



University of Tehran

Treatment of kraft pulp mill wastewater by electrocoagulation: Influence of initial pH and electrolysis time

Armin Afraz¹ | Ahmad Jahan Latibari² | Yahya Hamzeh^{3*} | Ajang Tajdini⁴

1. Department of Wood and Paper Science and Technology, Ka. C., Islamic Azad University, Karaj, Iran. Email: armin.afraz26665@gmail.com

2. Department of Wood and Paper Science and Technology, Ka. C., Islamic Azad University, Karaj, Iran. Email: latibari.aj@gmail.com

3. Corresponding Author, Department of Wood and Paper Science and Technology, Faculty of Natural Resources, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. Email: hamzeh@ut.ac.ir

4. Department of Wood and Paper Science and Technology, Ka. C., Islamic Azad University, Karaj, Iran. Email: ajang.tajdini@kia.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:

Research Article

Article History:

Received: 23 June 2026

Revised: 17 July 2026

Accepted: 28 July 2026

Published online: 14 September 2026

Keywords:

Industrial wastewater,
Black liquor,
Kraft process,
Electrocoagulation,
Treatment efficiency.

ABSTRACT

Introduction: The pulp and paper industry is one of the most water-intensive industries and generates large volumes of highly polluted wastewater. Kraft pulp mill effluents contain considerable amounts of persistent organic compounds, lignin derivatives, dissolved solids, and suspended particles, resulting in high chemical oxygen demand (COD), turbidity, and a black color. Discharge of such wastewater without proper treatment poses serious environmental concerns. Various treatment methods, including biological processes, chemical coagulation, membrane technologies, and advanced oxidation processes, have been employed to reduce pollutant loads. However, their widespread application is limited by high operational costs, excessive chemical consumption, and large sludge production. In recent years, electrocoagulation has attracted considerable attention as an efficient and environmentally friendly wastewater treatment technology, because of its operational simplicity, low chemical requirement, and high capability for removing organic contaminants. Therefore, the objective of the present study was to investigate the effects of electrolysis time and initial pH on the efficiency of electrocoagulation for the treatment of kraft pulp mill wastewater.

Method: Wastewater samples were collected from a hardwood kraft pulp mill located in northern Iran. The initial characteristics of the wastewater were COD of 860 mg/L, total dissolved solids (TDS) of 507 mg/L, and turbidity of 309 NTU. Electrocoagulation experiments were conducted in a batch reactor at room temperature under a constant voltage of 15 V. Iron and aluminum electrodes were used as the anode and cathode, respectively, without the addition of any supporting electrolyte. The initial pH of the wastewater was adjusted to four levels (3, 5, 7, and 10), while electrolysis time was varied at 10, 20, and 40 minutes. COD, TDS, and turbidity were measured before and after treatment according to APHA standard methods. All experiments were carried out in triplicate. Data were statistically analyzed using a factorial experiment based on a randomized complete block design, and mean comparisons were performed using Duncan's multiple range test at the 5% significance level.

Results: The results indicated that increasing electrolysis time significantly improved the efficiency of the electrocoagulation process. The individual effects of electrolysis time and initial pH on COD, TDS, and turbidity were significant at the 99% confidence level, whereas their interaction effect was not significant. Increasing the electrolysis time from 10 to 40 minutes enhanced pollutant removal due to greater dissolution of the iron anode, increased formation of metal hydroxides, and improved adsorption and separation of contaminants. Initial pH also had a noticeable effect on treatment efficiency, with the highest removal efficiency observed under near-neutral conditions (pH= 5-7). Lower efficiencies obtained under strongly acidic and alkaline conditions were attributed to changes in iron hydroxide species and reduced floc stability. Under the optimum conditions (pH 7 and 40 minutes of electrolysis time), COD, TDS, and turbidity decreased from their initial values of 860 mg/L, 507 mg/L, and 309 NTU to 298.5 mg/L, 264.5 mg/L, and 26.5 NTU, corresponding to reductions of 65%, 47%, and 91%, respectively.

Conclusion: The results demonstrated that electrocoagulation using iron and aluminum electrodes is an effective, simple, and environmentally friendly method for the treatment of kraft pulp mill wastewater. Electrolysis time and initial pH were identified as the most influential operational parameters, and near-neutral conditions provided the highest pollutant removal efficiency. Overall, the process exhibited a high capability for reducing COD, TDS, and turbidity, and can be considered a promising option for pretreatment or supplementary treatment of pulp and paper mill effluents.

Cite this article: Afraz, A., Jahan Latibari, A., Hamzeh, Y., Tajdini, A. (2026). Treatment of kraft pulp mill wastewater by electrocoagulation: influence of initial pH and electrolysis time. *Journal of Forest and Wood Products*, 79 (2), 161-174. DOI: <http://doi.org/10.22059/jfwf.2026.417204.1397>



© The Author(s) **Publisher:** University of Tehran Press.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jfwf.2026.417204.1397>



دانشگاه تهران

نشریه جنگل و فرآورده‌های چوب

شاپا الکترونیکی: ۰۵۳۰-۳۳۸۳

سایت نشریه: <https://jfwf.ut.ac.ir>

تصفیه پساب تولید خمیر کاغذ کرافت به روش لخته‌سازی الکتریکی: تأثیر pH اولیه و زمان الکترولیز

آرمین افراز^۱ | احمد جهان لتیباری^۲ | یحیی همزه^۳ | آژنگ تاج‌دینی^۴

۱. گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج، ایران. رایانامه: armin.afraz26665@gmail.com

۲. گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج، ایران. رایانامه: latibari.aj@gmail.com

۳. نویسنده مسئول، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: hamzeh@ut.ac.ir

۴. گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج، ایران. رایانامه: ajang.tajdini@kiauu.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله:

پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۴/۰۲

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۴/۲۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۰۶

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۶/۲۳

کلیدواژه:

پساب صنعتی،

پساب تولید خمیر کاغذ،

کرافت،

لخته‌سازی الکتریکی،

کارایی.

مقدمه: صنعت خمیر کاغذ و کاغذسازی یکی از صنایع پرمصرف آب و تولیدکننده حجم زیادی از پساب‌های با بار آلودگی بالا است. پساب این صنعت، به‌ویژه در فرآیند کرافت، حاوی مقادیر زیادی مواد آلی مقاوم به تجزیه، ترکیبات لیگنینی، مواد جامد محلول (TDS) و مواد معلق است که سبب افزایش اکسیژن‌خواهی شیمیایی (COD)، کدورت و رنگ پساب می‌شوند. تخلیه این پساب‌ها بدون تصفیه مناسب، مخاطرات محیط‌زیستی زیادی دارد. روش‌های متعددی نظیر تصفیه‌های زیستی، انعقاد شیمیایی، فرآیندهای غشایی و اکسیداسیون پیشرفته برای کاهش آلودگی این پساب‌ها به‌کار گرفته شده‌اند، اما محدودیت‌هایی مانند هزینه زیاد، مصرف زیاد مواد شیمیایی و تولید لجن فراوان، کاربرد گسترده آنها را با مشکل مواجه کرده است. در سال‌های اخیر، فرآیند لخته‌سازی الکتریکی به‌دلیل سهولت بهره‌برداری، مصرف کم مواد شیمیایی و کارایی مناسب در حذف آلاینده‌های آلی، به‌عنوان یکی از فناوری‌های نوین تصفیه پساب مورد توجه قرار گرفته است. هدف از این پژوهش، بررسی تأثیر زمان تصفیه و pH اولیه بر کارایی فرآیند لخته‌سازی الکتریکی در کاهش آلودگی پساب حاصل از تولید خمیر کاغذ کرافت است.

روش پژوهش: نمونه‌های پساب از محل پساب‌های رقیق‌شده بخش تولید خمیر کاغذ کرافت کارخانه تولید خمیر کاغذ کرافت پهن‌برگان شمال ایران تهیه شد. ویژگی‌های اولیه پساب شامل TDS، COD و کدورت به‌ترتیب برابر با ۸۶۰ و ۵۰۷ میلی‌گرم بر لیتر و ۳۰۹ NTU بود. آزمایش‌های تصفیه به روش لخته‌سازی الکتریکی در یک راکتور منقطع و در دمای محیط با ولتاژ ثابت ۱۵ ولت انجام شد. در این پژوهش، از الکتروده آهن به‌عنوان آند و الکتروده آلومینیوم به‌عنوان کاتد استفاده شد و هیچ الکترولیتی به سیستم افزوده نشد. pH اولیه پساب در چهار سطح ۳، ۵، ۷ و ۱۰ تنظیم شد و زمان الکترولیز در سه سطح ۱۰، ۲۰ و ۴۰ دقیقه مورد بررسی قرار گرفت. ویژگی‌های TDS، COD و کدورت پیش و پس از تصفیه، براساس روش‌های استاندارد APHA اندازه‌گیری شدند. تمامی آزمایش‌ها در سه تکرار انجام و نتایج با استفاده از طرح فاکتوریل در قالب بلوک‌های کامل تصادفی تجزیه و تحلیل شدند. مقایسه میانگین‌ها نیز با آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد انجام گرفت.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که افزایش زمان تصفیه سبب بهبود معنی‌دار کارایی فرآیند الکتروکواگولاسیون شد. اثر زمان تصفیه و pH اولیه بر TDS، COD و کدورت در سطح اطمینان ۹۹ درصد معنی‌دار بود، در حالی‌که اثر متقابل این دو عامل معنی‌دار نشد. افزایش زمان الکترولیز از ۱۰ به ۴۰ دقیقه باعث کاهش بیشتر آلاینده‌ها شد که این موضوع به افزایش انحلال آند آهنی، تشکیل بیشتر هیدروکسیدهای فلزی و افزایش جذب و جداسازی مواد آلاینده نسبت داده شد. همچنین، pH اولیه تأثیر قابل‌توجهی بر کارایی فرآیند داشت و بیشترین کارایی حذف در pH نزدیک به خنثی (pH=۵-۷) مشاهده شد. در شرایط اسیدی و قلیایی شدید، بازدهی حذف کاهش یافت که این موضوع به تغییر گونه‌های هیدروکسیل آهن و کاهش پایداری لخته‌ها نسبت داده شد. در شرایط بهینه شامل pH برابر با ۷ و زمان تصفیه ۴۰ دقیقه، مقادیر COD، TDS و کدورت به‌ترتیب از ۸۶۰، ۵۰۷ میلی‌گرم بر لیتر و ۳۰۹ NTU به ۲۹۸/۵، ۲۶۴/۵ میلی‌گرم بر لیتر و ۲۶/۵ NTU کاهش یافت که به‌ترتیب معادل ۶۵، ۴۷ و ۹۱ درصد کاهش نسبت به مقادیر اولیه بود.

