

Wastewater Treatment of Textile Industry by Electrocoagulation Process

A. R. Nazari Alavi¹, A. A. Sajadi², M. Mirzai³, H. Hasanian⁴

1. Instructor, Sharif Energy, Water and Environment Institute, Sharif University of Technology, Tehran, Iran
(Corresponding Author) alavi@sharif.edu
2. Assoc. Prof., Sharif Energy, Water and Environment Institute, Sharif University of Technology, Tehran, Iran
3. Instructor, Sharif Energy, Water and Environment Institute, Sharif University of Technology, Tehran, Iran
4. PhD. Student, Dept. of Solid Waste Engineering, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran

(Received Jan. 2, 2022 Accepted June 28, 2022)

To cite this article:

Nazari Alavi, A. R., Sajadi, A. A., Mirzai, M., Hasanian, H. 2022. "Wastewater treatment of textile industry by electrocoagulation process" Journal of Water and Wastewater, 33(4), 133-143.
Doi:10.22093/wwj.2022.322697.3219. (In Persian)

Abstract

The large volume of consumed water and pigments in the textile industry subsequently produces hazardous wastewater, which potentially may cause serious environmental problems. On the other hand, due to water stress in Iran, the need for further treatment of this wastewater is more urgent. In recent years, electrochemical processes have been considered as an efficient process. The lack of information to build large-scale electrical coagulation units has led to the deficiency of extensive application of this method in industrial units. In this paper, the removal of color and COD in the wastewater of a textile factory in Tehran has been studied in order to determine the efficiency of the electrocoagulation process and to find optimal operation parameters. Optimum distance between the electrodes (4 cm), optimum electrical potential (40 V) and electrolyte concentration (4 mgNaCl/L) are the main achievement of this research. The treatment efficiency achieved in this research is 69% for COD and 96% for color removal.

Keywords: Industrial Wastewater, Electrochemical Treatment, Textile Industry, Aluminum Electrode.



مجله آب و فاضلاب، دوره ۳۳، شماره ۴، صفحه: ۱۴۳-۱۳۳

تصفیه فاضلاب کارخانجات نساجی به روش انعقاد الکتریکی

علیرضا نظری علوی^۱، علی اکبر سجادی^۲، محمد میرزایی^۳، حامد حسینیان^۴

۱- مربی، پژوهشکده علوم و فناوری‌های انرژی، آب و محیط‌زیست،

دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

(نویسنده مسئول) alavi@sharif.edu

۲- دانشیار، پژوهشکده علوم و فناوری‌های انرژی، آب و محیط‌زیست،

دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

۳- مربی، پژوهشکده علوم و فناوری‌های انرژی، آب و محیط‌زیست،

دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

۴- دانشجوی دکتره گروه مهندسی زائدات جامد، دانشکده محیط‌زیست،

دانشگاه تهران، تهران، ایران

پذیرش ۱۴۰۱/۴/۷

(دریافت ۱۴۰۰/۱۰/۱۲)

برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام فرمایید:

نظری علوی، ع.، سجادی، ع.ا.، میرزایی، م.، حسینیان، ح.، ۱۴۰۱، "تصفیه فاضلاب کارخانجات نساجی به روش انعقاد الکتریکی"

مجله آب و فاضلاب، ۳۳(۴)، ۱۴۳-۱۳۳. Doi:10.22093/wwj.2022.322697.3219

چکیده

با توجه به حجم عظیم آب مصرفی در صنایع نساجی، روزانه میلیون‌ها لیتر از این پساب رنگی تولید می‌شود که سمیت زیاد آن باعث بروز مسائل محیط‌زیستی بسیاری می‌شود. از طرف دیگر با توجه به تنش آبی موجود در ایران، نیاز به تصفیه این پساب‌ها بیشتر احساس می‌شود. فرایندهای الکتروشیمیایی به عنوان یک فناوری کارآمد در سال‌های اخیر، مورد توجه جدی قرار گرفته‌اند. کمبود اطلاعات به منظور ساخت واحدهای انعقاد الکتریکی در مقیاس بزرگ، موجب عدم کاربرد گسترده این روش در واحدهای صنعتی شده است. در این پژوهش، مطالعه موردی تصفیه فاضلاب تولیدی یکی از کارخانجات نساجی شهر تهران به کمک روش انعقاد الکتریکی با استفاده از الکتروآلومینیم و الکترولیت کلرید سدیم، بررسی شد. فاصله بهینه بین الکترودها، ولتاژ و میزان غلظت الکترولیت از یافته‌های این پژوهش بود. در این پژوهش، روند تغییرات COD، میزان رنگ و pH در طول زمان پایش شد. با توجه به نتایج، فاصله بهینه بین الکترودها برابر ۴ سانتی‌متر، اختلاف پتانسیل بهینه ۴۰ ولت و غلظت بهینه الکترولیت برابر ۴ میلی‌گرم در لیتر به دست آمد. کارایی حذف COD برابر ۶۹ درصد و کارایی حذف رنگ نیز برابر ۹۶ درصد حاصل شد.

