

Dyeing Wastewater Treatment Using a Batch Electrocoagulation System and Investigating the Effect of Retention Time and Electrode Distance on Removal Efficiency

Shima Rezaei¹, Manouchehr Heidarpour^{1*}  and Abbas Aghakhani²

(Received: January 21-2025 ; Revised: April 5-2025 ; Accepted: May 13-2025)

1. Department of Water Science and Engineering, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

2. Isfahan Science and Technology Town, Isfahan, Iran.

*: Corresponding author Email: heidar@iut.ac.ir

Abstract

The growing concern for environmental protection and increasing demand for green approaches to address environmental problems have prompted researchers to explore a sustainable and reliable method for treating dyeing wastewater. One of the sustainable and reliable methods is the electrocoagulation process. In this study, a batch electrocoagulation reactor was designed to evaluate the efficiency of this process in treating dyeing wastewater. The effects of two parameters, electrode distance and retention time, on pollutant removal efficiency were investigated. Electrode distances of 2, 5, and 7 cm were tested, and retention times of 10, 15, 20, 25, and 30 minutes were examined. Results indicated that the optimal electrode distance was 5 cm and the optimal retention time was 20 minutes. Under these conditions, the removal efficiency of BOD, COD, TSS, color, and turbidity reached 83%, 85%, 98%, 98%, and 93%, respectively. The results of this research demonstrate the significant potential of the electrocoagulation system for treating dyeing wastewater.

Keywords: Dyeing wastewater, Electrocoagulation, Electrode distance, Retention time, Removal efficiency

How to cite this article: Rezaei, S., Heidarpour, M. and Aghakhani, A. 2025. Dyeing Wastewater Treatment Using a Batch Electrocoagulation System and Investigating the Effect of Retention Time and Electrode Distance on Removal Efficiency. *J. Water and Soil Sci.* 29(2):183-198. DOI: [10.47176/jwss.29.2.3076](https://doi.org/10.47176/jwss.29.2.3076)

Copyright © 2025 Rezaei et al. Published by Isfahan University of Technology.



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.

تصفیه فاضلاب رنگرزی با استفاده از سیستم انعقاد الکتریکی ناپیوسته و بررسی اثر زمان ماند و فاصله الکترود بر راندمان حذف

شیما رضایی^۱، منوچهر حیدرپور^{۱*}  و عباس آقاخانی^۲

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۲؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱/۱۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۲/۲۳)

۱. گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

۲. شهرک علمی تحقیقاتی اصفهان، اصفهان، ایران.

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: heidar@iut.ac.ir

چکیده

تمایل به حفاظت از محیط زیست و افزایش تقاضای شیوه های سبز در برخورد با معضلات زیست محیطی، پژوهشگران را به سمت در نظر گرفتن روشی پایدار و مطمئن در تصفیه فاضلاب رنگرزی سوق می دهد. یکی از این روش ها، تصفیه با استفاده از فرایند انعقاد الکتریکی است. در این پژوهش، به منظور ارزیابی کارایی سیستم انعقاد الکتریکی در تصفیه فاضلاب رنگرزی، یک رآکتور انعقاد الکتریکی ناپیوسته طراحی و تأثیر دو پارامتر فاصله بین الکترودها و زمان ماند بر راندمان حذف آلاینده ها بررسی شد. به منظور بررسی تأثیر فاصله الکترود، فاصله های ۲، ۵ و ۷ سانتی متر در نظر گرفته شد و به منظور مشخص کردن تأثیر زمان ماند، آزمایش ها با زمان ماند ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ دقیقه انجام شد. بررسی نتایج نشان داد که بهترین فاصله بین الکترودها، ۵ سانتی متر و بهترین زمان ماند، ۲۰ دقیقه است که در این حالت، راندمان حذف COD، BOD، TSS، رنگ و کدورت به ترتیب ۸۳، ۸۵، ۹۸، ۹۸ و ۹۳ درصد محاسبه شد. نتایج این پژوهش نشان می دهد که سیستم انعقاد الکتریکی پتانسیل زیادی در تصفیه فاضلاب رنگرزی دارد.

واژه های کلیدی: فاضلاب رنگرزی، انعقاد الکتریکی، فاصله الکترود، زمان ماند، راندمان حذف

حق انتشار این مستند، متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است. © ۱۴۰۴.

این مقاله تحت گواهی زیر منتشر شده و هر نوع استفاده غیر تجاری از آن مشروط به استناد صحیح به مقاله و با رعایت

شرایط مندرج در آدرس زیر مجاز است: (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)



مقدمه

آلودگی محیط زیست یک مشکل جدی است که وجود بشر و سایر اشکال زندگی در سیاره زمین را تهدید می کند و هرچه به سمت جلو و آینده حرکت می کنیم بر اثر عواملی مانند افزایش جمعیت، استفاده نادرست و بیش از اندازه از آب، تغییرات اقلیمی و غیره بر مشکلات و ارزش آن روز به روز می افزاید (۹). کاهش قابل توجه در کیفیت و کمیت آب شیرین موجود، نگرانی هایی را در مورد تأثیرات متعاقب آن نه تنها بر سلامت انسان و اکوسیستم، بلکه بر اقتصاد جهانی ایجاد می کند. سازمان ملل متحد با درک اهمیت و فوریت کاهش بحران آب شیرین، «آب پاک و بهداشت» را به عنوان هدف شماره شش که تا سال ۲۰۳۰ تحت جنبش اهداف توسعه پایدار محقق می شود، قرار داد. برای رسیدن به این هدف، هشت هدف تعریف شده که یکی از آن ها بهبود کیفیت آب، تصفیه فاضلاب و استفاده مجدد ایمن است (۳۳).

بخش صنعت در کشور نقش عمده ای در آلودگی ذخایر آب شیرین دارد. از طرفی این بخش به عنوان یکی از مصرف کنندگان عمده آب در کشور با مصرف بیش از یک میلیارد متر مکعب به حساب می آید (۱۷). در حال حاضر، تخلیه مقدار زیادی رنگ از صنایع و کارخانه ها باعث آلودگی آب های جاری می شوند. فرایند تولید محصولات رنگی در صنایع، مقادیر زیادی آب به کار می برند که نتیجه آن تولید حجم عظیمی از پساب رنگی است. صنایع نساجی، چاپ، کاغذ، فرآوری مواد غذایی و دباغی عمدتاً مسئول تولید فاضلاب رنگ هستند (۳۷). سالانه حدود ۱۰۰ هزار نوع رنگ مختلف در سرتاسر دنیا به میزان حدود ۸۰۰۰۰۰ تن تولید می شود (۳۰). تخمین زده شده است ۱۵ درصد مواد رنگزا طی فرایندهای رنگرزی هدر می رود و به صورت پساب وارد محیط زیست می شوند. از این رو تصفیه پساب های رنگی قبل از تخلیه آن ها به محیط زیست ضروری است.

روش انعقاد الکتریکی یا Electrocoagulation که آن را به اختصار EC می نامند، یک روش شیمیایی اصلاح شده است. بیش از ۸۵ درصد حذف آلاینده ها با تصفیه EC روی چندین نوع پساب، قابلیت اطمینان آن را به عنوان یک فناوری جایگزین

برای تصفیه پساب ثابت می کند (۳۰). فرایند EC به دلیل مونتاژ آسان، ایمنی، زمان واکنش کوتاه، ظرفیت انتخابی، استفاده کم از مواد شیمیایی، سهولت کار و راندمان خوب در تصفیه آب، به عنوان یک فناوری سبز شناخته شده است (۱۵ و ۲۹). پارامترهای مؤثر بر کارایی سیستم انعقاد الکتریکی، دانسیته جریان الکتریکی، زمان ماند، هندسه راکتور و الکترودهای EC (جنس الکترود، سطح و فاصله الکترود) هستند. جنس الکترود، واکنش های الکتروشیمیایی را که در طول فرایند EC رخ می دهد تعیین می کنند و بر هزینه فرایند انعقاد الکتریکی مؤثر است. با توجه به ظرفیت بیشتر یون های فلزی چند ظرفیتی در ایجاد پل های بین ذرات، استفاده از این یون ها منجر به افزایش کارایی فرایند می شود. از میان فلزات مختلف، آلومینیوم و آهن به دلیل زیست سازگاری، هزینه کم و تولید یون های چند ظرفیتی، به عنوان رایج ترین مواد برای ساخت الکترود در این فرایند شناخته شده اند (۲۱).