نتیجه‌گیری: نتایج نشان داد که فرآیند لخته‌سازی الکتریکی با استفاده از الکترودهای آهن و آلومینیوم، روشی مؤثر، ساده و سازگار با محیط‌زیست برای تصفیه پساب تولید خمیر کاغذ کرافت است. زمان تصفیه و pH اولیه از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر عملکرد سیستم بودند و شرایط نزدیک به خنثی، بهترین بازدهی حذف آلاینده‌ها را فراهم کرد. در مجموع، این فرآیند توانایی خوبی در کاهش TDS، COD و کدورت پساب داشته و می‌تواند به‌عنوان یک گزینه مناسب برای پیش‌تصفیه یا تصفیه تکمیلی پساب صنایع خمیر کاغذ مورد استفاده قرار گیرد.

استناد: افراز؛ آرمین، جهان لتیباری؛ احمد، همزه؛ یحیی، تاج‌دینی؛ آژنگ (۱۴۰۵). تصفیه پساب تولید خمیر کاغذ کرافت به روش لخته‌سازی الکتریکی: تأثیر pH اولیه و زمان الکترولیز. نشریه جنگل

و فرآورده‌های چوب، ۷۹ (۲)، ۱۷۴-۱۶۱. DOI: <https://10.22059/jfwf.2026.417204.1397>

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© نویسندگان.

<https://doi.org/10.22059/jfwf.2026.417204.1397>



۱. مقدمه

صنعت تهیه خمیر کاغذ و کاغذسازی یکی از بزرگ‌ترین مصرف‌کنندگان آب و تولیدکنندگان پساب صنعتی در جهان محسوب می‌شود. در فرآیندهای مختلف تولید خمیر کاغذ، شستشو، رنگبری و کاغذسازی، مقادیر قابل توجهی آب مصرف شده و در نتیجه حجم زیادی پساب با بار آلودگی بالا تولید می‌شود [۱]. این صنعت بسته به نوع فرآیند، مواد اولیه، نوع محصول و میزان بازچرخانی آب، بین ۱۰ تا ۳۰۰ مترمکعب آب تازه به‌ازای هر تن کاغذ مصرف می‌کند که بخش عمده آن مربوط به مراحل تهیه خمیر کاغذ و رنگبری است [۲، ۳]. پساب‌های حاصل از این صنعت حاوی طیف گسترده‌ای از آلاینده‌ها شامل لیگنین و مشتقات آن، مواد معلق، ترکیبات آلی هالوژن‌دار قابل جذب (AOX^1)، فنول‌ها، اسیدهای رزینی، اسیدهای چرب و ترکیبات معدنی هستند که بسیاری از آنها در برابر تجزیه زیستی مقاومند [۴، ۵]. مقادیر بالای اکسیژن‌خواهی شیمیایی (COD^2)، اکسیژن‌خواهی زیستی (BOD^3)، رنگ و ترکیبات سمی موجود در این پساب‌ها، تصفیه و مدیریت آنها را به یکی از مهم‌ترین چالش‌های محیط‌زیستی صنعت خمیر کاغذ تبدیل کرده است [۶-۹]. در میان جریان‌های مختلف پساب صنایع خمیر کاغذ، لیکور سیاه مهم‌ترین و آلاینده‌ترین جریان حاصل از فرآیند تهیه خمیر کاغذ است که در طی پخت خمیر کاغذ تولید می‌شود. این جریان حاوی مقادیر زیادی لیگنین حل‌شده، کربوهیدرات‌های تخریب‌شده، ترکیبات فنلی و مواد شیمیایی مصرف‌شده در فرآیند پخت بوده و معمولاً دارای COD بسیار بالا، pH شدیداً قلیایی، رنگ تیره و غلظت زیاد مواد آلی مقاوم به تجزیه و تخریب زیستی است [۸، ۱۰]. در کارخانه‌های یکپارچه خمیر کاغذ، لیکور سیاه معمولاً پس از تغلیظ در کوره بازیابی سوزانده می‌شود تا علاوه بر تولید انرژی، مواد شیمیایی مصرف‌شده نیز بازیابی شوند. با این حال، در بسیاری از کارخانه‌های کوچک، به‌ویژه واحدهای مبتنی بر مواد اولیه غیرچوبی، استفاده از سامانه‌های بازیابی به‌دلیل هزینه‌های بالای سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری امکان‌پذیر نیست [۱۱، ۱۲]. افزون بر این، حتی در کارخانه‌های مجهز به واحد بازیابی نیز نشت لیکور سیاه یا اختلال در عملکرد سیستم بازیابی می‌تواند سبب ورود این جریان بسیار آلاینده به واحدهای تصفیه پساب یا محیط‌زیست شود. منابع علمی و بررسی انجام شده در ۱۳ کارخانه تولید خمیر کاغذ، ۱۶ نوع مختلف از پساب‌های موقت را نشان داده است، که رایج‌ترین علت ایجاد آنها حوادث مرتبط با توقف‌های تعمیر و نگهداری برنامه‌ریزی‌شده یا برنامه‌ریزی‌نشده و تغییرات فصلی بوده‌اند. رایج‌ترین پساب‌های موقت تجربه‌شده، لیکورهای حاصل از مراحل مختلف فرآیند تولید خمیر کاغذ و کلرات و واحد رنگبری بوده‌اند [۱۳]. لیگنین و ترکیبات فنلی موجود در لیکور سیاه عامل اصلی ایجاد رنگ تیره، سمیت و مقاومت این جریان در برابر تجزیه زیستی هستند. همچنین اسیدهای رزینی و اسیدهای چرب زنجیره بلند موجود در آن می‌توانند اثرات نامطلوبی بر میکروارگانیسم‌های سامانه‌های تصفیه و اکوسیستم‌های آبی داشته باشند [۱۴، ۱۵]. شاخص زیست‌تخریب‌پذیری^۴ (نسبت اکسیژن‌خواهی زیستی به اکسیژن‌خواهی شیمیایی کمتر از ۰/۴) پایین این نوع پساب نشان می‌دهد که فرآیندهای زیستی به تنهایی قادر به حذف مؤثر آلاینده‌های آن نیستند. بنابراین، تخلیه مستقیم لیکور سیاه به محیط‌زیست یا ورود آن به تصفیه‌خانه‌های متعارف شهری می‌تواند موجب کاهش شدید اکسیژن محلول، ایجاد شرایط بی‌هوازی و بروز خسارات جدی محیط‌زیستی شود [۱۶، ۱۷]. برای کاهش بار آلودگی لیکور سیاه، روش‌های مختلفی شامل فرآیندهای فیزیکی، شیمیایی، زیستی و اکسیداسیون پیشرفته مورد بررسی قرار گرفته‌اند. انعقاد شیمیایی، جذب سطحی، ازن‌زنی، فرآیندهای غشایی و تصفیه زیستی از جمله روش‌های بررسی‌شده هستند [۵، ۱۴، ۱۸]. اگرچه پساب‌های متداول صنایع خمیر و کاغذ که از غلظت نسبتاً پایین آلاینده‌های خطرناک برخوردار هستند، معمولاً ابتدا با فرآیند انعقاد شیمیایی و سپس با روش‌های تصفیه زیستی تیمار شده و در بسیاری از موارد مجدداً در چرخه تولید مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۹].