واژه‌های کلیدی: فاضلاب صنعتی، انعقاد الکتروشیمیایی، صنعت رنگرزی و نساجی، الکتروآلومینیم

۱- مقدمه

(2001) تصفیه پساب از گذشته، یکی از عمده‌ترین چالش‌های جوامع بوده است (Órfão et al., 2006). مصرف آب در واحدهای رنگرزی در صنایع نساجی به طور

رشد فزاینده جمعیت به همراه گسترش صنعت و کشاورزی، منجر به کمبود منابع آب سالم شده است و این امر ضرورت تصفیه و استفاده مجدد از پساب را دوچندان می‌کند (Mollah et al.,



شود (Lin and Peng, 1996). به منظور حذف رنگ از پساب‌ها می‌توان از روش‌های بیولوژیکی، منعقدکننده‌ها، فرایندهای فتوکاتالیستی، فیلتراسیون غشایی، جذب سطحی، مواد اکسیدکننده، فرایندهای الکتروشیمیایی و ازن بهره برد (Yeddou and Bensmaili, 2005)

ارزیابی عملکرد فرایندهای اکسیداسیون پیشرفته و استفاده از ازن در کنار فرایند انعقاد الکتریکی، حاکی از آن است که از نقطه نظر میزان مصرف انرژی و همچنین کارایی حذف آلاینده، ترکیب روش اکسیداسیون پیشرفته به همراه انعقاد الکتریکی بهترین روش در تصفیه پساب صنایع نساجی است (Tanveer et al., 2022, Zazou et al., 2019)

همچنین استفاده از فرایند جذب سطحی توسط کربن فعال و همچنین اکسیداسیون پیشرفته به عنوان گام دوم تصفیه پس از استفاده از روش انعقاد الکتریکی، حاکی از کارایی مناسب سیستم در تصفیه پساب صنایع نساجی است. در این روش، پساب حاصله، در بیشتر پارامترها استاندارد تخلیه به زمینه‌های کشاورزی را کسب می‌کند (Bener et al., 2020).

روش بیولوژیکی یک روش کارآمد، نسبتاً کم‌هزینه و دوستدار محیط زیست است، ولی این روش به علت کارایی کم در حذف ترکیبات پیچیده آلی و همچنین زمان ماند نسبتاً زیاد برای تصفیه پساب نساجی چندان کارآمد نیست (Al-Tohamy et al., 2022, Lin and Chen, 1997)

از دیگر روش‌های متداول فیزیکی-شیمیایی می‌توان به انعقاد شیمیایی، جذب به کمک کربن فعال، اسمز معکوس^۳ و اولترافیلتراسیون اشاره کرد (Zaroual et al., 2006). البته کاربرد برخی از این روش‌ها تنها محدود به پساب با غلظت کم هستند و از این روش‌ها نمی‌توان برای تصفیه پساب با غلظت زیاد مواد آلاینده استفاده کرد (Zhuo et al., 2007).

از دیگر روش‌های پیشرفته تصفیه پساب نساجی می‌توان به اکسیداسیون پیشرفته از جمله تریزیک ازن، استفاده از اشعه ماورای بنفش و انعقاد الکتریکی اشاره کرد که کارایی زیادی در حذف مواد رنگی و مواد آلی دارند. در سال‌های اخیر به فرایندهای الکتروشیمیایی به علت سادگی کاربرد و سازگار بودن با

متوسط برابر ۱۲۵ تا ۱۵۰ لیتر به ازای هر کیلوگرم کالای نساجی است که این امر منجر به تولید مقدار قابل توجهی پساب نیز می‌شود (Körbahti and Tanyolaç, 2008). مقدار کل مصرف رنگ در صنعت نساجی در جهان بیش از ۱۰ هزار تن در سال است و در این میان سالانه در حدود هزار تن از رنگ مصرفی صنایع در منابع آبی تخلیه می‌شود (Órfão et al., 2006). تخلیه پساب صنایع نساجی در منابع سطحی آب در خیلی از کشورهای در حال توسعه رایج است و راهیابی این پساب به آبهای آزاد می‌تواند مردم جهان را تحت تأثیر قرار دهد (Teo et al., 2022).