فاصله الکترودها یک پارامتر کنترل کننده است که می تواند بر اندازه راکتور و مصرف انرژی تأثیر بگذارد و همچنین می تواند تأثیر قابل توجهی بر هزینه کلی تصفیه داشته باشد (۲۷). به طور کلی طبق پژوهش های انجام شده چنانچه فاصله الکترودها از فاصله بهینه بیشتر شود، درصد حذف و کارایی فرایند انعقاد الکتریکی کاهش می یابد (۳). از طرف دیگر کاهش بیش از حد فاصله بین الکترودها باعث افزایش دمای راکتور شده و همچنین به دلیل کاهش ولتاژ، باعث کاهش مصرف انرژی می شود.

فرایند انعقاد و راندمان حذف آلاینده ها به پارامتر مهم زمان ماند وابسته است. افزایش زمان سبب تولید هیدروکسیدهای فلزی و در نتیجه مواد منعقدکننده بیشتر در محلول می شود (۴۰). از طرفی مقادیر زیاد جریان، زمان و ولتاژ ممکن است بر فرایند تأثیر منفی بگذارد و سبب انجام واکنش های ثانویه، تغییر بار ذرات کلوئیدی و پراکنده شدن آن ها، کاهش عمر الکترودها، افزایش دمای محلول و کاهش راندمان انعقاد الکتریکی شود. بنابراین در جریان، ولتاژ و زمان های خیلی زیاد از یک زمانی به بعد میزان راندمان حذف کم خواهد شد (۱۲).

فاضلاب دباجی انجام داد که در آن آند به صورت یک لوله چرخان و کاتد به صورت حلقه دور آند قرار گرفت. میزان حذف COD در مدت زمان ۱۰ دقیقه ۹۱٪ محاسبه شد.

برای مطالعه اهمیت و بررسی عوامل و تأثیر متقابل آن‌ها در عملکرد فرایند، باید پژوهش‌های دقیقی انجام شود. ترکیب نادرست پارامترها و درک نادرست تأثیر آن‌ها بر یکدیگر ممکن است منجر به کاهش کارایی سیستم EC شود؛ بنابراین، می‌توان استنباط کرد که راندمان حذف فرایند EC به طراحی فیزیکی بهینه رآکتور و پارامترهای عملیاتی بستگی دارد (۱۴). طراحی رآکتور، نقطه کانونی فرایند تصفیه آب به روش انعقاد الکتریکی است. در این پژوهش یک رآکتور انعقاد الکتریکی بسته برای حذف رنگ از فاضلاب کارخانه رنگرزی ساخته و اثرهای پارامترهای زمان ماند و فاصله بین الکترودها بر خوردگی الکترود، مصرف انرژی، pH و راندمان حذف کارآمد رنگ، COD، BOD، TSS و کدورت مورد بررسی قرار می‌گیرد.

مواد و روش‌ها

مشخصات فاضلاب

فاضلاب رنگرزی صنعتی از یک کارخانه رنگرزی در استان اصفهان به طور مستقیم تهیه شد. جدول ۱ مشخصات عمده فاضلاب رنگرزی مورد استفاده در این مطالعه و استاندارد تخلیه فاضلاب طبق استاندارد ایران را نشان می‌دهد.

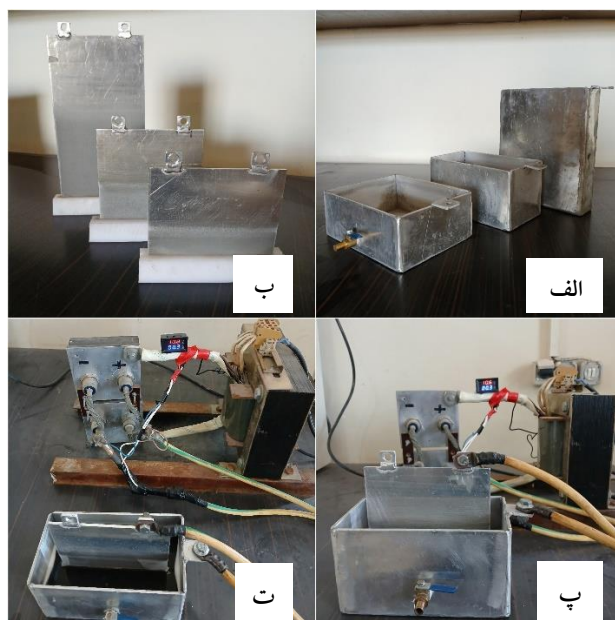
طراحی و ساخت رآکتور

بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که طراحی رآکتورهای فرایند انعقاد الکتریکی ناپیوسته در چند دهه گذشته تغییرات قابل توجهی نداشته است (۱). بنابراین، اولین مرحله از این مطالعه، توسعه یک رآکتور EC جدید به منظور افزایش کارایی سیستم بوده است. همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده، برای انجام آزمایش انعقاد الکتریکی، سه رآکتور در مقیاس آزمایشگاهی با حجم ثابت ۱/۵ لیتر طراحی و ساخته شد (شکل ۱- الف). برای ساخت بدنه رآکتورها از یک ورق آلومینیومی به

ملا و همکاران (۱۸) کارایی فرایند انعقاد الکتریکی را در تصفیه فاضلاب نساجی ارزیابی کردند. در شرایط بهینه، میزان حذف رنگ ۹۸ درصد محاسبه شد. زارووال و همکاران (۳۹) میزان تصفیه پساب نساجی صنعتی را در یک رآکتور ناپیوسته مورد بررسی قرار دادند و اثرهای پارامتر زمان را بر رنگ‌زدایی و راندمان حذف COD بررسی کردند. نتایج نشان داد که انعقاد الکتریکی قادر به دستیابی به ۱۰۰ درصد حذف رنگ و ۸۴ درصد حذف COD بوده است. مرزوک و همکاران (۱۶) عملکرد یک رآکتور جریان افقی مستطیلی را با استفاده از الکترودهای آلومینیومی ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که افزایش جریان الکتریکی باعث افزایش راندمان حذف رنگ می‌شود. رودریگز و همکاران (۲۶) از طرح جدیدی از رآکتور فرایند انعقاد الکتریکی برای حذف رنگ از پساب استفاده کردند که در این پژوهش موفق به حذف ۹۵ درصد رنگ در زمان ماند ۱۰ دقیقه شدند. آسایتامبی و همکاران (۴) به بررسی پارامترهای مؤثر در سیستم انعقاد الکتریکی ناپیوسته پرداختند. نتایج نشان داد که بیشترین راندمان حذف COD در pH خنثی به دست می‌آید و همچنین افزایش بیش از حد زمان ماند و کاهش بیش از حد فاصله بین الکترود، منجر به کاهش راندمان سیستم می‌شود. هاناکو و باگاستیو (۶) از یک رآکتور انعقاد الکتریکی استوانه‌ای برای تصفیه فاضلاب نساجی استفاده کردند که در آن، آند به صورت یک استوانه توپر و کاتد به صورت صفحه مارپیچ دور آند قرار گرفت. درصد حذف رنگ و COD به ترتیب ۸۹ و ۱۰۰ درصد به دست آمد. ویلابونا و همکاران (۳۶) در مطالعه‌ای روی فاضلاب رنگ مصنوعی، سیستم انعقاد الکتریکی ناپیوسته را در شرایط بهینه با زمان ماند ۶۰ دقیقه مورد بررسی قرار دادند و موفق به حذف ۸۴٪ رنگ شدند. فیردوس و همکاران (۵) از سیستم انعقاد الکتریکی برای حذف رنگ از فاضلاب نساجی استفاده کردند. نتایج نشان داد که فرایند انعقاد الکتریکی با راندمان حذف رنگ ۹۹٪ و بدون افت کیفیت رنگرزی، امکان استفاده مجدد از پساب را در فرایند نساجی فراهم کرده است. ورما (۳۵) مطالعه‌ای روی سیستم انعقاد الکتریکی برای تصفیه

جدول ۱. مشخصات فاضلاب خام و استاندارد خروجی فاضلاب برای مصارف کشاورزی و آبیاری

پارامتر	مقدار	استاندارد تخلیه فاضلاب
pH	۶/۴	۶-۸/۵
(mg/L) BOD	۵۰۰	۱۰۰
(mg/L) COD	۱۸۷۰	۲۰۰
(mg/L) TSS	۳۴۰	۱۰۰
کدورت (NTU)	۴۰۰	۵۰
رنگ (mg/L)	۱۰۵۰۰	۷۵



شکل ۱. رآکتورهای استفاده شده در پژوهش

خروجی آن به ۱۰/۵ ولت کاهش یافته و به الکترودهای کاتد و آنود متصل شد (شکل ۱- پ، ت).