اگرچه انعقاد شیمیایی در حذف آلاینده‌های این نوع پساب‌ها کارآمد است، اما لجن حاصل از چنین فرآیندی می‌تواند با شسته شدن آلاینده‌ها، باعث آلودگی خاک، آب‌های سطحی و زیرزمینی شود. در رایج‌ترین سیستم تصفیه زیستی، یعنی فرآیند لجن فعال، می‌توان به حذف قابل توجهی از اکسیژن‌خواهی زیستی، اکسیژن‌خواهی شیمیایی، ترکیبات آلی هالوژن‌دار قابل جذب و

¹Adsorbable Organic Halogens²Chemical Oxygen Demand³Biochemical Oxygen Demand⁴Biodegradability Index

ترکیبات فنلی کلردار دست یافت، اما رنگ قهوه‌ای پساب به‌طور کامل توسط این نوع از سیستم تصفیه حذف نمی‌شود و اجزای پساب که باعث رنگ می‌شوند (لیگنین و مشتقات آن)، به‌دلیل پیوندهای قوی در ساختار مولکولی خود (به‌ویژه پیوندهای کربن-کربن از نوع بی فنیل) به‌طور طبیعی به سختی تجزیه می‌شوند. وجود چنین مواد مقاوم و دیرتخریب‌پذیر در برابر تجزیه زیستی، این فرآیندهای تصفیه را بسیار کند و پرهزینه می‌کند. امکان‌سنجی فنی و اقتصادی عملیات در مقیاس بزرگ با استفاده از سایر گزینه‌های تصفیه مانند جذب، اکسیداسیون مرطوب، تصفیه با ازن، رسوب‌گذاری جزئی، اولترافیلتراسیون، تصفیه ترکیبی زیستی و مبتنی بر غشا، و غیره نیز مورد تردید است [۱۸، ۲۰، ۲۱]. با وجود کارایی قابل قبول این فناوری‌ها، محدودیت‌هایی نظیر مصرف زیاد مواد شیمیایی، تولید حجم بالای لجن، هزینه بهره‌برداری زیاد، گرفتگی غشا، تشکیل محصولات جانبی ناخواسته و کارایی محدود در حذف ترکیبات لیگنینی مقاوم، کاربرد گسترده آن‌ها را با چالش مواجه کرده است. به‌همین دلیل، توسعه روش‌های مؤثرتر، اقتصادی‌تر و سازگارتر با محیط‌زیست برای تصفیه لیکور سیاه همچنان مورد توجه پژوهشگران قرار دارد [۲۰، ۲۲]. در سال‌های اخیر، الکتروکواگولاسیون^۱ به‌عنوان یکی از فناوری‌های نوین و کارآمد برای تصفیه پساب‌های صنعتی مورد توجه قرار گرفته است [۱۰، ۲۱]. در این فرآیند، با اعمال جریان الکتریکی، یون‌های فلزی از الکترودهای مصرف شونده مانند آهن یا آلومینیوم به‌صورت درجا تولید شده و پس از تشکیل هیدروکسیدهای فلزی فعال، آلاینده‌ها از طریق مکانیسم‌های انعقاد، جذب سطحی و شناورسازی حذف می‌شوند. همزمان، حباب‌های هیدروژن تولیدشده در کاتد به جداسازی و شناورسازی لخته‌های تشکیل‌شده کمک می‌کنند. مهم‌ترین مزایای این فناوری شامل نیاز اندک به مواد شیمیایی، تولید لجن کمتر نسبت به انعقاد شیمیایی، سهولت بهره‌برداری، هزینه نگهداری پایین و قابلیت حذف همزمان طیف گسترده‌ای از آلاینده‌ها است [۲۳-۲۵].

مطالعات مختلف کارایی مطلوب الکتروکواگولاسیون و سایر فرآیندهای الکتروشیمیایی را در تصفیه پساب‌های صنایع خمیر کاغذ و کاغذسازی نشان داده‌اند [۳۰-۲۶]. اخیراً، استفاده از این فناوری به‌عنوان پیش‌تصفیه لیکور سیاه حاصل از خمیر کاه گندم موجب بهبود قابلیت تجزیه زیستی و افزایش تولید گاز زیستی شده است [۱۰]. همچنین، تیمار پساب کارخانه کاغذسازی با بار آلودگی زیاد با فرآیند ترکیبی انعقاد شیمیایی با الکترواکسیداسیون یا فرآیند ترکیبی انعقاد الکتریکی با الکترواکسیداسیون نتایج امیدوارکننده‌ای داشته است [۳۱]. پژوهش‌های انجام‌شده بر روی پساب‌های صنایع خمیر و کاغذ حاوی لیگنین و مشتقات آن، کاهش قابل توجه COD، TOC^۲ (کربن آلی کل)، رنگ و ترکیبات لیگنینی را در اثر تیمار با فرآیندهای الکتروشیمیایی گزارش کرده‌اند. نتایج این مطالعات نشان می‌دهد که فرآیندهای الکتروشیمیایی علاوه بر حذف بخش عمده آلاینده‌های آلی، می‌توانند قابلیت تجزیه زیستی پساب را نیز بهبود بخشند و شرایط مناسب‌تری برای تصفیه‌های تکمیلی فراهم سازند [۲۹، ۳۰]. با وجود نتایج امیدوارکننده مطالعات پیشین، اطلاعات موجود درباره کاربرد الکتروکواگولاسیون در تصفیه لیکور سیاه فرآیند کرافت و به‌ویژه تأثیر عوامل عملیاتی مختلف بر عملکرد این فرآیند همچنان محدود است. عملکرد الکتروکواگولاسیون به‌شدت تحت تأثیر پارامترهایی نظیر pH اولیه، زمان الکترولیز، چگالی جریان، نوع الکترود و ویژگی‌های پساب قرار دارد. در میان این عوامل، pH اولیه و زمان فرآیند نقش تعیین‌کننده‌ای در تشکیل گونه‌های هیدروکسیدی فلزی، رشد و پایداری لخته‌ها و در نهایت بازده حذف آلاینده‌ها دارند [۲۳، ۲۵، ۳۰].

در بسیاری از واحدهای کوچک تولید خمیر کاغذ، به‌دلیل نبود سامانه‌های جامع بازیابی مواد شیمیایی و تصفیه پساب، بخشی از لیکور سیاه در اثر نشت از تجهیزات پخت یا اختلاط با آب شستشوی خمیر کاغذ وارد جریان پساب می‌شود. اگرچه حجم این جریان نسبت به کل پساب کارخانه محدود است، اما به‌دلیل غلظت بالای مواد آلی، رنگ و ترکیبات لیگنینی، سهم قابل‌توجهی در آلودگی محیط‌زیست دارد. از این‌رو، استفاده از فرآیند انعقاد الکتریکی برای تصفیه این جریان‌های کم‌حجم و با بار آلودگی بالا می‌تواند به‌عنوان یک راهکار عملی، به‌ویژه در واحدهای کوچک فاقد سامانه‌های پیشرفته تصفیه پساب، مورد توجه قرار گیرد. همچنین، در صورت توسعه این فرآیند در مقیاس صنعتی، بهره‌گیری از راکتورهای جریان پیوسته، سامانه‌های مدولار یا چندمرحله‌ای می‌تواند زمان ماند مورد نیاز را بدون افزایش قابل توجه حجم مخازن تأمین کند.

^۱Electrocoagulation

^۲Total Organic Carbon

در سال‌های اخیر، توجه به شناسایی اثرات آلاینده‌های صنعتی بر محیط‌زیست و توسعه روش‌های کارآمد برای کاهش آن‌ها معطوف شده است. پساب‌های صنعتی، به‌ویژه پساب‌های حاوی ترکیبات آلی پیچیده مانند فنول‌ها و مشتقات لیگنین، از مهم‌ترین منابع آلودگی پایدار در محیط‌زیست محسوب می‌شوند. این ترکیبات آروماتیک به‌دلیل ساختار پایدار خود به‌سختی تجزیه شده و می‌توانند اثرات نامطلوب قابل‌توجهی بر اکوسیستم‌های آبی داشته باشند. در این میان، فرآیندهای الکتروشیمیایی به‌عنوان یکی از روش‌های مؤثر در حذف آلاینده‌ها، به‌ویژه در جداسازی یون‌های فلزی، کاهش بار آلودگی و حتی گندزدایی پساب، مورد توجه گسترده قرار گرفته‌اند. از این‌رو، تعیین شرایط بهینه این پارامترها برای توسعه کاربرد صنعتی این فناوری ضروری است. بر این اساس، هدف از پژوهش حاضر بررسی تأثیر pH اولیه و زمان الکترولیز بر کارایی فرآیند الکتروکواگولاسیون در تصفیه لیکور سیاه حاصل از فرآیند کرافت است. نتایج این تحقیق می‌تواند ضمن بهینه‌سازی شرایط عملیاتی و افزایش بازدهی حذف آلاینده‌ها، زمینه لازم را برای بازچرخانی آب، کاهش مصرف آب تازه و حرکت به‌سوی سامانه‌های تولید پایدار در صنعت خمیر کاغذ فراهم سازد.

۲. روش پژوهش

۲-۱. نمونه‌برداری

نمونه‌برداری از پساب تولیدشده در بخش تولید خمیر کاغذ کرافت کارخانه تولید خمیر کاغذ کرافت پهن‌برگان شمال ایران تهیه شد. این پساب حاوی مقدار زیادی لیکور سیاه رقیق‌شده بوده و دمای پساب در زمان نمونه‌برداری ۲۰ درجه سلسیوس بود. اندازه‌گیری COD با استفاده از روش رفلکس بسته رنگ‌سنجی (Standard Method 5220 D)، کدورت^۱ با استفاده از نفلومتر (Standard Method 2130 B)، و کل مواد جامد محلول (TDS^۲) براساس روش خشک‌کردن در دمای ۱۸۰ درجه سلسیوس (Standard Method 2540 C) مطابق با روش‌های استاندارد انجمن بهداشت عمومی آمریکا (APHA^۳) انجام شد [۳۲]. ویژگی‌های اولیه پساب مورد مطالعه شامل اکسیژن‌خواهی شیمیایی (COD)، کدورت و کل مواد جامد محلول (TDS) به‌ترتیب ۸۶۰ میلی‌گرم بر لیتر، ۳۰۹ NTU و ۵۰۷ میلی‌گرم بر لیتر اندازه‌گیری شد.