بر اساس ساختار شیمیایی و یا گروه‌های عامل رنگ، ۲۰ تا ۳۰ گروه رنگ متفاوت قابل شناسایی است که با توجه به کاربردها به رنگ‌های اسیدی، بازی، مستقیم، دیسپرس، گوگردی، خمی، آزوئیک، راکتیو و دندان‌های طبقه‌بندی می‌شوند (Ramalho, 2005)

رنگ‌های واکنش‌پذیر اساساً به علت توانایی برای اتصال به لیاف نساجی از طریق پیوندهای کووالانسی، به صورت گسترده در صنایع استفاده می‌شوند. مشکل عمده محیط‌زیستی در ارتباط با استفاده از این رنگ‌ها، از دست رفتن بخشی از آنها در فرایند رنگرزی است، زیرا کارایی تثبیت آنها بین ۶۰ تا ۹۰ درصد است و در نتیجه مقدار قابل توجهی از رنگ‌های تثبیت نشده وارد پساب فرایند می‌شود (Weber and Stickney, 1993). وجود این رنگ‌ها در آب شرب موجب اختلال در سلامت انسان مانند تحریکات پوستی، اختلال در عملکرد کلیه‌ها، دستگاه تناسلی، کبد، مغز و سیستم اعصاب مرکزی می‌شود (Mohammed et al., 2014).

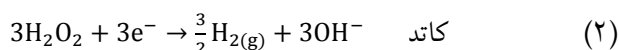
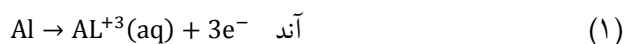
از دیگر مشکلاتی که رنگ‌ها ایجاد می‌کنند، ممانعت از نفوذ نور خورشید به داخل آب و اختلال در عمل فتوسنتز و در نتیجه تهدید حیات و تغذیه گیاهان و موجودات آبی است (Salleh et al., 2011). از طرفی این ترکیبات باعث ایجاد مشکلاتی مانند افزایش اکسیژن‌خواهی بیولوژیکی^۱ و اکسیژن‌خواهی شیمیایی^۲، ورود ترکیبات کلرفنلی، ترکیبات حاوی گوگرد و مقدار زیاد نمک می‌شوند (Crini and Badot, 2008). از این رو روش‌های حذف رنگ از پساب، اهمیت ویژه‌ای دارند. تصفیه این پساب‌ها می‌تواند از ادغام فرایندهای فیزیکی، بیولوژیکی و روش‌های شیمیایی انجام

³ Reverse Osmosis (RO)

¹ Biochemical Oxygen Demand (BOD)

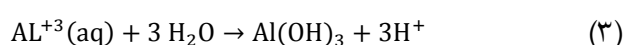
² Chemical Oxygen Demand (COD)





که در آنها

یون‌های Al^{3+} و OH^{-} تولید شده طی واکنش‌های معادلات ۳ و ۴، گونه‌های متنوع مونومریک را تولید می‌کنند که سطح زیادی را برای جذب سریع ترکیبات آلی و به دام انداختن ذرات کلوئیدی ایجاد می‌کنند (Yousuf et al., 2001)



معمولاً از آهن و آلومینیم، به عنوان الکتروود استفاده می‌شود که تولید Fe^{3+} و Al^{3+} می‌کنند و به علت انجام دیگر واکنش‌های خودبه‌خودی منجر به تولید سایر هیدروکسیدها و پلی‌هیدروکسیدها در pHهای مختلف می‌شوند (Yousuf et al., 2001).

در نزدیکی آندهای فلزی، افزایش انحلال فلزات وجود دارد و تولید هیدروکسیدهای آلومینیم نیز به دنبال شارژ منفی در کلوئیدها ایجاد می‌شود. ذرات معلق در واکنش با هیدروکسید فلز به علت جذب الکترواستاتیکی و یا ایجاد واکنش در سطح این ذرات حذف می‌شوند (Ni'am et al., 2007). همچنین نیروی الکتریکی موجب افزایش شارژ الکتریکی در سطح کلوئیدها می‌شود که منجر به افزایش تماس بین ذرات در مقایسه با سایر روش‌ها از جمله افزودن مواد شیمیایی و هم زدن می‌شود (Babu et al., 2007).

پساب صنایع نساجی دارای رنگ، COD، BOD، pH و دمای زیاد است. تنوع تولید رنگ‌های جدید با هدف افزایش عمر لیاف پارچه در شرایط مختلف، مانند قرار گرفتن در معرض نور و مواد شوینده، موجب پیچیدگی بیشتر فرایند تصفیه و حذف رنگ‌دانه‌ها شده است (Lin and Peng, 1996).

فرایند انعقاد الکتریکی به‌طور موفقیت‌آمیزی به‌منظور تصفیه فاضلاب صنعتی مانند تولید کاغذ، روغن، دباغی، پساب حاوی فلزات سنگین و نیترات، صنایع غذایی و پروتئینی، فاضلاب شهری، شیرابه محل دفن و به‌صورت گسترده در رنگ‌زدایی از

محیط‌زیست توجه بسیار زیادی شده است. یکی از مهمترین این فرایندها انعقاد الکتریکی است که به‌طور مؤثری برای حذف رنگ از پساب استفاده می‌شود. از ویژگی‌های این روش می‌توان به کاربرد آسان، زمان ماند کوتاه، کاهش تجهیزات و مصرف مواد شیمیایی و همچنین کاهش حجم لجن اشاره کرد (Babu et al., 2007). Holt et al., 2005 این روش می‌تواند به‌طور گسترده‌ای برای تصفیه پساب‌های حاوی ترکیبات آلی، پروتئینی، ترکیبات روغنی و گریس، مواد شوینده^۱، فلزات سنگین، رنگ، کدورت و جامدات معلق به‌کار رود. این روش در صنایع نساجی، غذایی و کاغذسازی کاربرد دارد (Ni'am et al., 2007).