چندین مطالعه نشان دادند که کمترین فاصله مطلوب بین الکترودها ۱ سانتی متر و بیشترین فاصله بررسی شده، ۷ سانتی متر بوده است (۴، ۱۱، ۲۵، ۳۱ و ۳۲). بنابراین به منظور بررسی تأثیر فاصله الکترود بر کارایی سیستم، فاصله‌های متفاوت ۲، ۵ و ۷ سانتی متر انتخاب شد. برای ایجاد این فاصله‌ها، عرض رآکتورها به ترتیب برابر با ۵، ۱۱ و ۱۵ سانتی متر در نظر گرفته شد (عرض رآکتورها تقریباً دو برابر فاصله بین الکترودهاست). منظور از فاصله

ضخامت ۴ میلی متر استفاده شد. در مطالعاتی که تاکنون در زمینه انعقاد الکتریکی ناپیوسته انجام شده، الکترودها درون یک محفظه قرار گرفته است؛ ولی در این پژوهش بدنه رآکتور به عنوان الکترود کاتد در نظر گرفته شده است. یک صفحه آلومینیومی به عنوان الکترود آنود در مرکز هر رآکتور قرار گرفت (شکل ۱- ب). برای جلوگیری از اتصال کوتاه بین دو الکترود، کف رآکتورها با یک لایه عایق تفلون پوشانده شد. برای نمونه برداری، یک شیر خروجی در بدنه هر رآکتور تعبیه شد. منبع تغذیه سیستم، برق شهری ۳۸۰ ولت بوده که پس از عبور از یک منبع تغذیه، ولتاژ

نتایج و بحث

در ادامه نتایج کارایی سیستم انعقاد الکتریکی و تأثیر پارامترهای زمان ماند و فاصله الکترود بر میزان خوردگی الکترود، مصرف انرژی، pH و راندمان حذف BOD، COD، TSS، رنگ و کدورت بررسی می‌شود.

خوردگی الکترود

آند به عنوان الکترود قربانی در فرایند انعقاد الکتریکی شناخته می‌شود. با وقوع واکنش اکسیداسیون روی سطح آند، کاتیون‌های فلزی وارد محلول شده و مواد منعقدکننده در محلول تولید می‌کنند (۱۰). خوردگی الکترودها به مدت زمان انجام فرایند بستگی دارد (۲). مطابق شکل ۳ میزان خوردگی آند با افزایش زمان ماند در فرایند انعقاد الکتریکی به دلیل افزایش تولید کاتیون، روند صعودی دارد. با افزایش زمان واکنش از ۱۰ تا ۳۰ دقیقه، خوردگی الکترود از ۰/۴ به ۱/۲ گرم در فاصله بین الکترود ۲ سانتی‌متر افزایش می‌یابد. بررسی تأثیر فاصله الکترود بر خوردگی آند نشان می‌دهد که طبق قانون فارادی، افزایش فاصله بین الکترودها، به دلیل کاهش جریان الکتریکی منجر به کاهش میزان یون‌های آزاد شده از آند می‌شود و در نتیجه خوردگی الکترود کاهش می‌یابد (۲۸)؛ به طوری که در زمان ۳۰ دقیقه میزان خوردگی الکترود از ۱/۲ گرم در فاصله ۲ سانتی‌متر به کمتر از ۱/۲ گرم در فواصل ۵ و ۷ سانتی‌متر رسیده است.

مصرف انرژی

مصرف انرژی به عنوان مهم‌ترین پارامتر اقتصادی در فرایند انعقاد الکتریکی، تحت تأثیر پارامترهای زمان ماند و جریان الکتریکی قرار دارد (۱۱). بر اساس معادله (۲)، افزایش هر کدام از این پارامترها منجر به افزایش مصرف انرژی می‌شود. نتایج حاصل از شکل ۴ نشان می‌دهد که با افزایش زمان ماند، جریان الکتریکی و در نتیجه، مصرف انرژی به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد (۸). با افزایش زمان ماند از ۱۰ تا ۳۰ دقیقه، مصرف انرژی الکتریکی در فاصله الکترود ۲ سانتی‌متر از ۷/۳ به ۲۳/۲ کیلووات ساعت بر متر مکعب

الکترودها، فاصله بین صفحه آند و دیواره‌های راکتور است. شکل ۲ نمای شماتیک راکتور را نشان می‌دهد که در آن قسمت‌های مختلف و همچنین فاصله بین الکترودها مشخص شده است.

مشخصات راکتورهای مورد استفاده در این پژوهش در جدول ۲ به طور کامل ارائه شده است.

به منظور مشخص کردن تأثیر زمان ماند بر کارایی سیستم انعقاد الکتریکی، آزمایش‌ها با زمان ماند متفاوت ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ دقیقه با ۳ تکرار انجام شد. در طول آزمایش، نمونه‌های ۱/۵ لیتری فاضلاب با زمان‌های ماند متفاوت، در راکتور انعقاد الکتریکی قرار داده شدند. وزن آند قبل و بعد از هر آزمایش اندازه‌گیری شد تا میزان کاهش وزن آند (خوردگی الکترود) پس از هر آزمایش تعیین شود. پس از هر آزمایش، نمونه‌ای از راکتور انعقاد الکتریکی به مدت ۴۵ تا ۶۰ دقیقه برای ته‌نشینی ساکن قرار داده شد و پس از ته‌نشینی، پارامترهای میزان خوردگی الکترود، مصرف انرژی، BOD، COD، TSS، pH، رنگ و کدورت بررسی شد.

در این پژوهش مقدار COD و رنگ با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر HACH LANGE DR6000 تعیین شد. BOD نیز با روش انکوباسیون اندازه‌گیری شد. pH نمونه‌ها با استفاده از pH متر مدل HACH d40HQ و کدورت با دستگاه کدورت‌سنج مدل LaMotte 2020we اندازه‌گیری شد و برای اندازه‌گیری جریان از دستگاه آمپر متر دیجیتال استفاده شد.

راندمان حذف بر حسب درصد برای هر یک از پارامترهای مورد مطالعه با استفاده از معادله (۱) محاسبه شده است:

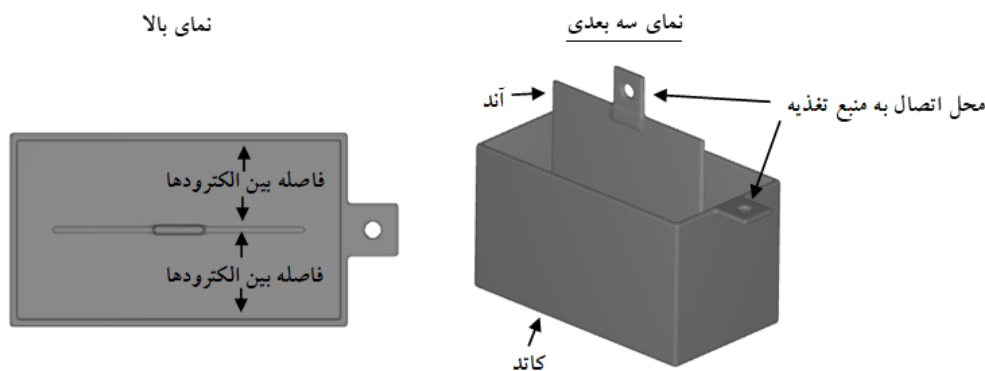
$$R = \frac{C_0 - C_1}{C_0} \times 100 \quad (1)$$

R راندمان حذف (%)، C_0 غلظت آلاینده قبل از تصفیه و C_1 غلظت آلاینده بعد از تصفیه است.