۲-۲. فرآیند لخته‌سازی الکتریکی

در این پژوهش، فرآیند لخته‌سازی الکتریکی پساب تولید خمیر کاغذ کرافت به روش منقطع انجام شد که طرحی از آن در شکل ۱ ارائه شده است. اثر دو متغیر اصلی شامل زمان تصفیه و pH اولیه پساب بر کارایی فرآیند الکتروکواگولاسیون بررسی شد. زمان الکترولیز در سه سطح ۱۰، ۲۰ و ۴۰ دقیقه و pH اولیه پساب در چهار سطح ۳، ۵، ۷ و ۱۰ مورد مطالعه قرار گرفت. مدت زمان‌های مورد بررسی براساس مطالعات مقدماتی و گزارش‌های موجود در منابع علمی انتخاب شدند [۱۰]. هدف از انتخاب این بازه زمانی، بررسی رفتار فرآیند در یک محدوده عملیاتی متداول و ارزیابی اثر زمان تماس بر بازدهی حذف آلاینده‌ها بود. تنظیم pH با استفاده از محلول‌های یک نرمال اسید سولفوریک و هیدروکسید سدیم انجام شد. ولتاژ اعمالی در تمام آزمایش‌ها برابر ۱۵ ولت و ثابت بود. آزمایش‌ها در یک راکتور ناپیوسته و در دمای محیط انجام شدند. پارامترهای مورد ارزیابی شامل COD، کدورت و TDS بودند که قبل و پس از تصفیه، مطابق روش‌های استاندارد APHA اندازه‌گیری شدند. تمامی آزمایش‌ها در سه تکرار انجام شد و میانگین نتایج گزارش و مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفت.

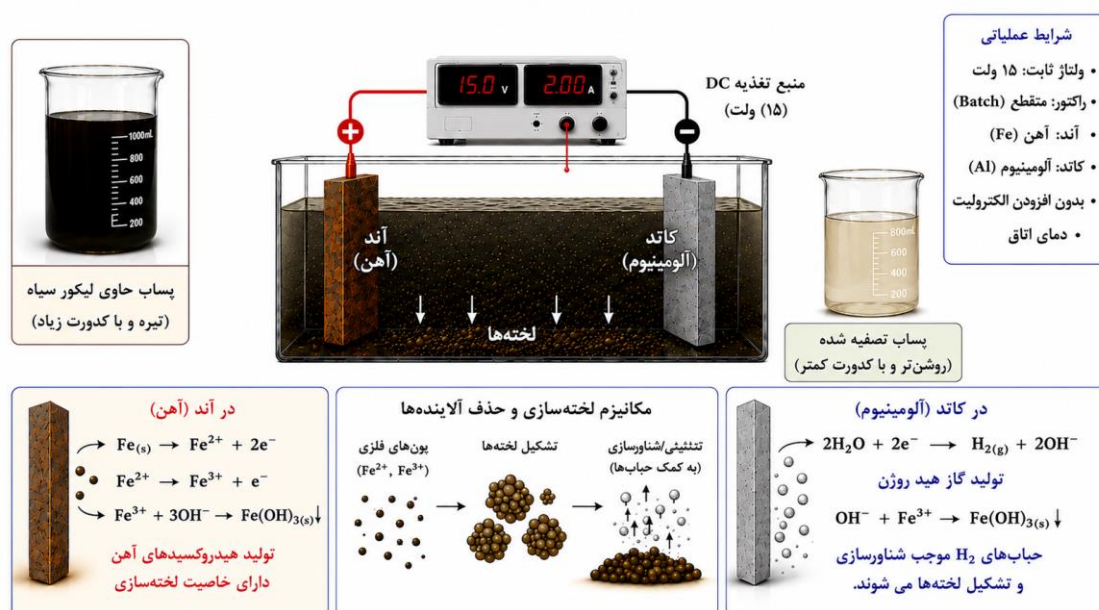
در فرآیند الکتروکواگولاسیون از مواد فلزی مختلف [۳۳]، مانند آهن [۳۴]، آلومینیوم [۳۵، ۳۶]، و Ti/Pt [۳۷]، به‌عنوان الکتروده استفاده می‌شود. مطالعات پیشین نشان داده‌اند که الکتروده آهنی علاوه بر هزینه پایین، کارایی مناسبی در تصفیه پساب‌های حاوی ترکیبات فنولی [۳۸-۴۰] و پساب صنایع خمیر کاغذ [۴۱، ۴۲] دارد. در برخی فرآیندهای الکتروشیمیایی از الکترولیت‌های کمکی استفاده می‌شود، نتایج پژوهش‌های پیشین نشان داده‌اند که استفاده از الکترولیت در تصفیه پساب صنایع

^۱Turbidity

^۲Total Dissolved Solids

^۳American Public Health Association

خمیر کاغذ تأثیر قابل توجهی بر کارایی فرآیند ندارد [۴۳]. از این‌رو، در این پژوهش از الکترود آهن به‌عنوان آند و الکترود آلومینیوم به‌عنوان کاتد استفاده شد و تمامی آزمایش‌ها بدون افزودن الکترولیت انجام گرفت.



شکل ۱. طرحی از فرآیند لخته‌سازی الکتریکی پساب تولید خمیر کاغذ کرافت به روش منقطع

۲-۳. تجزیه و تحلیل آماری

تجزیه و تحلیل آماری داده‌های حاصل از این پژوهش با استفاده از طرح آزمایشی فاکتوریل در قالب بلوک‌های کامل تصادفی انجام شد. پس از بررسی معنی‌داری اثر عوامل مورد مطالعه و برهم‌کنش آنها، مقایسه و گروه‌بندی میانگین‌ها در سطح احتمال ۵ درصد با استفاده از آزمون چنددامنه‌ای دانکن (DMRT^1) انجام گرفت. تمامی اندازه‌گیری‌ها در سه تکرار انجام شد و نتایج به‌صورت میانگین $\pm$ انحراف معیار گزارش شدند.

۳. یافته‌های پژوهش و بحث

۳-۱. نتایج فرآیند لخته‌سازی الکتریکی

واکنش‌های اصلی در فرآیند الکترودکوالاسیون شامل اکسیداسیون آند (در این مطالعه آهن) و تولید هیدروکسیدهای فلزی دارای خاصیت لخته‌سازی، احیای مولکول‌های آب در کاتد (در این مطالعه آلومینیوم) و تولید گاز هیدروژن، واکنش‌های الکترولیز در سطح الکترودها و جذب آلاینده‌های کلوئیدی و حذف آنها از طریق ته‌نشینی یا شناورسازی ناشی از تولید گاز هیدروژن در کاتد است [۳۳، ۳۸]. جریان الکتریکی مستقیم از منبع تغذیه به الکترودها اعمال شده و موجب انحلال آند و تولید یون‌های فلزی و در نهایت تشکیل هیدروکسیدهای فلزی می‌شود (شکل ۱). این یون‌ها دارای خاصیت لخته‌سازی بوده و با جذب سطحی آلاینده‌های آلی، موجب تشکیل لخته و حذف آنها از فاز آبی به‌وسیله ته‌نشینی یا شناورسازی ناشی از حباب‌های هیدروژن می‌گردند [۴۴]. نتایج اندازه‌گیری ویژگی‌های پساب پس از تصفیه به روش الکترودکوالاسیون و تغییرات پارامترهای مورد بررسی در شرایط مختلف pH اولیه و زمان الکترولیز در جدول ۱ ارائه شده است. این نتایج نشان می‌دهند که تغییر شرایط عملیاتی فرآیند تأثیر قابل توجهی بر کارایی حذف آلاینده‌ها داشته و موجب تغییر شدید مقادیر COD، کدورت و TDS پساب شده است.

¹Duncan's Multiple Range Test

جدول ۱. ویژگی های اولیه پساب و درصد کاهش (نسبت به مقدار اولیه) آنها در اثر تغییر pH اولیه و زمان تصفیه (ولتاژ ثابت: ۱۵ ولت).

pH	مدت زمان تیمار (دقیقه)	COD (میلی گرم بر لیتر)		TDS (میلی گرم بر لیتر)		کدورت (NTU)	
		مقدار	میزان کاهش (درصد)	مقدار	میزان کاهش (درصد)	مقدار	میزان کاهش (درصد)
شاهد	۰	۸۶۰±۱۸	۰	۵۰۷±۹	۰	۳۰۹±۷	۰
۳	۱۰	۵۷۰±۱۱	۴۳	۳۱۹±۷	۳۸	۵۷/۵±۵	۸۱
	۲۰	۴۶۲/۵±۶	۴۶	۳۰۰±۶	۴۱	۴۹±۱	۸۴
	۴۰	۳۷۵±۸	۵۶	۲۹۸±۷	۴۲	۳۷±۸	۸۸
۵	۱۰	۴۹۶±۱۰	۴۲	۳۱۳±۷	۳۸	۴۹±۱	۸۴
	۲۰	۴۱۱±۹	۵۲	۲۸۴/۵±۶	۴۲	۴۳/۵±۶	۸۵
	۴۰	۳۷۱±۸	۵۶	۲۶۹/۵±۵	۴۶	۲۹±۲	۹۰
۷	۱۰	۴۴۳±۸	۴۸	۳۰۷/۵±۶	۳۹	۴۵±۳	۸۵
	۲۰	۳۲۰±۷	۶۱	۲۸۱±۵	۴۵	۳۳/۵±۳	۸۹
	۴۰	۲۹۸/۵±۶	۶۵	۲۶۴/۵±۴	۴۷	۲۶/۵±۳	۹۱
۱۰	۱۰	۵۴۴±۱۱	۳۶	۳۲۱±۷	۳۷	۵۸/۵±۲	۸۱
	۲۰	۵۰۸±۱۰	۴۰	۳۰۰/۵±۶	۴۰	۵۲/۵±۱	۸۳
	۴۰	۴۴۳/۵±۶	۴۸	۲۹۳/۵±۶	۴۲	۳۹±۱	۸۷

به منظور تعیین تأثیر مستقل و متقابل عوامل متغیر بر ویژگی های اندازه گیری شده، تجزیه و تحلیل آماری داده ها انجام شد و نتایج حاصل به صورت جداول تحلیل واریانس ارائه شد (جدول ۲). نتایج بررسی آماری نشان داد که هر دو عامل pH و زمان تیمار بر کارایی حذف آلاینده ها تأثیر گذار هستند. علاوه بر این، بررسی اثر متقابل بیانگر آن هستند که میزان تأثیر هر عامل به سطح عامل دیگر وابسته است. به طوری که اثر زمان تیمار در pH های مختلف روند یکسانی نداشته و برعکس، اثر pH نیز در زمان های مختلف متفاوت بوده است. این موضوع نشان دهنده وجود برهم کنش بین دو عامل مورد بررسی و ضرورت ارزیابی همزمان آنها است.

