal of hexavalent chromium from aqueous solution using ostrich feathers amended by polyaniline. *Journal of Materials Research and Technology*, 15, 488-499. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.08.041>.
- Khorrām, A. G. and Fallah, N., 2018. Treatment of textile dyeing factory wastewater by electrocoagulation with low sludge settling time: optimization of operating parameters by RSM. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6, 635-642. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.12.054>.
- Kobyā, M., Gengec, E. and Demirbas, E., 2016. Operating parameters and costs assessments of a real dyehouse wastewater effluent treated by a continuous electrocoagulation process. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 101, 87-100. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2015.11.012>.
- Kumar, A. and Basu, D., 2023. Parametric optimization of hexavalent chromium removal by electrocoagulation technology with vertical rotating cylindrical aluminum electrodes using Taguchi and ANN model. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 21, 255-275. <https://doi.org/10.1007/s40201-023-00859-w>.
- Kumar, M., Maurya, N. S., Singh, A. and Rai, M. K., 2023. Efficient removal of Cr (VI) from aqueous solution by using tannery by-product (Buffing Dust). *Heliyon*, 9. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e15038>.
- Kumar, P., Nawaz, T. and Singh, S. P., 2024. Optimization of electrocoagulation process parameters for the treatment of oil industry drill site wastewater. *Environmental Science and Pollution Research*, 31, 47101-47115. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-34189-7>.
- Kuroda, Y., Kawada, Y., Takahashi, T., Ehara, Y., Ito, T., Zukeran, A. et al., 2003. Effect of electrode shape on discharge current and performance with barrier discharge type electrostatic precipitator. *Journal of Electrostatics*, 57, 407-415. [https://doi.org/10.1016/s0304-3886\(02\)00177-8](https://doi.org/10.1016/s0304-3886(02)00177-8).
- Li, B. and Wang, Y., 2025. A comparative review of removing chromium (VI) from electroplating industry wastewater using electrocoagulation and membrane filtration. *Science and Technology of Engineering, Chemistry and Environmental Protection*, 1. <https://doi.org/10.61173/jneft44>.
- Majiya, H., Clegg, F. and Sammon, C., 2024. A chemometric approach using I-optimal design for optimising Pb (II) removal using bentonite-chitosan composites and beads. *Journal of Environmental Management*, 370, 122557. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.122557>.
- Mollah, M. Y. A., Schennach, R., Parga, J. R. and Cocke, D. L., 2001. Electrocoagulation (EC)-science and applications. *Journal of Hazardous Materials*, 84, 29-41. [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(01\)00176-5](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(01)00176-5).
- Patel, S. R., Pathan, M., Nayak, M. G., Parikh, S. P., Rajaraman, T., Ambegaonkar, N. J. et al., 2024. Energy efficient electrocoagulation using brass electrode for simultaneous nickel and chromium removal from synthetic wastewater: cost and parametric evaluation. *Results in Engineering*, 102361. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102361>.
- Peng, H. and Guo, J., 2020. Removal of chromium from wastewater by membrane filtration, chemical precipitation, ion exchange, adsorption electrocoagulation, electrochemical reduction, electrodialysis, electrodeionization, photocatalysis and nanotechnology: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 18, 2055-2068. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01058-x>.
- Thakur, L. S., Baghel, R., Sharma, A., Sharma, S., Parmar, H., Varma, A. K. et al., 2023. Simultaneous removal of lead, chromium and cadmium from synthetic water by electrocoagulation: optimization through response surface methodology. *Materials Today: Proceedings*, 72, 2697-2704. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.09.031>.
- Thakur, L. S., Goyal, H. and Mondal, P., 2019. Simultaneous removal of arsenic and fluoride from synthetic solution through continuous electrocoagulation: operating cost and sludge utilization. *Journal of Environmental Chemical*



*Engineering*, 7, 102829. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.102829>.

Vakili, M., Ebadi, T. and Hajbabaie, M., 2025. A systematic analysis of research trends on the permeable reactive barrier in groundwater remediation. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 22, 503-520. <https://doi.org/10.1007/s13762-024-05775-6>.

Zeboudji, B., Drouiche, N., Lounici, H., Mameri, N. and Ghaffour, N., 2013. The influence of parameters affecting boron removal by electrocoagulation process. *Separation Science and Technology*, 48, 1280-1288. <https://doi.org/10.1080/01496395.2012.731125>.

Zongo, I., Leclerc, J. P., Maïga, H. A., Wéthé, J. and Lapique, F., 2009. Removal of hexavalent chromium from industrial wastewater by electrocoagulation: a comprehensive comparison of aluminum and iron electrodes. *Separation and Purification Technology*, 66, 159-166. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2008.11.012>.