میزان مصرف انرژی در فرایند انعقاد الکتریکی با استفاده از معادله (۲) محاسبه می‌شود:

$$EEC(KWh/m^3) = \frac{U \times I \times t}{V} \quad (2)$$

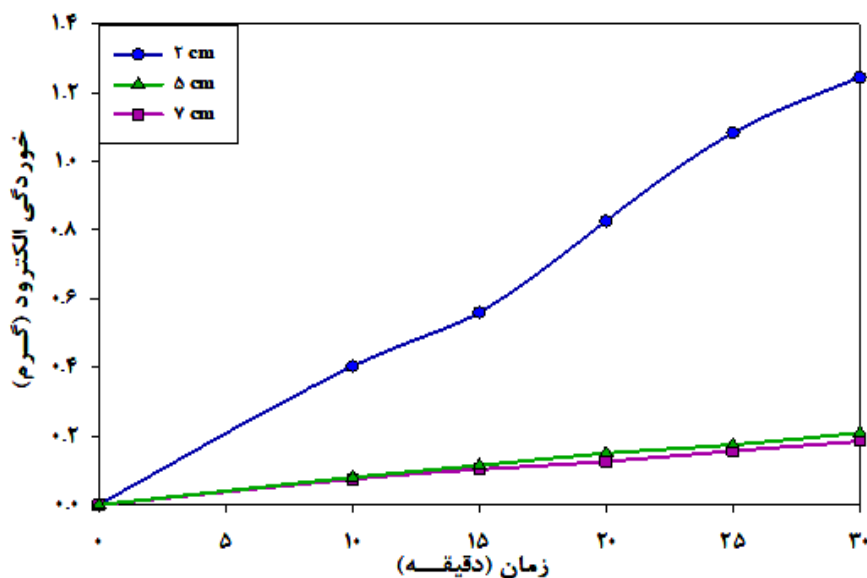
در این معادله، U ولتاژ اعمال شده (V)، I جریان اعمال شده (A)، t زمان (hr) و V حجم فاضلاب (m^3) است (۲۵).



شکل ۲. شماتیک رآکتور انعقاد الکتریکی در نماهای مختلف

جدول ۲. مشخصات رآکتورها

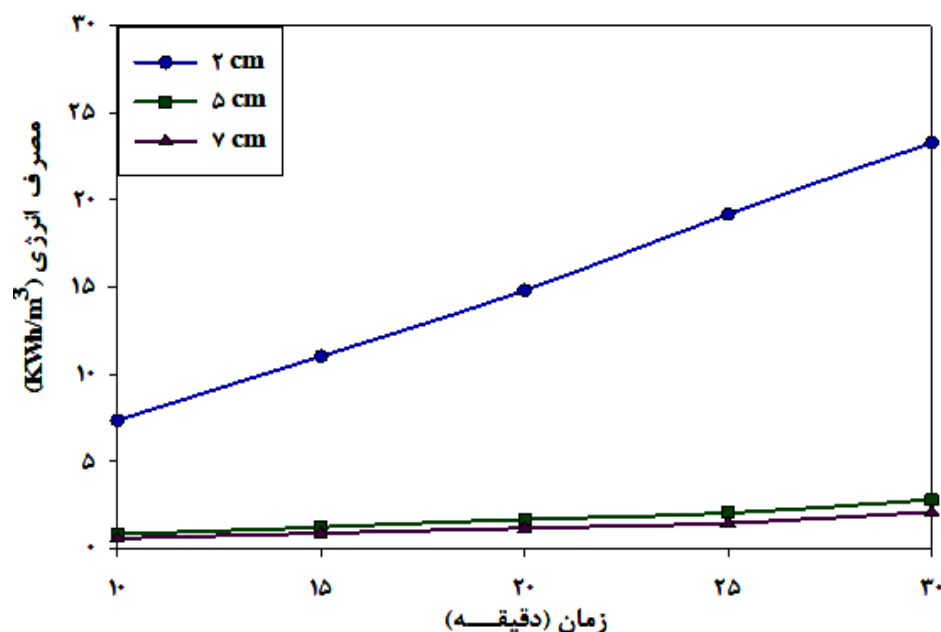
شماره مخزن	مشخصات رآکتور (کاتد)					مشخصات آند	
	طول (cm)	عرض (cm)	ارتفاع (cm)	طول (cm)	ارتفاع (cm)	طول (cm)	ارتفاع (cm)
۱	۲۰	۵	۲۵	۱۶	۲۹		
۲	۲۰	۱۱	۱۱	۱۶	۱۵		
۳	۲۰	۱۵	۸	۱۶	۱۲		



شکل ۳. میزان خوردگی الکترود بر حسب زمان در فواصل مختلف الکترود

کاهش جریان و در نتیجه کاهش مصرف انرژی می شود (۲۴). کاهش جریان به معنای کاهش سرعت واکنش های الکتروشیمیایی و در نتیجه کاهش سرعت تشکیل لخته است. در فواصل ۵ و ۷ سانتی متری افزایش مصرف انرژی

افزایش می یابد. تحلیل نتایج همچنین نشان می دهد که فاصله بین الکترودها تأثیر زیادی بر شدت جریان منتقل شده بین دو الکترود و مصرف انرژی دارد. در یک ولتاژ ثابت، افزایش فاصله بین الکترودها باعث افزایش مقاومت الکتریکی،



شکل ۴. میزان مصرف انرژی بر حسب زمان در فواصل مختلف الکترود

با سرعت کمتری اتفاق می‌افتد و در زمان ۳۰ دقیقه به ۲/۸ و ۲/۱ کیلووات ساعت بر متر مکعب رسیده است. اما در فاصله ۲ سانتی متری، افزایش شدید مصرف انرژی و دمای راکتور دیده می‌شود (۳۶)؛ به این دلیل که الکترود آلومینیوم رسانایی بسیار زیادی دارد. بنابراین با کاهش فاصله الکترود و در نتیجه کاهش مقاومت الکتریکی، الکترود جریان الکتریکی بیشتری را عبور می‌دهد و رسانایی بسیار زیاد آلومینیوم و گرمایش ژول باعث افزایش دمای محلول شده است. اما با افزایش فاصله الکترود، مقاومت الکتریکی افزایش یافته است که نقش بسزایی در محدود کردن جریان الکتریکی دارد و این امر باعث می‌شود که میزان جریان الکتریکی و در نتیجه مصرف انرژی کاهش پیدا کند. شاهدی و همکاران (۲۸) نشان دادند که با افزایش فاصله بین الکترود، میزان مصرف انرژی کاهش می‌یابد.

pH

همان‌طور که در پژوهش‌های پیشین نیز گزارش شده است، pH محلول تأثیر قابل توجهی بر راندمان فرایند انعقاد الکتریکی دارد. این تأثیر به واسطه تغییراتی است که pH بر انحلال الکترودها و خصوصیات فیزیکوشیمیایی منعقدکننده‌ها دارد (۱۷). در محیط‌های بسیار اسیدی و بازی، گونه‌های مونومری مانند

$Al(OH)_4^-$ تشکیل می‌شوند. این عامل انعقادی، در تجزیه ساختار رنگ‌ها و جذب مولکول‌های رنگ و سایر آلاینده‌ها فعالیت چندانی ندارد؛ در نتیجه، گونه‌های پلیمری $Al_{13}(OH)_{34}^{+5}$ و $Al_{13}O_4(OH)_{24}^{+7}$ تشکیل می‌شوند. این گونه‌های پلیمری نه تنها سطح وسیعی برای جذب مولکول‌های رنگ فراهم می‌کنند، بلکه ذرات باردار روی رنگ‌ها را نیز خنثی می‌کنند. محدوده pH بهینه بین ۷ تا ۸ است (۳۸) و در شرایط pH بهینه، با استفاده از الکترودهای آلومینیوم، بیشترین سطوح تولید هیدروکسید فلز جامد و راندمان حذف حاصل می‌شود (۲۳). نتایج ارائه‌شده در جدول ۳ نشان می‌دهد که با افزایش زمان ماند، pH محلول نیز افزایش می‌یابد (۳۶). این پدیده را می‌توان به تشکیل گاز هیدروژن (H_2) در کاتد نسبت داد (۲۰). به عبارت دقیق‌تر، علت این امر، حضور یون‌هایی است که در آند تولید شده و در محلول باقی می‌مانند. این یون‌ها با یون‌های هیدروکسید (OH^-) که در کاتد تولید می‌شوند، واکنش نمی‌دهند و در نتیجه، غلظت یون‌های هیدروکسید در محلول افزایش یافته و pH آن را بیشتر می‌کنند (۱۳). در پژوهش‌های هاناکو و باگاستیو (۶) و رودریگز و همکاران (۲۶) نیز این نتایج حاصل شد. نتایج آزمایش‌ها همچنین نشان می‌دهد که افزایش pH

جدول ۳. تغییرات pH در فرایند انعقاد الکتریکی

فاصله الکترود (سانتی متر)			زمان ماند (دقیقه)
۷	۵	۲	
۶/۹۷	۶/۴۵	۶/۸۵	۰ (نمونه خام)
۷/۹۶	۶/۷۸	۸/۲۲	۱۰
۸/۰۴	۶/۷۵	۸/۸۱	۱۵
۸/۱۲	۶/۷۷	۹/۳	۲۰
۸/۲۹	۶/۷۹	۹/۶۱	۲۵
۸/۳۲	۶/۹۶	۹/۷۵	۳۰

است. با این حال، افزایش فاصله بین الکترود تا ۷ سانتی متر، منجر به کاهش راندمان سیستم انعقاد الکتریکی در حذف BOD شده و به ۷۵ درصد رسیده است. این نتیجه ممکن است به این دلیل باشد که افزایش فاصله الکترود، منجر به افزایش مقاومت در محلول و کاهش سرعت انحلال آلومینیوم می شود. با کاهش تولید یون آلومینیوم (Al^{3+})، راندمان حذف ذرات آلودگی نیز کاهش می یابد. بررسی نتایج دیگران نیز نشان می دهد که راندمان حذف آلاینده ها با فاصله بین الکترودها نسبت عکس دارد (۲۰ و ۲۲).