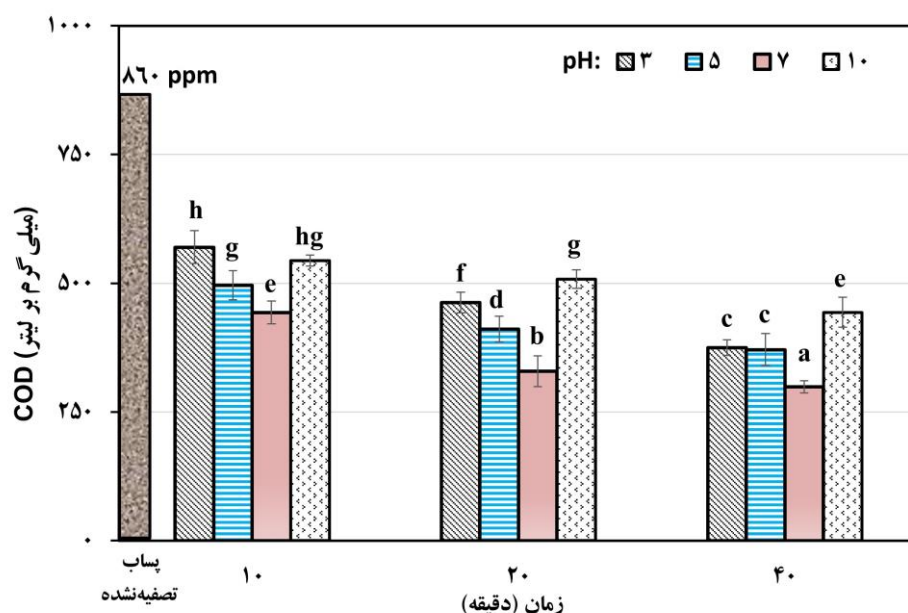
جدول ۲. نتایج تجزیه و تحلیل واریانس اثرات مستقل و متقابل عوامل مورد بررسی بر ویژگی های پساب تصفیه شده (مقادیر F و سطوح معنی داری: **، اختلاف در سطح معنی داری ۹۹ درصد، *، اختلاف در سطح معنی داری ۹۵ درصد، °، اختلاف معنی دار نیست)

ویژگی پساب	اثر مستقل		اثر متقابل	
	زمان	pH	زمان × pH	
COD	مقدار	۲۶/۷۳ **	۱۳/۸۲ **	۰/۹۴ °
	مقدار کاهش (درصد)	۲۵/۲۲ **	۱۴/۲۹ **	۰/۷۵ °
	مقدار	۱۶/۵۷ **	۴/۶۷ **	۰/۳۸ °
TDS	مقدار کاهش (درصد)	۱۶/۵۵ **	۴/۶۷ **	۰/۳۸ °
	مقدار	۳۸/۸۵ **	۱۴/۱۶ **	۰/۳۲ °
	مقدار کاهش (درصد)	۳۸/۸۹ **	۱۴/۱۵ **	۰/۳۲ °

۳-۲. تحلیل اثر عوامل متغیر بر اکسیژن خواهی شیمیایی

اثر H اولیه بر کارایی حذف COD نشان داد که بیشترین کارایی در محدوده pH خنثی حاصل شده است، در حالی که در شرایط اسیدی و قلیایی کارایی کاهش می یابد. نتایج گروه بندی دانکن نشان داد که pH های ۵ و ۷ در یک گروه و pH های ۳ و ۱۰ در گروه دیگر قرار می گیرند و مقادیر COD در گروه دوم بیشتر است (جدول ۲). گزارش های علمی نشان می دهند که میزان حذف COD در پساب صنایع خمیر کاغذ با این روش می تواند در محدوده ۶۰ تا ۱۰۰ درصد قرار گیرد [۲۲]. این رفتار به تشکیل بهینه

فاز لخته‌کننده هیدروکسید آهن ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) در شرایط pH خنثی نسبت داده می‌شود [۴۲]، که همانند اثر pH بر کارایی سیستم تصفیه فیزیکی شیمیایی با ترکیبات آهن پودری است. اثر مدت زمان تصفیه بر COD نشان داد که این عامل تأثیر معنی‌داری بر کاهش COD دارد. با افزایش زمان از ۱۰ به ۴۰ دقیقه، مقدار COD کاهش یافته و کمترین مقدار در زمان ۴۰ دقیقه حاصل شد. این موضوع بیانگر افزایش تخریب یا جداسازی مناسب ترکیبات آلی در فرآیند الکتروشیمیایی است [۴۵]. گروه‌بندی دانکن نیز نشان داد که مقادیر COD در سه زمان بررسی‌شده در گروه‌های متفاوت قرار می‌گیرند و با افزایش زمان تصفیه، مقدار COD به‌طور معنی‌داری کاهش می‌یابد (شکل ۲). در مدت زمان تیمار ۱۰ دقیقه، COD از مقدار اولیه ۸۶۰ به ۵۱۲ میلی‌گرم بر لیتر کاهش یافت، در حالی که در زمان ۴۰ دقیقه این مقدار به ۳۶۷ میلی‌گرم بر لیتر رسید که معادل ۵۷ درصد کاهش است. بررسی اثر متقابل مدت زمان تیمار و pH نشان داد که بیشترین کاهش COD در مدت زمان تیمار ۴۰ دقیقه و pH خنثی حاصل می‌شود (شکل ۲). با این حال، اثر متقابل این دو عامل از نظر آماری معنی‌دار نبود، که نشان‌دهنده اثر غالب مستقل زمان (اثر مطلوب) و pH (اثر نامطلوب) بر کارایی فرآیند است. همچنین مشاهده شد که افزایش زمان از ۲۰ به ۴۰ دقیقه تأثیر کمتری نسبت به بازه ۱۰ تا ۲۰ دقیقه دارد، بنابراین زمان ۴۰ دقیقه به‌عنوان شرایط بهینه عملیاتی با توجه به هزینه‌ها قابل انتخاب است [۳۸].

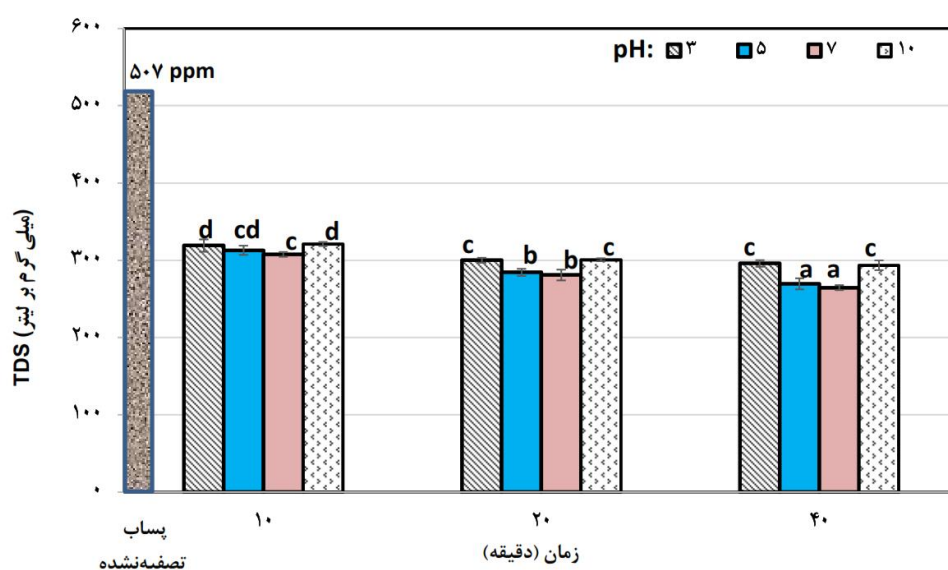


شکل ۲. اثر زمان و pH اولیه بر COD پساب تصفیه‌شده (مقدار اولیه COD پساب ۸۶۰ میلی‌گرم بر لیتر بود).