در این فرایند با اعمال جریان الکتریکی به الکتروودها در یک مدت زمان مشخص، طی سه مرحله آلاینده‌ها حذف می‌شوند:

الف) واکنش اکسایش-کاهش در سطح الکتروودها و ایجاد هیدروکسیدهای فلزی

ب) تجمع هیدروکسیدهای فلزی و تشکیل لخته‌های سوسپانسیونی در فاز آبی

ج) جذب سطحی آلاینده‌ها بر روی لخته‌های تولیدی، رسوب‌گذاری و در نهایت ایجاد لجن

جریان الکتریکی منجر به انحلال صفحات فلزی در فاضلاب می‌شود. یون‌های فلزی در pH مناسب می‌توانند دامنه گسترده‌ای از گونه‌های منعقدکننده و هیدروکسیدهای فلزی را تشکیل دهند که آلاینده‌های محلول را جذب و ترسیب و ذرات معلق را ناپایدار و متراکم کنند (Aoudj et al., 2010). به علاوه حباب‌های کوچک گاز هیدروژن در کاتد تولید می‌شود که بیشتر لخته‌ها را شناور کرده و جداسازی آنها از آب تصفیه شده را آسان می‌سازد (Alinasafi et al., 2005). این فرایند تا زمانی که منبع انرژی الکتروودها تأمین می‌شود ادامه می‌یابد، بنابراین به‌منظور تصفیه ترکیبات آلی مقاوم به تجزیه بیولوژیکی، گزینه مناسب‌تری دارد (Kilic and Hosten, 2010).

الکتروودهای استفاده شده در این فرایند اغلب از جنس آهن یا آلومینیم هستند. اگر از الکتروودهای آلومینیم در این فرایند استفاده شود، واکنش‌های اصلی به‌صورت زیر خواهد بود (Yousuf et al., 2001)

¹ Detergent



مزایا و معایب روش‌های مختلف تصفیه، در این پژوهش روش انعقاد الکتریکی، بررسی شد. کمبود اطلاعات به‌منظور ساخت واحدهای انعقاد الکتریکی در مقیاس بزرگ موجب عدم کاربرد گسترده این روش در واحدهای صنعتی شده است (Hakizimana et al., 2017).

بر این اساس در این پژوهش، حذف COD و رنگ در پساب یک کارخانه نساجی در مقیاس پایلوت آزمایشگاهی به منظور یافتن میزان کارایی روش انعقاد الکتریکی و همچنین یافتن پارامترهای بهینه راهبری انجام شد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- پساب ورودی

پساب استفاده شده در این پژوهش، از یکی از کارخانجات نساجی واقع در غرب شهر تهران برداشت شد که حاصل فرایند شستشو و رنگرزی این کارخانه بود. این پساب بدون هیچ‌گونه فرایند پیش تصفیه در آزمایش‌های استفاده شده، قرار گرفت. COD اولیه نمونه‌ها برابر ۷۳۰ میلی‌گرم در لیتر و میزان رنگ اولیه نمونه‌ها برابر ۲۰۷۰ pt-co بود. pH پساب نیز در محدوده ۷/۵ تا ۸/۲ و میزان مواد معلق در حدود ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر، اندازه‌گیری شد.

۲-۲- طراحی و ساخت راکتور

راکتور استفاده شده به‌صورت ناپیوسته^۱ در نظر گرفته شد. مخزن استفاده شده در این راکتور به شکل استوانه با حجم مفید ۱ لیتر بود. الکترودها به‌کمک یک قطعه پلکسی‌گلس برش خورده نگه داشته شد و شیاری که در این قطعه تعبیه شده، فواصل موردنیاز الکترودها را تعیین کرد. فواصل در نظر گرفته شده ۴، ۲ و ۶ سانتی‌متر بود و سطح مقطع الکترودها نیز 75 cm^2 (5×15) لحاظ شد که از این میان سطح مقطع مؤثر این الکترودها برابر 60 cm^2 (5×12) بود. در شکل ۱ شماتیک راکتور ارائه شده است.

به‌منظور تولید جریان مستقیم، از دستگاه BK PRECISION (model 9122) استفاده شد که جریان را با استفاده از کابل‌های مخصوص و گیره‌ها به الکترودها می‌رساند. از یک همزن الکترومغناطیسی (مدل ALPHA) به‌منظور انحلال یکنواخت مواد

پساب صنایع نساجی به کار گرفته شده است (Aoudj et al., 2010).