کارایی حذف COD

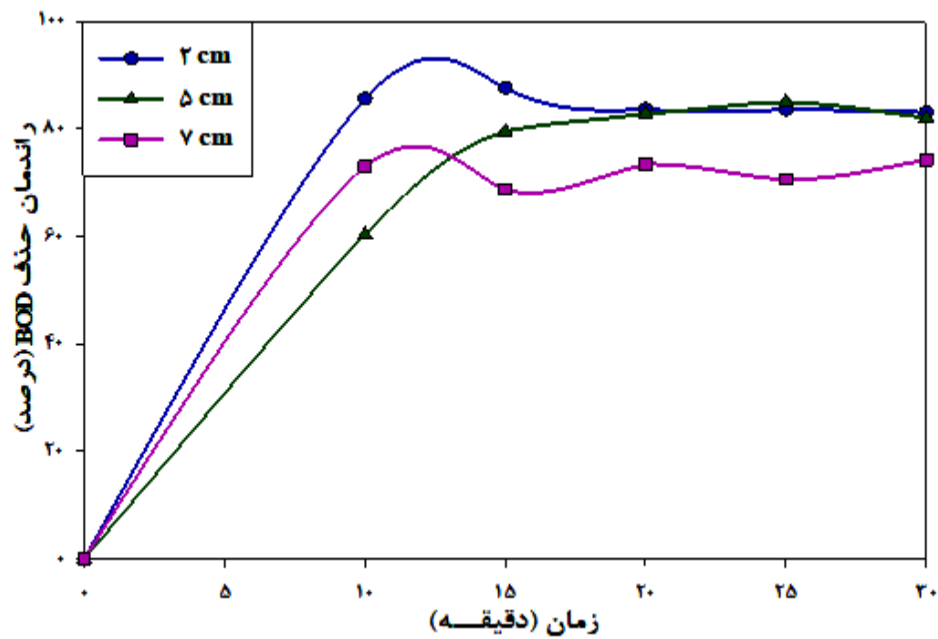
شکل ۶ تأثیر پارامترهای زمان ماند و فاصله الکترود بر میزان حذف COD را در فرایند انعقاد الکتریکی نشان می دهد. با افزایش زمان ماند تا ۲۰ دقیقه، راندمان حذف COD به طور قابل توجهی افزایش داشته است و در فواصل الکترود ۲، ۵ و ۷ سانتی متر به ترتیب به ۸۹، ۸۳ و ۷۳ درصد رسیده است. افزایش زمان ماند تا ۲۰ دقیقه به دلیل فراهم شدن فرصت بیشتر برای تولید منعقدکننده ها، منجر به افزایش راندمان حذف COD می شود. با این حال پس از گذشت این زمان، افزایش بیشتر زمان ماند تأثیر قابل توجهی بر راندمان حذف نداشته و به نظر می رسد که فرایند به تعادل رسیده است. در پژوهش آسایتمبی و همکاران نیز این نتیجه حاصل شد (۴). از سوی دیگر، نتایج نشان می دهد که افزایش

در فواصل الکترودی ۲ و ۷ سانتی متر نسبت به فاصله ۵ سانتی متر به طور قابل توجهی بیشتر بوده است. در فاصله ۵ سانتی متر pH از ۶/۴ به ۶/۹ افزایش یافته است. پژوهش های دیگران نیز نشان داده که بیشترین کارایی در pH خنثی دیده می شود و وقتی فاضلاب دارای pH اسیدی یا قلیایی تر از خنثی باشد، کارایی فرایند انعقاد الکتریکی کاهش می یابد (۴).

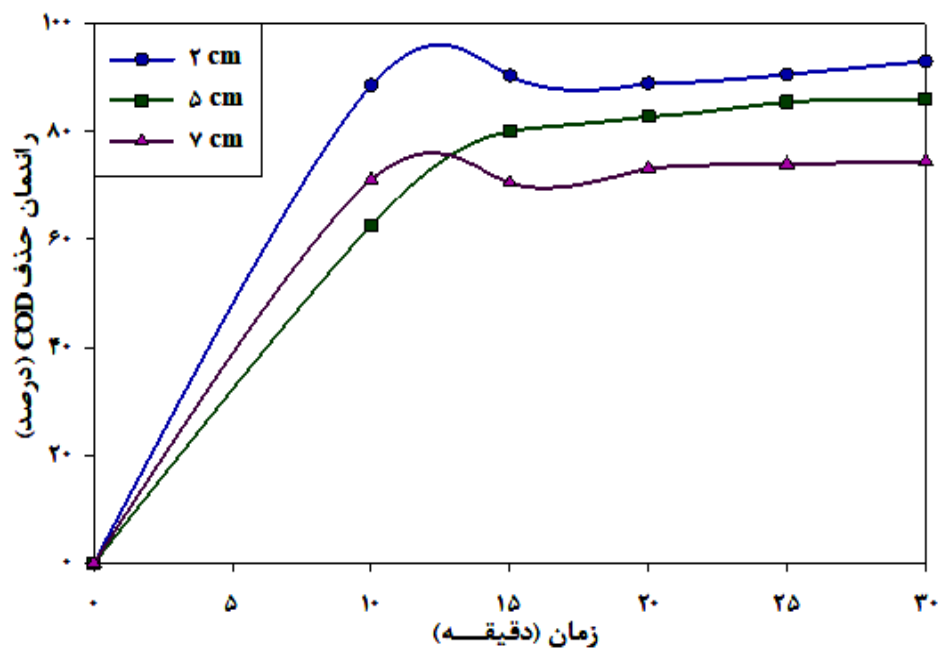
کارایی حذف BOD

شکل ۵ راندمان حذف BOD را برحسب زمان ماند در ۳ فاصله الکترود ۲، ۵ و ۷ سانتی متر نشان می دهد. نتایج نشان می دهد که میزان حذف BOD، با افزایش زمان ماند، افزایش می یابد و در زمان ۲۰ دقیقه به بیشترین کارایی ۸۵٪ رسیده است و پس از آن تقریباً ثابت شده است (۷). کارایی حذف فرایند انعقاد الکتریکی به یون های فلزی تولید شده روی الکترودها بستگی دارد. نرخ تولید حباب های گاز و یون ها در الکترود به مدت زمان حرکت الکترودها از آند به کاتد وابسته است. یون OH^- از کاتد به سمت آند حرکت می کند (۲۰). زمان واکنش طولانی تر موجب تولید بیشتر یون های فلزی و لخته های هیدروکسید می شود (۳۵)؛ در نتیجه، با افزایش زمان واکنش، حذف آلاینده ها بیشتر خواهد بود.

بررسی تأثیر فاصله الکترود بر کارایی نشان می دهد که راندمان حذف BOD با تغییر فاصله الکترود از ۲ به ۵ سانتی متر، تغییر چندانی نداشته است و در زمان ۲۰ دقیقه به ۸۵ درصد رسیده



شکل ۵. میزان حذف BOD بر حسب زمان در فواصل مختلف الکترود



شکل ۶. میزان حذف COD بر حسب زمان در فواصل مختلف الکترود

کارایی حذف TSS

شکل ۷ تأثیر زمان ماند و فاصله الکترود را بر راندمان حذف TSS نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که فاصله الکترود ۵ سانتی‌متر بیشترین کارایی را در حذف TSS داشته؛ به‌طوری

فاصله بین الکترودها منجر به کاهش راندمان حذف COD می‌شود؛ به‌طوری که بیشترین راندمان حذف در فاصله ۲ سانتی‌متر و کمترین راندمان در فاصله ۷ سانتی‌متر دیده شده است.