۳-۳. تحلیل اثر عوامل متغیر بر کل مواد جامد محلول

نتایج آنالیز واریانس (جدول ۲) نشان داد که هر دو عامل زمان تصفیه و pH اولیه اثر مستقلی و معنی‌دار (در سطح اطمینان ۹۹ درصد) بر تغییرات TDS پساب دارند، در حالی که اثر متقابل آنها (زمان $\times$ pH) از نظر آماری معنی‌دار نیست. این موضوع نشان می‌دهد که حذف TDS عمدتاً تحت تأثیر مستقیم هر یک از متغیرهای عملیاتی بوده و هم‌افزایی قابل توجهی بین آنها مشاهده نمی‌شود. بررسی اثر زمان تصفیه نشان داد که با افزایش زمان از ۱۰ تا ۴۰ دقیقه، مقدار TDS به‌طور پیوسته کاهش می‌یابد (شکل ۳). این روند بیانگر افزایش تدریجی کارایی فرآیند در حذف یا تبدیل گونه‌های محلول در طول زمان است. در زمان‌های کوتاه‌تر، حذف ناقص گونه‌های یونی و عدم تشکیل کافی لخته‌های پایدار موجب باقی‌ماندن بخشی از مواد محلول در فاز آبی می‌شود، در حالی که با افزایش زمان، تشکیل هیدروکسیدهای فلزی و بهبود فرآیند جذب سطحی شرایط مناسب‌تری برای حذف ترکیبات محلول فراهم می‌کند. گروه‌بندی دانکن نیز نشان داد که میانگین TDS در دو گروه مجزا قرار می‌گیرد و اختلاف معنی‌دار بین زمان‌های کوتاه (۱۰ و ۲۰ دقیقه) و زمان طولانی‌تر (۴۰ دقیقه) وجود دارد (شکل ۳). در شرایط بهینه (۴۰ دقیقه)،

بیشترین میزان کاهش TDS نسبت به مقدار اولیه مشاهده شد که حدود ۴۵ درصد حاصل شده است. اثر pH نیز نشان داد که کارایی فرآیند در محدوده pH خنثی (۵-۷) بیشتر از شرایط اسیدی (pH=۳) و یا شرایط قلیایی (pH=۱۰) است. این رفتار به پایداری و انحلال کمتر هیدروکسیدهای آهن در شرایط خنثی نسبت داده می‌شود که موجب افزایش تشکیل فازهای لخته‌کننده و در نتیجه بهبود حذف مواد محلول می‌گردد. در مقابل، در محیط‌های اسیدی و قلیایی، به دلیل تغییر در گونه‌بندی شیمیایی یون‌های آهن و کاهش پایداری لخته‌ها، کارایی حذف TDS کاهش می‌یابد. حذف مواد آلی محلول در طی فرآیند انعقاد با روش فرآیند الکتروشیمیایی در pHهای مختلف از دو مکانیسم مجزا پیروی می‌کند. در pH اسیدی، مواد آلی آنیونی با کاتیون‌های فلزی در تعامل هستند و ترکیبات کمپلکس فلزی نامحلول را تشکیل می‌دهند. در حالی که در pH خنثی تا قلیایی کم حضور لخته‌سازها افزایش یافته و لخته‌سازی ناشی از جذب مواد آلی بر روی هیدروکسیدهای فلزی نامحلول است که در نهایت با همدیگر رسوب می‌کنند [۴۶]. تأثیر متقابل دو عامل زمان و pH بر مقدار TDS پساب تصفیه‌شده در شکل ۳ نشان داده شده است. نتایج نشان داد که بیشترین مقدار کاهش TDS در بیشترین مدت زمان تیمار و در pH خنثی حاصل شده است که مشابه اثر این پارامترها بر مقدار COD پساب تصفیه‌شده است. از آنجا که اثر متقابل زمان و pH معنی‌دار نیست، می‌توان نتیجه گرفت که تغییرات TDS به صورت مستقل تحت تأثیر هر یک از این عوامل کنترل می‌شود و رفتار همزمان آنها اثر تشدیدکننده قابل توجهی بر کارایی فرآیند ندارد. با این حال، بهترین عملکرد کلی فرآیند در شرایط pH خنثی و زمان ۴۰ دقیقه مشاهده شد که نشان‌دهنده شرایط بهینه عملیاتی برای کاهش مواد محلول در سیستم الکتروشیمیایی است.



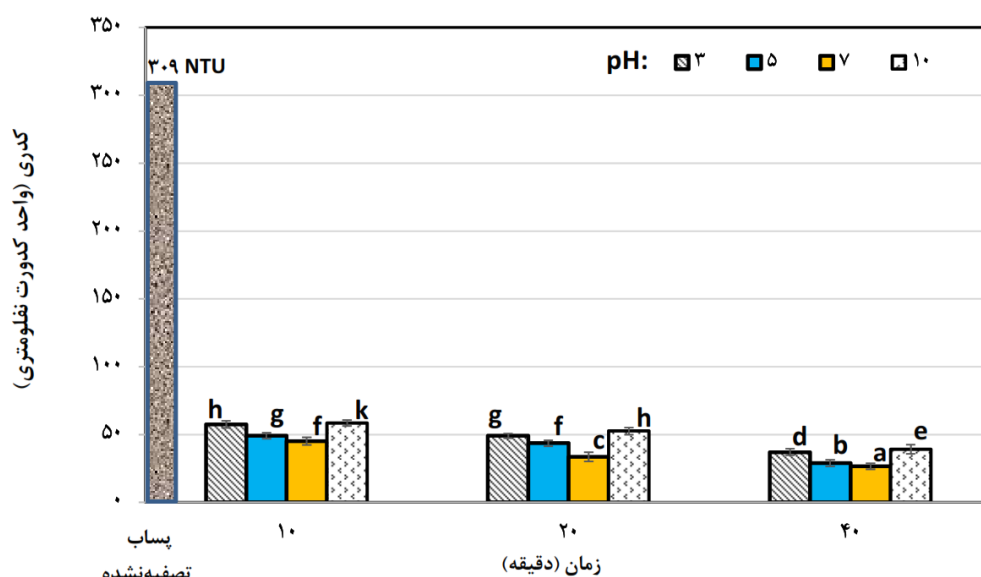
شکل ۳. اثر زمان و pH بر TDS پساب تصفیه‌شده (مقدار اولیه TDS پساب ۵۰۷ میلی‌گرم بر لیتر بود).

۳-۴. تحلیل اثر عوامل متغیر بر کدورت

نتایج آنالیز واریانس (جدول ۲) نشان داد که هر دو عامل زمان تصفیه و pH اولیه اثر مستقل و کاملاً معنی‌دار (در سطح اطمینان ۹۹ درصد) بر تغییرات کدورت پساب دارند، در حالی که اثر متقابل آنها (زمان × pH) از نظر آماری معنی‌دار نیست. این نتیجه بیانگر آن است که حذف ذرات کلوئیدی و کاهش کدورت در فرآیند الکتروکواگولاسیون عمدتاً تحت کنترل مستقیم هر یک از متغیرهای عملیاتی بوده و اثر هم‌افزایی قابل توجهی بین آنها مشاهده نمی‌شود.

بررسی اثر مستقل pH نشان داد که کارایی حذف کدورت در محدوده pH خنثی (۵-۷) بیشتر از شرایط اسیدی (pH=۳) و قلیایی (pH=۱۰) است (شکل ۴). در pH خنثی، تشکیل پایدارتر هیدروکسیدهای آهن موجب افزایش ظرفیت جذب و ناپایدارسازی ذرات کلوئیدی شده، و در نتیجه کارایی حذف افزایش یافته است. در مقابل، در محیط‌های اسیدی و قلیایی، به دلیل

تغییر در ترکیب یون‌های آهن و کاهش پایداری لخته‌ها، کارایی فرآیند کاهش یافته است [۳۳، ۳۴]. بررسی اثر زمان تیمار نشان داد که با افزایش زمان از ۱۰ تا ۴۰ دقیقه، کارایی کاهش کدورت در تمامی شرایط pH افزایش می‌یابد. به طور کلی، مقدار کدورت از محدوده ۵۷/۵ تا ۵۸/۵ NTU پس از ۱۰ دقیقه تیمار به حدود ۲۶/۶ تا ۳۹ NTU در ۴۰ دقیقه کاهش یافته است. بیشترین کارایی کاهش کدورت در زمان ۴۰ دقیقه و pH خنثی (pH=۷) مشاهده شد که به ۹۱ درصد رسید، در حالی که کمترین مقدار حذف کدورت در شرایط pH اسیدی و قلیایی و زمان‌های کوتاه‌تر مشاهده شد. این رفتار به تشکیل بهینه ترکیبات $Fe(OH)_3$ در شرایط خنثی نسبت داده می‌شود که نقش کلیدی در ناپایداری ذرات کلوئیدی و تسهیل تشکیل لخته‌های حجیم دارد. در مقابل، در محیط‌های اسیدی و قلیایی، به دلیل تغییر در گونه‌های هیدرولیز شده آهن و کاهش پایداری فلوک‌ها، کارایی فرآیند کاهش می‌یابد. این روند نشان‌دهنده نقش مهم زمان در توسعه فرآیند انعقاد-لخته‌سازی و افزایش تشکیل هیدروکسیدهای فلزی در طول فرآیند است. از آنجا که اثر متقابل زمان و pH معنی‌دار نبود، می‌توان نتیجه گرفت که رفتار حذف کدورت در این سیستم عمدتاً تابع اثرات مستقل هر یک از عوامل است. با این حال، بهترین عملکرد فرآیند در شرایط زمان ۴۰ دقیقه و pH خنثی مشاهده شد که نشان‌دهنده شرایط بهینه عملیاتی برای حداکثرسازی حذف ذرات معلق در پساب است.



شکل ۴. اثر زمان و pH بر کدورت پساب تصفیه نشده (مقدار اولیه کدورت پساب ۳۰۹ NTU بود).