در حالت جریان پیوسته در مقیاس آزمایشگاهی، کارایی حذف ۷۷ درصدی COD و ۹۵ درصدی کدورت به کمک الکترودهای آلومینیم برای پساب صنایع نساجی مشاهده شده است (Koby et al., 2016). همچنین استفاده از این روش به همراه الکترودهای فولادی موجب دستیابی به کارایی ۹۴ درصدی حذف COD در پساب صنایع نفتی (Keramati and Ayati, 2018) و کاهش ۹۳ درصدی حذف رنگ در پساب صنایع نساجی شده است (Malakootian and Nabavian, 2015).

در پژوهش دیگری، به کارگیری روش انعقاد الکتریکی به‌همراه الکترودهای آلومینیمی با فاصله ۲ سانتی‌متری موجب کاهش ۹۹/۱ درصدی سرب موجود در پساب شده است (Shahriari et al., 2019).

در سال ۲۰۲۱ در پژوهشی، به ارزیابی روش‌های اکسیداسیون کاتالیستی و جذب سطحی به‌همراه استفاده از فرایند انعقاد الکتریکی در تصفیه پساب صنایع نساجی پرداخته شده است. نتایج این پژوهش حاکی از دستیابی به استاندارد آبیاری فضای سبز پساب تصفیه شده و کارایی حذف ۹۱ درصدی کربن آلی بود (Bulca et al., 2021).

در پژوهش دیگری که در سال ۲۰۲۲ انجام شد، استفاده از الکترودهای آلومینیم در فرایند انعقاد الکتریکی موجب دستیابی به کارایی حذف رنگ، معادل ۸۹ درصد و حذف COD معادل ۷۶ درصد شد. ترکیب فرایند الکترواکسیداسیون به‌همراه انعقاد الکتریکی، در این پژوهش موجب افزایش کارایی به میزان ۹۶ درصد شده است (Asfaha et al., 2022).

همچنین استفاده مجدد از پساب تصفیه شده خط رنگرزی توسط روش انعقاد الکتریکی حاکی از عدم تأثیر منفی این بازچرخش در فرایند و کاهش مصرف آب فرایندی شده است (Criado et al., 2020, Núñez et al., 2019).

با توجه به اهمیت صنایع نساجی در سبب تولیدات کشور و همچنین با لحاظ کردن ضرورت استفاده مجدد از پساب تولید شده در این صنایع، موضوع تصفیه پساب صنایع نساجی در دستور کار این پژوهش، قرار گرفت. با توجه به مرور تجربیات داخلی و خارجی، ویژگی‌های خاص این نوع پساب و همچنین لحاظ کردن

¹ Batch



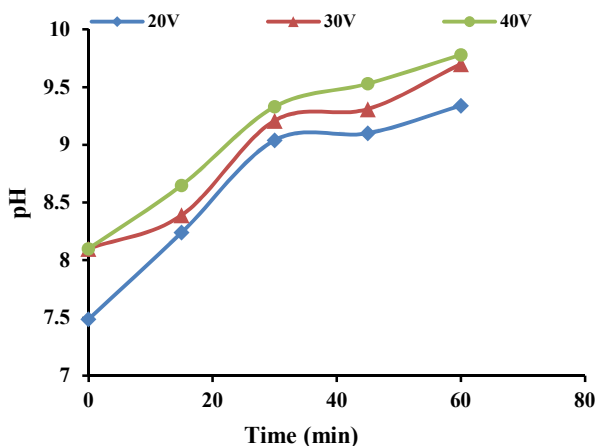


Fig. 2. pH variation when the distance between electrodes is 2 cm at different electrical potential

شکل ۲- تغییرات pH برای فاصله ۲ سانتی متری الکترودها در ولتاژهای مختلف

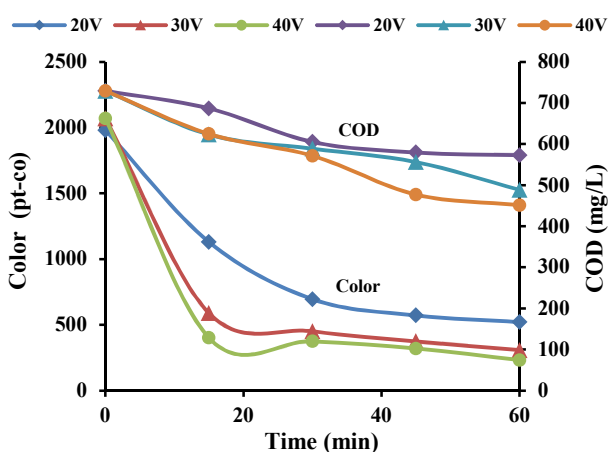


Fig. 3. COD reduction when the distance between electrodes is 2 cm at different electrical potential