شکل ۹ تصویر پساب قبل و بعد از تصفیه را در زمان‌های ماند ۱۰ تا ۳۰ دقیقه برای فواصل الکتروود ۲، ۵ و ۷ سانتی‌متر نشان می‌دهد.

کارایی حذف کدورت

حذف کدورت به‌عنوان یک پاسخ مهم برای ارزیابی عملکرد فرایند EC در نظر گرفته شده و زمان ماند به‌عنوان مهم‌ترین متغیر مؤثر بر حذف کدورت معرفی شده است (۱۹). همان‌طور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است، سیستم انعقاد الکتریکی در حذف کدورت بسیار تأثیرگذار بوده؛ به‌طوری که راندمان حذف ۹۰ درصد در زمان ماند ۱۵ دقیقه رخ داده است.

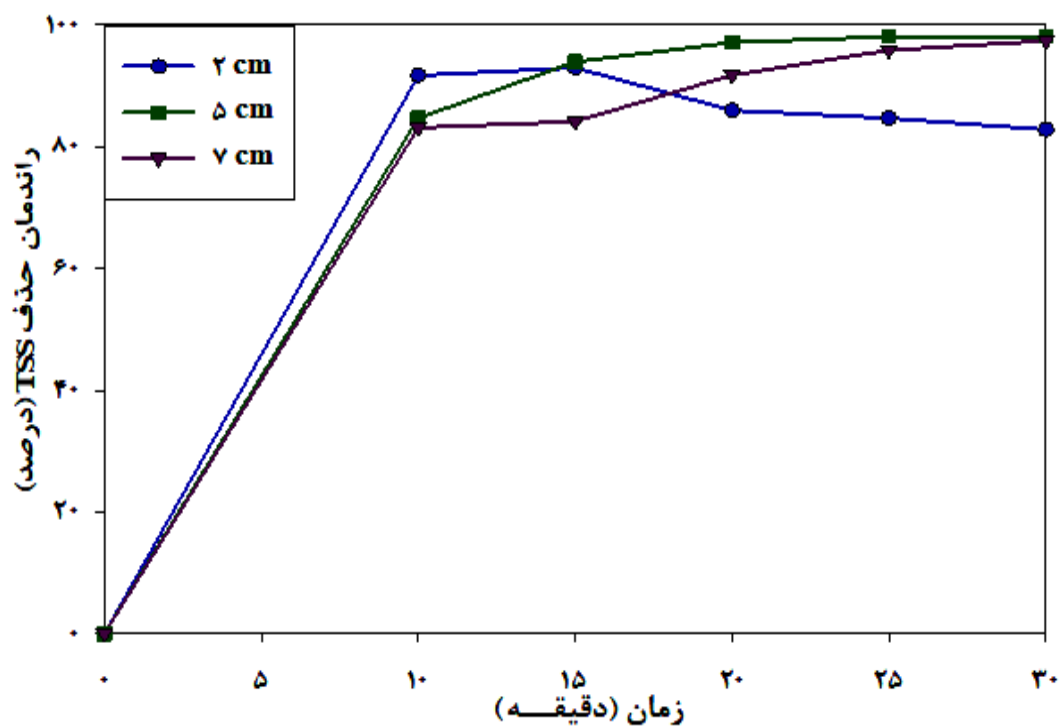
نتیجه‌گیری

در این پژوهش یک سیستم انعقاد الکتریکی ناپیوسته با هدف تصفیه فاضلاب رنگرزی طراحی شد. به‌منظور ارزیابی عملکرد این سیستم، تأثیر دو پارامتر زمان ماند و فاصله بین الکتروودها روی میزان خوردگی الکتروود، مصرف انرژی، pH و راندمان حذف BOD، COD، TSS، رنگ و کدورت بررسی شد. نتایج حاصل از آزمایش‌ها نشان داد که سیستم انعقاد الکتریکی پتانسیل زیادی در تصفیه فاضلاب رنگرزی دارد. بررسی فواصل مختلف الکتروودها و بررسی تأثیر آن‌ها بر پارامترهای مختلف نشان داد که افزایش فاصله بین الکتروودها باعث کاهش کارایی سیستم و کاهش فاصله منجر به افزایش میزان خوردگی الکتروود، مصرف انرژی و دما شده است. از طرف دیگر با توجه به اینکه pH خنثی در فاصله الکتروود ۵ سانتی‌متر به‌دست آمده است؛ بنابراین می‌توان فاصله ۵ سانتی‌متر را به‌عنوان بهترین فاصله بین الکتروود در این

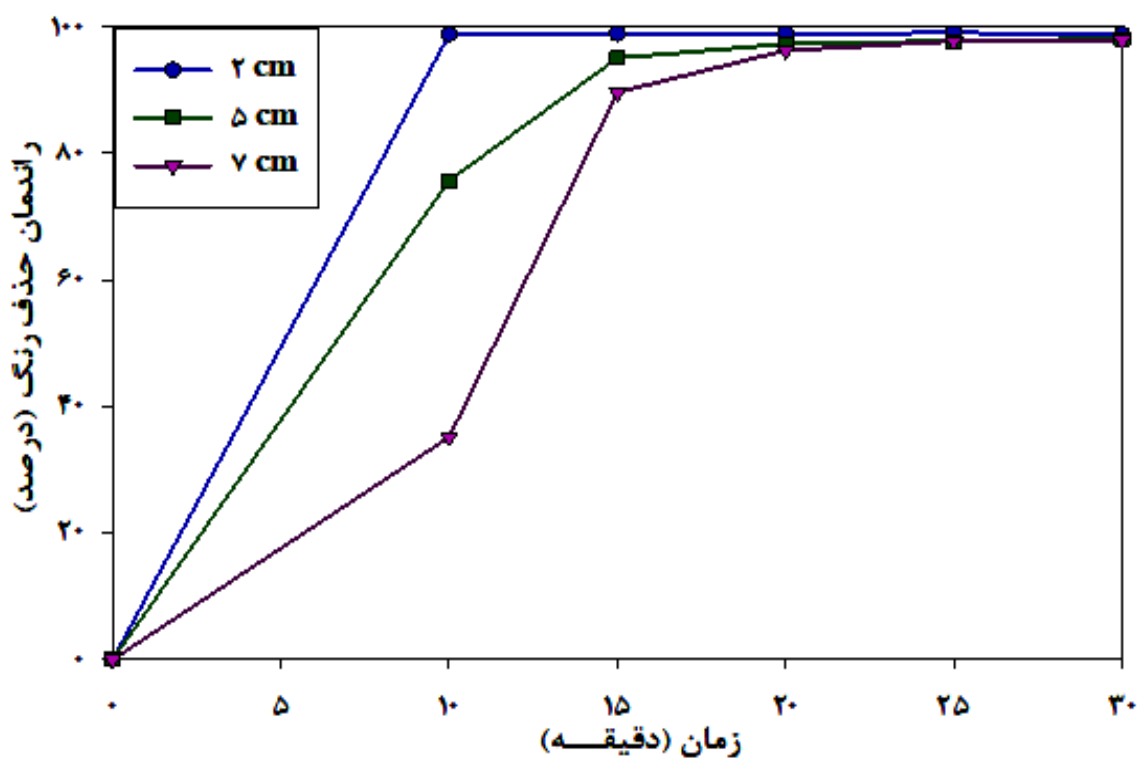
که پس از گذشت ۲۰ دقیقه، راندمان حذف به ۹۸ درصد رسیده است. در مقابل، کاهش فاصله بین الکتروودها به ۲ سانتی‌متر منجر به کاهش راندمان فرایند انعقاد الکتریکی شده است؛ زیرا همان‌طور که در جدول ۳ نشان داده شده، از زمان ماند ۱۵ دقیقه، مقدار pH از ۸/۵ بیشتر شده و افزایش pH منجر به کاهش راندمان حذف BOD و TSS شده است. کاهش فاصله بین الکتروودها با افزایش دمای رآکتور همراه است. وپسالینن و همکاران (۳۴) در بررسی تأثیر دما بر کارایی سیستم انعقاد الکتریکی نشان دادند که افزایش دمای رآکتور، سرعت انحلال الکتروودهای آلومینیومی را افزایش می‌دهد و در نتیجه تعادل واکنش‌های انحلال در طول آزمایش برهم می‌خورد. براساس این یافته‌ها می‌توان نتیجه گرفت که کاهش فاصله بین الکتروودها و افزایش دمای ناشی از آن، منجر به تولید سریع‌تر منعقد کننده‌ها و ایجاد عدم تعادل در واکنش‌های الکتروشیمیایی می‌شود. در این شرایط، اختلال در فرایند لخته‌سازی و در نتیجه افزایش ذرات جامد معلق در نمونه اجتناب ناپذیر است.