نتایج این پژوهش نشان داد که فرآیند انعقاد الکتریکی از توانایی خوبی در کاهش COD، کدورت و TDS پساب‌های حاوی لیکور سیاه برخوردار است. با توجه به زمان ماند مورد نیاز این فرآیند، کاربرد اصلی آن برای تصفیه جریان‌های کم‌حجم اما با بار آلودگی زیاد مانند، جریان‌هایی که معمولاً در اثر نشت لیکور سیاه، شستشوی تجهیزات پخت و اختلاط آن با آب شستشوی خمیر کاغذ در واحدهای کوچک تولید خمیر کاغذ ایجاد می‌شوند، پیشنهاد می‌شود. این واحدها غالباً فاقد سامانه‌های جامع بازیابی مواد شیمیایی و تصفیه پیشرفته پساب هستند و به همین دلیل، این جریان‌ها می‌توانند به یکی از منابع مهم آلودگی محیط زیست تبدیل شوند. در چنین شرایطی، فرآیند انعقاد الکتریکی می‌تواند به عنوان یک واحد مستقل یا پیش تصفیه برای این جریان‌های آلوده به کار گرفته شود و با کاهش قابل توجه بار آلودگی، شرایط را برای تخلیه ایمن تر پساب یا افزایش کارایی مراحل بعدی تصفیه فراهم کند. همچنین، در صورت توسعه این فناوری در مقیاس صنعتی، استفاده از راکتورهای جریان پیوسته، سامانه‌های مدولار یا چندمرحله‌ای می‌تواند امکان بهره‌برداری برخط از این فرآیند را بدون نیاز به احداث مخازن بسیار بزرگ فراهم سازد. از این رو، نتایج این پژوهش می‌تواند مبنایی برای طراحی و توسعه سامانه‌های تصفیه مقیاس کوچک و نیمه صنعتی ویژه واحدهای تولید خمیر کاغذ فاقد امکانات پیشرفته تصفیه پساب باشد.

۴. نتیجه‌گیری

فرآیند الکتروکواکولاسیون در تصفیه پساب صنایع خمیر کاغذ می‌تواند هم به‌عنوان یک روش تصفیه نهایی و هم به‌عنوان پیش‌تصفیه در کنار سایر روش‌های متداول مورد استفاده قرار گیرد. در حالت پیش‌تصفیه، این فرآیند با کاهش بار آلودگی اولیه، شرایط مناسب‌تری برای مراحل بعدی تصفیه، مانند تصفیه زیستی فراهم می‌کند. گزارش‌های پیشین نشان داده‌اند که این روش قادر به حذف قابل‌توجهی از رنگ (تا حدود ۹۷ درصد) و COD (حدود ۷۷ درصد) از پساب‌های صنعتی است [۳۵، ۴۱]. در این مطالعه، اثر زمان تصفیه و pH اولیه بر کارایی فرآیند الکتروشیمیایی بررسی شد. نتایج نشان داد که در شرایط بهینه (زمان ۴۰ دقیقه و pH خنثی)، مقدار COD از ۸۶۰ به ۲۹۸/۵ میلی‌گرم بر لیتر (بیش از ۶۵ درصد کاهش)، مقدار TDS از ۵۰۷ به ۲۶۴/۵ میلی‌گرم بر لیتر (حدود ۴۸ درصد کاهش) و میزان کدورت از ۳۰۹ به ۲۶/۵ NTU (بیش از ۹۱ درصد کاهش) کاهش یافت. نتایج تحلیل آماری نیز نشان داد که اثر مستقل زمان و pH بر هر سه پارامتر COD، TDS و کدورت در سطح اطمینان ۹۹ درصد معنی‌دار است، در حالی که اثر متقابل آنها معنی‌دار نیست. این موضوع بیانگر آن است که هر یک از عوامل به‌صورت مستقل نقش تعیین‌کننده‌ای در بهبود کیفیت پساب دارند.

افزایش زمان تصفیه موجب بهبود کارایی حذف آلاینده‌ها شد که این امر عمدتاً به افزایش تولید یون‌های فلزی و هیدروکسیدهای لخته‌ساز نسبت داده می‌شود. همچنین، بهترین عملکرد فرآیند در pH خنثی مشاهده شد که می‌تواند ناشی از تشکیل پایدارتر و بیشتر $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ، بهبود فرآیند انعقاد و جذب آلاینده‌ها باشد. به‌طور کلی، pH نزدیک خنثی شرایط مناسبی را برای تشکیل گونه‌های هیدروکسیدی آهن با قابلیت لخته‌سازی بالا فراهم می‌کند و از آنجا که نیازی به تنظیم مجدد pH پساب پیش از تخلیه یا استفاده مجدد وجود ندارد، هزینه‌های عملیاتی کاهش یافته و از نظر اقتصادی مزیت قابل‌توجهی ایجاد می‌شود. به‌طور کلی، نتایج نشان داد که شرایط بهینه عملکرد فرآیند الکتروکواکولاسیون در این مطالعه شامل زمان ۴۰ دقیقه و pH خنثی است که در آن بیشترین کاهش در COD، TDS و کدورت حاصل شده و کارایی کلی سیستم در بالاترین سطح قرار دارد.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش: نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید آنها است.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

حمایت مالی

حمایت مالی از این پژوهش از طرف دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ در قالب پژوهانه پایان‌نامه دانشجویی نویسنده اول و همچنین پژوهانه برای سایر نویسندگان انجام شده است.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول (دانشجو)، انجام آزمایش‌ها و اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی، گردآوری داده‌ها، انجام محاسبات، تجزیه و تحلیل اولیه داده‌ها، تفسیر نتایج و مشارکت در نگارش مقاله. نویسنده دوم و سوم (استاد راهنمای پایان‌نامه، طراحی پژوهش، هدایت و نظارت بر تمامی مراحل اجرای پژوهش، تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها، تفسیر نتایج، نگارش، بازنگری علمی، اصلاح و نهایی‌سازی مقاله. نویسنده چهارم (استاد مشاور پایان‌نامه)، مشارکت در طراحی پژوهش، نظارت بر اجرای پژوهش، مشارکت در تفسیر نتایج و بازنگری و تأیید نهایی مقاله.

بیانیه دسترسی به داده‌ها

داده‌های پژوهش حاضر از طریق درخواست از نویسندگان قابل دسترسی است.

References

- [1] Kamali, M. & Khodaparast, Z. (2015). Review on recent developments on pulp and paper mill wastewater treatment. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 114, 326-342. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2014.05.005>
- [2] Naeijian, F., Arefinia, A., Zaki, M.T., Orner, K.D., Tafazzoli, M., & Rowles, L. S. (2026). AI-driven deployable water quality management: Benchmarking effluent BOD prediction at a European pulp and paper mill. *ACS Engineering Au*, 6(1), 170–184. <https://doi.org/10.1021/acsengineeringau.5c00088>
- [3] Bai, Y., Liu, S., Liu, X. & Zhao, X. (2026). Recent advances in electrocatalytic treatment and valorization of pulping and papermaking wastewater. *Molecules*, 31(10), 1604. <https://doi.org/10.3390/molecules31101604>
- [4] Ram, C., Rani, P., Gebru, K.A. & Abriha, M.G.M. (2020). Pulp and paper industry wastewater treatment: Use of microbes and their enzymes. *Physical Sciences Reviews*, 5(10), 20190050.
- [5] Amacosta, J., Poznyak, T., Siles, S. & Chairez, I. (2024). Sequential treatment by ozonation and biodegradation of pulp and paper industry wastewater to eliminate organic contaminants. *Toxics*, 12(2), 138. <https://doi.org/10.3390/toxics12020138>
- [6] Izadi, A., Hosseini, M., Darzi, G.N., Bidhendi, G.N., Shariati, F.P. & Mosaddeghi, M. R. (2018). Perspectives on membrane bioreactor potential for treatment of pulp and paper industry wastewater: A critical review. *Journal of Applied Biotechnology Reports*, 5(4), 139-150. <https://doi.org/10.29252/JABR.05.04.02>
- [7] Shankar, S.U., Suresh, P., Jain, R.K. & Tripathi, Y.C. (2020). Assessment of physicochemical characteristics of effluents from paper mill in the state of Uttar Pradesh, India. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 9(7), 318-318. <https://doi.org/10.17577/IJERTV9IS070190>
- [8] Ramos, M.D.N., Rangel, A.S., Azevedo, K.S., Melo, M.G.B., Oliveira, M.C., Watanabe, C.M.U., Pereira, F.F., Silva, C.M. & Aguiar, A. (2022). Characteristics and treatment of Brazilian pulp and paper mill effluents: A review. *Environmental Monitoring and Assessment*, 194(9), 651. <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10331-1>
- [9] Carnevale Miino, M., Collivignarelli, M.C., Bellazzi, S., Abbà, A., Baldi, M., Baltrocchi, A.P.D., Rada, E.C. & Torretta, V. (2025). Removal of adsorbable organic halides from wastewater: A review of advanced chemical and electrochemical processes. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 44(5), e70053. <https://doi.org/10.1002/ep.70053>
- [10] Gurung, A., Gautam, B. & Acharya, B. (2026). Increasing treatment efficiency of black liquor from wheat straw pulping process through electrocoagulation followed by anaerobic digestion. *Waste and Biomass Valorization*, 17(2), 867-894. <https://doi.org/10.1007/s12649-025-03143-0>
- [11] Rastegarfar, N., Behrooz, R. & Bahramifar, N. (2015). Electrocoagulation treatment of black liquor from soda-AQ pulping of wheat straw. *Environmental Monitoring and Assessment*, 187(2), 45. <https://doi.org/10.1007/s10661-014-4245-0>
- [12] Kamali, M., Khalaj, M., Costa, M.E.V., Capela, I. & Aminabhavi, T.M. (2020). Optimization of kraft black liquor treatment using ultrasonically synthesized mesoporous tenorite nanomaterials assisted by Taguchi design. *Chemical Engineering Journal*, 401, 126040. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.126040>
- [13] Shariatmadari, H. (2023). *Wastewater treatment at kraft pulp mills: Effect of temporary effluents and mitigation measures*. <https://ltu.diva-portal.org/smash/get/diva2:1771863/FULLTEXT02.pdf>
- [14] Leontieff, D. A., Ikehata, K., Inanaga, Y. & Furukawa, S. (2025). Ozone for industrial wastewater treatment: Recent advances and sector applications. *Processes*, 13(8), 2331. <https://doi.org/10.3390/pr13082331>
- [15] Vadgama, D., Srivastava, R. & Shinde, S. (2026). A study of theoretical mechanism on wastewater components of paper industry with process generated radicals in gaseous and aqueous phase. *Materials Today: Proceedings*, 124, 37-42. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.12.050>
- [16] Flores-López, Z.D., Solís-Díaz, A.B., Cervantes-Aviles, P.A., Thangarasu, P., Kumar, D., Kaur, H., Singh, J., Lokande, P., Huerta-Aguilar, C.A. & Mubarak, N.M. (2024). Insight mechanism of magnetic activated catalyst derived from recycled steel residue for black liquor degradation. *Scientific Reports*, 14(1), 19057. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-70072-8>
- [17] Jagaba, A.H., Kutty, S.R.M., Naushad, M., Lawal, I.M., Noor, A., Affam, A.C., Birniwa, A.H., Abubakar, S., Soja, U.B., Abioye, K.J. & Bathula, C. (2022). Removal of nutrients from pulp and paper biorefinery effluent: Operation, kinetic modelling and optimization by response surface methodology. *Environmental Research*, 214, 114091. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114091>
- [18] Esmaeeli, A., Sarrafzadeh, M.H., Zeighami, S., Kalantar, M., Bariki, S.G., Fallahi, A., Asgharnejad, H., & Ghaffari, S.B. (2023). A comprehensive review on pulp and paper industries wastewater treatment