شکل ۳- نمودار کاهش COD برای فاصله ۲ سانتی متری الکترودها در ولتاژهای مختلف

۳- نتایج و بحث

مرحله اول آزمایش‌ها برای فاصله ۲ سانتی متری الکترودها و اختلاف پتانسیل برابر ۲۰، ۳۰ و ۴۰ ولت انجام شد. نمودار تغییرات pH نمونه در شکل ۲ و نمودار کاهش COD و رنگ نمونه نیز در شکل ۳ ارائه شده است. در اختلاف پتانسیل ۲۰، ۳۰ و ۴۰ ولت به ترتیب کارایی ۷۶، ۷۲ و ۸۰ درصد در کاهش COD به دست آمد. همچنین کارایی کاهش رنگ برای ولتاژهای یاد شده

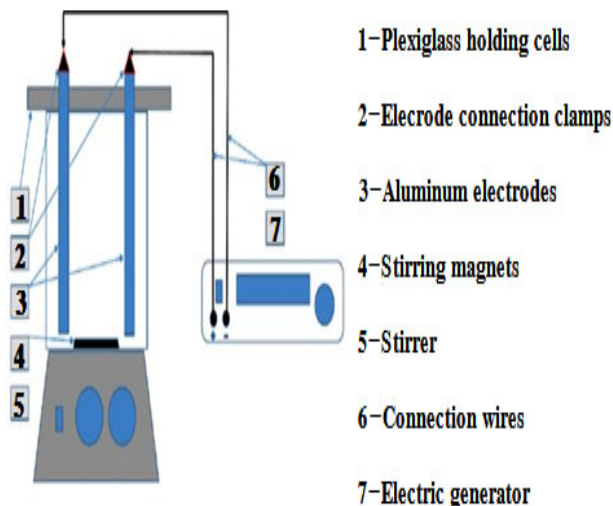


Fig. 1. Laboratory reactor
شکل ۱- راکتور استفاده شده در آزمایش‌ها

شیمیایی در پساب استفاده شد. برای انجام آزمایش‌های COD رنگ از دستگاه DR2800 و برای قرائت pH از دستگاه sension1 شرکت هیچ^۱ استفاده شد. برای اندازه‌گیری مواد شیمیایی مصرفی نیز ترازوی مدل AND (FX-300-EC) به کار گرفته شد. در این پژوهش، پساب تولیدی در یک کارخانه نساجی واقع در تهران بررسی شد که در آن از رنگ‌های دیسپرس استفاده شد. همچنین نمک مصرفی در آزمایش‌ها به منظور تهیه محلول الکترولیت، محصول کارخانه مرک^۲ بود.

۳-۲- روش انجام آزمایش‌ها

ابتدا دو الکترود آلومینیومی در کمترین فاصله یعنی ۲ سانتی متری قرار گرفته و سپس آزمایش سه نوبت برای اختلاف پتانسیل ۲۰، ۳۰ و ۴۰ ولت انجام شد. از این میان با توجه به کارایی حذف COD، حذف رنگ و مدت زمان ماند، اختلاف پتانسیل بهینه تعیین شد. پس از آن با ثابت نگه داشتن اختلاف پتانسیل، فاصله الکترودها به ۴ و ۶ سانتی متر افزایش یافته تا فاصله بهینه تعیین شد. این آزمایش‌ها در غلظت‌های مختلف محلول الکترولیت (NaCl) به منظور یافتن غلظت بهینه تکرار شد. غلظت محلول الکترولیت نیز برابر صفر، ۰.۲، ۰.۳، ۰.۴ و ۰.۵ میلی‌گرم در لیتر در نظر گرفته شد.

¹ Hach
² Merck



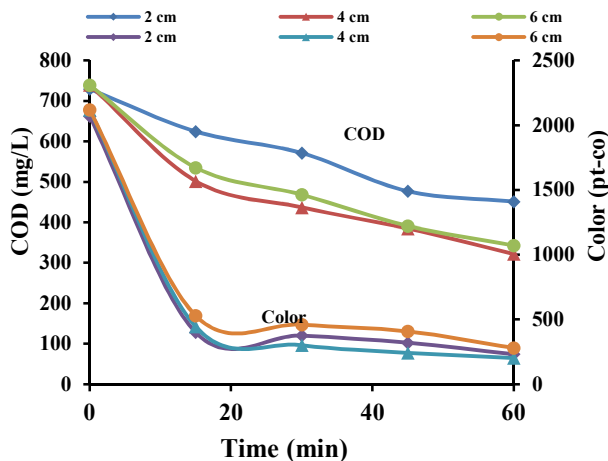


Fig. 5. COD reduction when the electrical potential is 40 V at different electrode distances

شکل ۵- نمودار حذف COD و رنگ نمونه برای اختلاف پتانسیل ۴۰ ولت و فواصل مختلف الکترودها