کارایی حذف رنگ

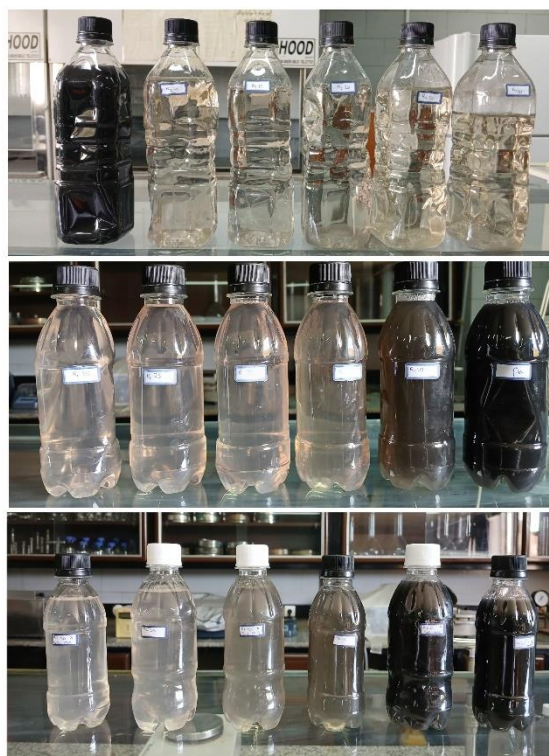
بسیاری از رنگ‌ها به‌دلیل ساختار مولکولی پیچیده و پایدار، در برابر عوامل تجزیه‌کننده نظیر نور، مواد شیمیایی و عوامل بیولوژیکی مقاومت زیادی دارند. این پایداری باعث می‌شود که رنگ‌ها به‌عنوان آلاینده‌های پایدار در محیط‌زیست باقی بمانند. همان‌طور که در شکل ۸ نشان داده شده، سیستم انعقاد الکتریکی پتانسیل زیادی در تصفیه فاضلاب رنگرزی دارد؛ به‌طوری که در زمان ۱۵ دقیقه، به‌اندازه ۹۰ درصد حذف رنگ وجود داشته است. بررسی پژوهش‌های گذشته نیز نشان داده که فرایند انعقاد الکتریکی توانایی زیادی در حذف رنگ از فاضلاب دارد (۴ و ۶).



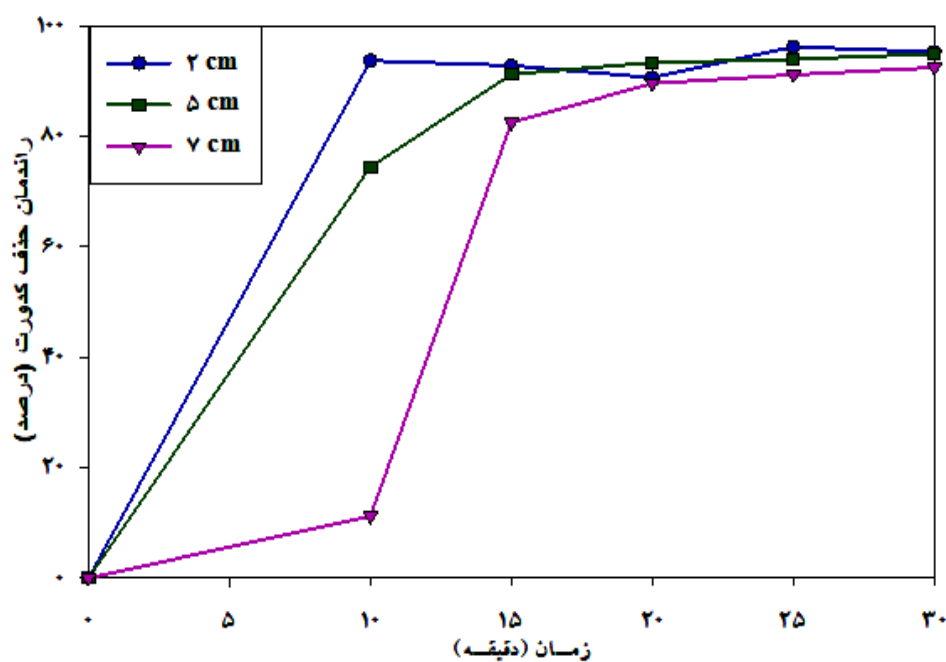
شکل ۷. میزان حذف TSS بر حسب زمان در فواصل مختلف الکترود



شکل ۸. میزان حذف رنگ بر حسب زمان در فواصل مختلف الکترود



شکل ۹- نمونه پساب قبل و بعد از تصفیه



شکل ۱۰. میزان حذف کدورت بر حسب زمان در فواصل مختلف

پارامترهای مورد بررسی، پس از گذشت ۲۰ دقیقه تقریباً ثابت شده است و زمان ماند بیشتر، باعث مصرف انرژی و

پژوهش در نظر گرفت. بررسی تأثیر زمان ماند بر کارایی سیستم انعقاد الکتریکی نشان داد که راندمان حذف

خوردگی الکتروود بیشتر می شود؛ بنابراین می توان این زمان را به عنوان بهترین زمان ماند در نظر گرفت. راندمان حذف پارامترهای BOD، COD، TSS، رنگ و کدورت در فاصله الکتروود ۵ سانتی متر و زمان ماند ۲۰ دقیقه به ترتیب برابر با ۸۳٪، ۸۵٪، ۹۸٪، ۹۸٪ و ۹۳٪ بوده است.

References

منابع مورد استفاده

1. Abdulhadi, B., P. Kot, K. Hashim, A. Shaw, M. Muradov and R. Al-Khaddar. 2021. Continuous-flow electrocoagulation (EC) process for iron removal from water: Experimental, statistical and economic study. *Science of The Total Environment* 760: 143417.
2. Aljaberi, F.Y., S.M. Alardhi, S.A. Ahmed, A.D. Salman, T. Juzsakova, I. Cretescu, P.-C. Le, W.J. Chung, S.W. Chang and D.D. Nguyen. 2022. Can electrocoagulation technology be integrated with wastewater treatment systems to improve treatment efficiency?. *Environmental Research* 214: 113890.
3. Aoudj, S., A. Khelifa, N. Drouiche, M. Hecini and H. Hamitouche. 2010. Electrocoagulation process applied to wastewater containing dyes from textile industry. *Chemical Engineering and Processing :Process Intensification* 49(11): 1176-1182.
4. Asaithambi, P., M.B. Yesuf, R. Govindarajan, P. Selvakumar, S. Niju, T. Pandiyarajan, A. Kadier, D.D. Nguyen, and E. Alemayehu. 2023. Industrial wastewater treatment using batch recirculation electrocoagulation (BRE) process: Studies on operating parameters. *Sustainable Chemistry for the Environment* 2: 100014.
5. Firdous, N., I.A. Shaikh and S. Islam. 2024. Impacts on color properties of textile fabric following repetitive utilization of electro-coagulated dyeing wastewater. *Desalination and Water Treatment* 320: 100742.
6. Hanako, A. and A. Bagastyo. 2023. Removal of Remazol Black B dye using recirculation batch electrocoagulation. In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.
7. Hasheminejada H, M. Sayedbarzin, K. Jeirany and A. Taebi. 2019. The Role of Electrocoagulation and Complementary Flocculation in Reducing the COD of Wastewater Detergents for Irrigation Use. *Journal of Water and Soil Science* 23 (1): 121-131.
8. Huang, X., Y. Zeng, H. Fu, L. Zhong, B. Qi, D. Chen, J. Yu, P. Zhang and S.S. Lee. 2025. Simultaneous Removal of Phosphorus, Chromium (VI), and Antimony (V) from Textile Dye Wastewater by Electrocoagulation. *Journal of Hazardous Materials* 5: 137409.
9. Jamali Jezeh, M., M. Shayannejad and S.M. Hejazi. 2021. Evaluation the performance of filters made of BC, PET and PP textiles in removing oil contaminants from water. *Journal of Water and Soil Science* 24(4): 295-312.
10. Jiménez, C., C. Sáez, P. Cañizares and M.A. Rodrigo. 2016. Optimization of a combined electrocoagulation-electroflotation reactor. *Environmental Science and Pollution Research* 23: 9700-9711.
11. Kambuyi, T. N., Z. Zmirli, B. Bejjany, H. Mellouk, K. Digua, B. Lekhlif and A. Dani. 2022. Performance analysis of a continuous-flow single-channel reactor for surface water treatment using electrocoagulation process. *Chemical Engineering Journal* 428: 131261.
12. Katal, R. and H. Pahlavanzadeh. 2011. Influence of different combinations of aluminum and iron electrode on electrocoagulation efficiency: Application to the treatment of paper mill wastewater. *Desalination* 265(1-3): 199-205.
13. Liu, Y., X. Zhang, W. Jiang, M. Wu and Z. Li. 2021. Comprehensive review of floc growth and structure using electrocoagulation: Characterization, measurement, and influencing factors. *Chemical Engineering Journal* 417: 129310.
14. López-Guzmán, M., M.A. Flores-Hidalgo and L. Reynoso-Cuevas. 2021. Electrocoagulation process: an approach to continuous processes, reactors design, pharmaceuticals removal, and hybrid systems—a review. *Processes* 9(10): 1831.
15. Mamelkina, M.A., F. Vasilyev, R. Tuunila, M. Sillanpää and A. Häkkinen. 2019. Investigation of the parameters affecting the treatment of mining waters by electrocoagulation. *Journal of Water Process Engineering* 32: 100929.
16. Merzouk, B., B. Gourich, A. Sekki, K. Madani, C. Vial and M. Barkaoui. 2009. Studies on the decolorization of textile dye wastewater by continuous electrocoagulation process. *Chemical Engineering Journal* 149(1-3): 207-214.
17. Mohamadi, O., M. Heidarpour and S. Jamali. 2019. Evaluation of COD and BOD5 Removal Efficiency by Combined Treatment Aerobic-Anaerobic (AO) on Sewage of Metal Industries. *Journal of Water and Soil Science* 23(3): 275-287