- advances. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 62(21), 8119-8145. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.2c04393>
- [19] Dagar, S., Singh, S.K. & Gupta, M.K. (2022). Economics of advanced technologies for wastewater treatment: Evidence from pulp and paper industry. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 960639. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.960639>
- [20] Soloman, P.A., Basha, C.A., Velan, M., & Balasubramanian, N. (2009). Electrochemical degradation of pulp and paper industry wastewater. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 84(9), 1303–1313. <https://doi.org/10.1002/jctb.2176>
- [21] AlMuhanna, K.J., Asiri, F., Abu-Arabi, M. & AlMansour, H. (2025). Treatment of paper and pulp wastewater using coagulation-flocculation with alum: Optimization and performance evaluation. *Water, Air, & Soil Pollution*, 236(1), 52. <https://doi.org/10.1007/s11270-024-07688-z>
- [22] Toczyłowska-Mamińska, R. (2017). Limits and perspectives of pulp and paper industry wastewater treatment—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 78, 764-772. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.021>
- [23] Yamazaki, E. R., Yuan, Y., He, X., Verma, A., Jang, G.G., Giammar, D., Chellam, S., Jassby, D., Tsouris, C. & Hatzell, M.C. (2026). Electrocoagulation in water treatment: Targeted contaminant removal and laboratory best practices. *ACS ES&T Water*, 6(6), 3255-3282. <https://doi.org/10.1021/acsestwater.5c01550>
- [24] Bhagawati, P.B. & Shivayogimath, C.B. (2021). Electrochemical technique for paper mill effluent degradation using concentric aluminum tube electrodes (CATE). *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 19(1), 553-564. <https://doi.org/10.1007/s40201-021-00627-8>
- [25] Sadaf, S., Roy, H., Fariha, A., Rahman, T.U., Tasnim, N., Jahan, N., Soka-Adeaga, A.A., Safwat, S.M. & Islam, M.S. (2024). Electrocoagulation-based wastewater treatment process and significance of anode materials for the overall improvement of the process: A critical review. *Journal of Water Process Engineering*, 62, 105409. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.105409>
- [26] Sharan, S., Khare, P., Shankar, R., Dhariya, S., Kunwar, A., Yadav, S., Patel, R.K., Gole, V.L., Yadav, V.K., Varma, A.K. & Mondal, P. (2023). Treatment of lignin enriched paper industry wastewater by electrocoagulation: Modelling approach and economic evaluation. *Chemical Engineering Research and Design*, 197, 708-720. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2023.07.034>
- [27] Bassyouni, D., Ali, S., Abdel-Aziz, M.H. & Elashouky, E. (2023). Electrocoagulation technique and statistical analysis for treatment of real effluent from the pulp and paper industry. *International Journal of Electrochemical Science*, 18(12), 100389. <https://doi.org/10.1016/j.ijoes.2023.100389>
- [28] Zaied, M. & Bellakhal, N. (2009). Electrocoagulation treatment of black liquor from paper industry. *Journal of Hazardous Materials*, 163(2-3), 995-1000. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.07.115>
- [29] Ghosh, A.S. & Sarkar, A. (2026). Electrocoagulation as a sustainable treatment strategy for wastewater from the pulpwood industry. *Separation Science and Technology*, 1–13. <https://doi.org/10.1080/01496395.2025.2607089>
- [30] Wagle, D., Lin, C.J., Nawaz, T. & Shipley, H.J. (2020). Evaluation and optimization of electrocoagulation for treating kraft paper mill wastewater. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(1), 103595. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103595>
- [31] Dogan, A.D., Kara, N., Caglak, A. & Sari Erkan, H. (2025). Improving paper mill effluent treatment: A hybrid approach using electrocoagulation and electrooxidation with oxone. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 22(4), 2461-2478. <https://doi.org/10.1007/s13762-024-05769-4>
- [32] Greenberg, A.E. & American Public Health Association. (1999). *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 20th ed. American Public Health Association (APHA), USA.
- [33] Moussa, D.T., El-Naas, M.H., Nasser, M. & Al-Marri, M.J. (2017). A comprehensive review of electrocoagulation for water treatment: Potentials and challenges. *Journal of Environmental Management*, 186, 24-41. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.10.032>
- [34] İrdemez, Ş., Demircioğlu, N. & Yildiz, Y.Ş. (2006). The effects of pH on phosphate removal from wastewater by electrocoagulation with iron plate electrodes. *Journal of Hazardous Materials*, 137(2), 1231-1235. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.04.019>
- [35] Hematabadi, H. & Behrooz, R. (2013). Investigation of electrocoagulation process on TSS and COD removal from effluent of the paper recycling mill using Al electrodes. *Iranian Journal of Wood and Paper Industries*, 3(2), 53-64.
- [36] Rahmani, A.R., Samarghandi, M.R., Nematollahi, D. & Zamani, F. (2019). A comprehensive study of electrochemical disinfection of water using direct and indirect oxidation processes. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 7(1), 102785. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.11.030>
- [37] Vlyssides, A.G., Karlis, P.K., Rori, N. & Zorpas, A.A. (2002). Electrochemical treatment in relation to pH of domestic wastewater using Ti/Pt electrodes. *Journal of Hazardous Materials*, 95(1-2), 215–226. [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(02\)00143-7](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(02)00143-7)

- [38] Mahesh, S., Garg, K.K., Srivastava, V.C., Mishra, I.M., Prasad, B. & Mall, I. D. (2016). Continuous electrocoagulation treatment of pulp and paper mill wastewater: Operating cost and sludge study. *RSC Advances*, 6(20), 16223-16233. <https://doi.org/10.1039/c5ra27486a>
- [39] Rahmani, A.R., Shabanloo, A., Mehralipour, J., Fazlzadeh, M. & Poureshgh, Y. (2015). Degradation of phenol in aqueous solutions using electro-Fenton process. *Research Journal of Environmental Sciences*, 9(7), 332-342. <https://doi.org/0.3923/rjes.2015.332.341>
- [40] Soloman, P.A., Basha, C.A., Velan, M., Balasubramanian, N. & Marimuthu, P. (2009). Augmentation of biodegradability of pulp and paper industry wastewater by electrochemical pre-treatment and optimization by RSM. *Separation and Purification Technology*, 69(1), 109-117. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2009.07.002>
- [41] Khansorthong, S. & Hunsom, M. (2009). Remediation of wastewater from pulp and paper mill industry by the electrochemical technique. *Chemical Engineering Journal*, 151(1-3), 228-234. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.02.038>
- [42] Mahesh, S., Prasad, B., Mall, I.D. & Mishra, I.M. (2006). Electrochemical degradation of pulp and paper mill wastewater. Part 1. COD and color removal. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 45(8), 2830-2839. <https://doi.org/10.1021/ie0514096>
- [43] Azarian, G., Rahmani, A.R., Atashzaban, Z. & Nematollahi, D. (2018). New batch electro-coagulation process for treatment and recovery of high organic load and low volume egg processing industry wastewater. *Process Safety and Environmental Protection*, 119, 96-103. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.07.025>
- [44] Azadi Aghdam, M., Kariminia, H.R. & Safari, S. (2016). Removal of lignin, COD, and color from pulp and paper wastewater using electrocoagulation. *Desalination and Water Treatment*, 57(21), 9698-9704. <https://doi.org/10.1080/19443994.2015.1040461>
- [45] Costa, C.R., Botta, C.M., Espindola, E.L. & Olivi, P. (2008). Electrochemical treatment of tannery wastewater using DSA® electrodes. *Journal of Hazardous Materials*, 53(1-2), 616-627. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.09.005>
- [46] Irfan, M., Butt, T., Imtiaz, N., Abbas, N., Khan, R.A. & Shafique, A. (2017). The removal of COD, TSS and colour of black liquor by coagulation–flocculation process at optimized pH, settling and dosing rate. *Arabian Journal of Chemistry*, 10, S2307-S2318. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2013.08.007>