ارائه شده است. همان طور که مشاهده می شود، بهترین حالت در فاصله ۴ سانتی متری الکترودها روی داده است. افزایش فاصله بین الکترودها در جریان ثابت به دلیل افزایش مقاومت بین الکترودها موجب رسانایی کمتر محلول شده و میزان جریان کاهش می یابد. این کاهش جریان سبب عدم تولید یون های آلومینیم و هیدروکسیل به مقدار کافی برای تشکیل لخته و حذف رنگ می شود. همچنین با افزایش فاصله بین الکترودها انتظار می رود، برخورد کمتری بین یون های آلومینیم با ذرات رنگ به وقوع بپیوندد. در نتیجه جذب الکتروستاتیک کاهش و بازده حذف نیز کاهش می یابد. حال اگر فاصله الکترودها از مقداری کمتر شود با افزایش شار الکتریکی، ترکیبات ناپایداری مانند $Al(OH)^{2+}$ ، $Al(OH)^+$ و $Al(OH)^{-4}$ تولید و باعث کاهش عامل اصلی انعقاد یعنی $Al(OH)_3$ می شود و بر این اساس کارایی حذف کاهش می یابد.

مرحله سوم آزمایش ها در شرایط اختلاف پتانسیل بهینه (۴۰ ولت) و همچنین فاصله بهینه الکترودها (۴ سانتی متر) انجام شد. در این حالت غلظت الکترولیت برابر صفر، ۲، ۳، ۴ و ۵ میلی گرم در لیتر (نمک کلرید سدیم) تغییر یافت. همان طور که در شکل های ۶ و ۷ مشاهده می شود، بهترین شرایط در غلظت ۴ میلی گرم در لیتر به دست آمد.

با افزایش غلظت نمک و به تبع آن غلظت یون کلرید، این یون ها به عنوان عامل اکسیدکننده عمل می کند و موجب حذف لایه

به ترتیب ۸۱، ۷۵ و ۸۷ درصد بود. بنابراین، بیشترین کارایی حذف آلاینده و همچنین افزایش pH مربوط به اختلاف پتانسیل ۴۰ ولت بود. جریان الکتریکی اعمالی با تأثیر بر روی مقدار یون های آزاد شده از آند و نرخ تولید و اندازه حباب های هیدروژن تولیدی در کاتد، سرعت واکنش های انعقاد الکتروشیمیایی را تغییر می دهد. مطابق قانون فارادای، با افزایش چگالی جریان تجزیه صفحات آندی افزایش یافته و میزان منعقدکننده برای ناپایدارسازی ذرات کلوئیدی بیشتر می شود و در نتیجه لخته سازی آلاینده ها و رنگ موجود بیشتر رخ خواهد داد. از طرف دیگر با افزایش جریان، مقدار گاز هیدروژن تولیدی در کاتد افزایش و اندازه حباب ها کاهش یافته که منجر به افزایش تراکم شار آنها به سمت بالا می شود. با کوچکتر شدن حباب ها، سطح اتصال آنها به ذرات آلاینده و رنگ و به دنبال آن کارایی حذف بیشتر می شود. حباب های کوچک تولید شده ذرات موجود در محلول را پس از لخته سازی بالا آورده و طی فرایند شناورسازی از محلول حذف می شود. با افزایش ولتاژ، مقدار منعقدکننده اصلی یعنی $Al(OH)_3$ افزایش یافته و این هیدروکسید به طبع باعث افزایش pH می شود که با گذشت زمان آزمایش، مقدار منعقدکننده نیز زیاد و باعث افزایش یافتن pH می شود.

مرحله دوم آزمایش ها در اختلاف پتانسیل بهینه (۴۰ ولت) و برای فواصل الکترود برابر ۲، ۴ و ۶ سانتی متر به منظور تعیین فاصله بهینه انجام شد. نتایج این مرحله از آزمایش ها در شکل های ۴ و ۵

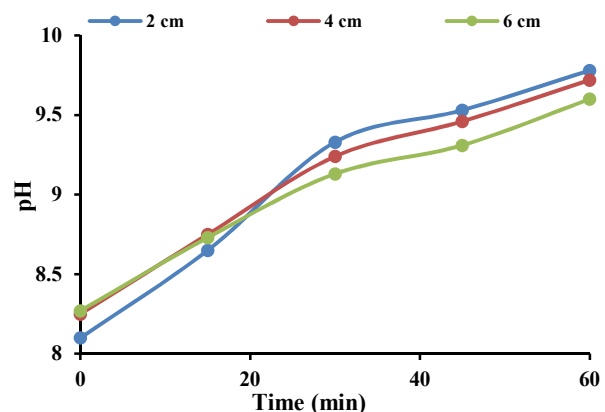
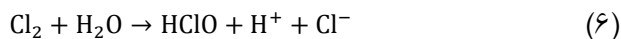


Fig. 4. pH variation when the electrical potential is 40 V at different electrode distances

شکل ۴- نمودار تغییرات pH برای اختلاف پتانسیل ۴۰ ولت و فواصل مختلف الکترودها



در محلول حل شده و تبدیل به OCl^- می‌شود. این واکنش‌ها مطابق معادلات ۵ تا ۷ هستند



در غلظت‌های بیشتر از NaCl ، انحلال بیش از حد آلومینیم منجر به اثر متقابل نامطلوب بین منعقدکننده و ذرات می‌شود. در واقع با افزایش بیش از حد غلظت کلرید سدیم یون Cl^- در محلول با $\text{Al}(\text{OH})_3$ واکنش داده و تولید ترکیبات ناپایدارمانند $\text{Al}(\text{OH})_2\text{Cl}$ ، $\text{Al}(\text{OH})\text{Cl}_2$ و AlCl_3 می‌کند. این ترکیبات در نهایت با یون‌های Cl^- دیگر به فرم AlCl_4^- تبدیل می‌شوند. از این رو مقدار منعقدکننده اصلی $\text{Al}(\text{OH})_3$ و به تبع آن کارایی حذف کاهش می‌یابد.