18. Mollah, M.Y., S.R. Pathak, P.K. Patil, M. Vayuvegula, T.S. Agrawal, J.A. Gomes, M. Kesmez and D.L. Cocke. 2004. Treatment of orange II azo-dye by electrocoagulation (EC) technique in a continuous flow cell using sacrificial iron electrodes. *Journal of Hazardous Materials* 109(1-3): 165-171.
19. Mores, R., H. Treichel, C.A. Zakrzewski, A. Kunz, J. Steffens and R.M. Dallago. 2016. Remove of phosphorous and turbidity of swine wastewater using electrocoagulation under continuous flow. *Separation and Purification Technology* 171: 112-117.
20. Nam, N.T.P. and N.N. Cuong. 2024. Study on COD and color removal efficiency in textile dyeing wastewater by iron electro-coagulation technology combined with persulfate. *In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*.
21. Nguyen, T.T.Q., P. Loganathan, B.K. Dinh, T.V. Nguyen, S. Vigneswaran and H.H. Ngo. 2021. Removing arsenate from water using batch and continuous-flow electrocoagulation with diverse power sources. *Journal of Water Process Engineering* 41: 102028.
22. Patel, S.K., S.C. Shukla, B.R. Natarajan, P. Asaithambi, H.K. Dwivedi, A. Sharma, D. Singh, M. Nasim, S. Raghuvanshi and D. Sharma. 2024. State of the Art Review for Industrial Wastewater Treatment by Electrocoagulation Process: Mechanism, Cost and Sludge Analysis. *Desalination and Water Treatment* 321: 100915.
23. Phalakornkule, C., S. Polgumhang, W. Tongdaung, B. Karakat and T. Nuyut. 2010. Electrocoagulation of blue reactive, red disperse and mixed dyes, and application in treating textile effluent. *Journal of Environmental Management* 91(4): 918-926.
24. Phu, T.K.C., P.L. Nguyen and T.V.B. Phung. 2025. Recent progress in highly effective electrocoagulation-coupled systems for advanced wastewater treatment. *iScience* 28(3): 111965.
25. Rahman, N.A., A.A. Linus, E.E. Jihed, U.J. Gilan, N.K.M.F. Kumar, A. Phillip, A. Yassin and A. Parabi. 2021. Experimental studies on continuous electrocoagulation treatment of peat water in Sarawak with copper electrodes. *International Journal of Integrated Engineering* 13(2): 168-176.
26. Rodrigues, A.R., C.C. Seki, L.S. Ramalho, A. Argondizo and A. Silva. P. 2020. Electrocoagulation in a fixed bed reactor-color removal in batch and continuous mode. *Separation and Purification Technology* 253: 117481.
27. Sahu, O., B. Mazumdar and P. Chaudhari. 2014. Treatment of wastewater by electrocoagulation: a review. *Environmental Science and Pollution Research* 21: 2397-2413.
28. Shahedi, A., A. Darban, F. Taghipour and A. Jamshidi-Zanjani. 2020. A review on industrial wastewater treatment via electrocoagulation processes. *Current Opinion In Electrochemistry* 22: 154-169.
29. Sher, F., K. Hanif, S.Z. Iqbal and M. Imran. 2020. Implications of advanced wastewater treatment: Electrocoagulation and electroflocculation of effluent discharged from a wastewater treatment plant. *Journal of Water Process Engineering* 33: 101101.
30. Slama, H.B., A. Chenari Bouket, Z. Pourhassan, F.N. Alenezi, A. Silini, H. Cherif-Silini, T. Oszako, L. Luptakova, P. Golińska and L. Belbahri. 2021. Diversity of synthetic dyes from textile industries, discharge impacts and treatment methods. *Applied Sciences* 11(4): 6255.
31. Song, P., Q. Song, Z. Yang, G. Zeng, H. Xu, X. Li and W. Xiong. 2018. Numerical simulation and exploration of electrocoagulation process for arsenic and antimony removal: Electric field, flow field, and mass transfer studies. *Journal of Environmental Management* 228: 336-345.
32. Tahreen, A., M.S. Jami and F. Ali. 2020. Role of electrocoagulation in wastewater treatment: A developmental review. *Journal of Water Process Engineering* 37: 101440.
33. United Nations. 2018. SDG 6 Synthesis Report on Water and Sanitation.
34. Vepsäläinen, M., M. Ghiasvand, J. Selin, J. Pienimaa, E. Repo, M. Pulliainen and M. Sillanpää. 2009. Investigations of the effects of temperature and initial sample pH on natural organic matter (NOM) removal with electrocoagulation using response surface method (RSM). *Separation and Purification Technology* 69(3): 255-261.
35. Verma, R.K. and S. Kumar. 2025. Intensification of electrocoagulation treatment of simulated tannery wastewater using rotating electrodes: Parametric, isotherms, kinetic and techno-economic studies. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification* 209: 110150.
36. Villabona-Ortiz, A., C. Tejada-Tovar and D. Navarro-Romero. 2024. Evaluation of parameters in the removal of azo Red 40 dye using electrocoagulation. *South African Journal of Chemical Engineering* 50: 100-108.
37. Xia, H., C. Li, G. Yang, Z. Shi, C. Jin, W. He, J. Xu and G. Li. 2022. A review of microwave-assisted advanced oxidation processes for wastewater treatment. *Chemosphere* 287: 131981.
38. Zafar, A.M., A. Naem, M.A. Minhas, M.J. Hasan, S. Rafique and A. Ikhtlaq. 2024. Removal of reactive dyes from textile industrial effluent using electrocoagulation in different parametric conditions of aluminum electrodes. *Total Environment Advances* 9: 200087.
39. Zaroual, Z., M. Azzi, N. Saib and E. Chaïnet. 2006. Contribution to the study of electrocoagulation mechanism in basic textile effluent. *Journal of Hazardous Materials* 131(1-3): 73-78.

-
40. Zhang, H., Z. Shang, C. Zhou, Y. Xue, T. Liu and W. Tan. 2019. Electrocoagulation treatment of wet flue-gas desulfurization wastewater using iron-based electrodes: influence of operating parameters and optimization. *International Journal of Electrochemical Science* 14(3): 3114-3125.