به طور کلی هنگام استفاده از نمک NaCl به عنوان الکترولیت، کاهش آلاینده از طریق فرایند انعقاد الکتریکی با تشکیل منعقدکننده و همچنین تجزیه الکتروشیمیایی در نتیجه اکسیداسیون غیرمستقیم، توسط هیپوکلریت انجام می‌شود.

۴- نتیجه‌گیری

شرایط بهینه راهبری راکتور ناپیوسته، به منظور حذف آلودگی پساب صنایع نساجی به روش الکتروکواگولاسیون با استفاده از الکترودهای آلومینیمی در فاصله ۴ سانتی‌متری، اختلاف پتانسیل برابر ۴۰ ولت و غلظت محلول الکترولیت برابر ۴ میلی‌گرم در لیتر کلرید سدیم حاصل شد. در این شرایط، کارایی حذف رنگ موجود در پساب کارخانه نساجی، معادل ۹۶ درصد به دست آمد. حذف رنگ چالش اصلی پیش روی صنایع نساجی است و استفاده از روش الکتروکواگولاسیون علاوه بر حذف رنگ منجر به کاهش COD با کارایی ۶۹ نیز شد. بنابراین می‌توان گفت روش بیان شده کارایی مناسبی در کنار سایر روش‌ها در حذف آلودگی از پساب صنایع نساجی دارد.

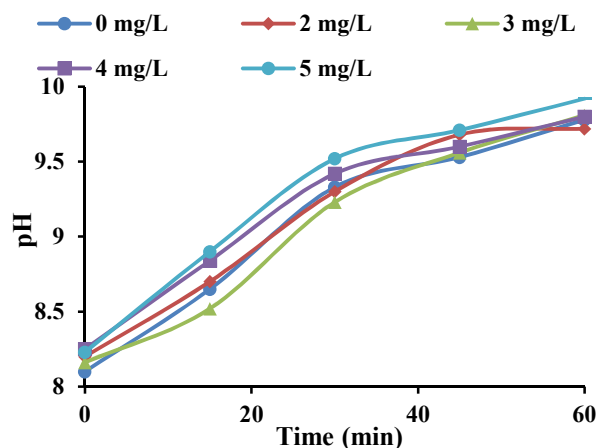


Fig. 6. pH variation when the electrical potential is 40 V, distance between electrodes is 4 cm at different electrolyte concentration

شکل ۶- نمودار تغییرات pH برای اختلاف پتانسیل ۴۰ ولت، فاصله ۴ سانتی‌متری الکترودها و غلظت‌های مختلف الکترولیت

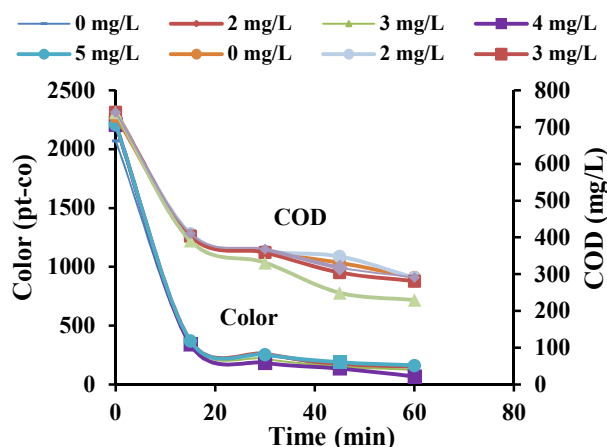


Fig. 7. COD reduction when the electrical potential is 40 V, distance between electrodes is 4 cm at different electrolyte concentration

شکل ۷- نمودار حذف COD و رنگ برای اختلاف پتانسیل ۴۰ ولت، فاصله ۴ سانتی‌متری الکترودها و غلظت‌های مختلف الکترولیت

اکسید منفعل روی سطح آند که انحلال آن را محدود می‌کند، می‌شوند. بر این اساس، با افزایش یون‌های هیدروکسید فلزی در محلول، کارایی حذف بهبود می‌یابد. یون کلرید با مصرف اکسیژن به هیپوکلریت تبدیل می‌شود. به عبارت دیگر یون کلرید منجر به افزایش تجزیه انحلال آند از دو طریق اکسید شدن یا شرکت در واکنش انحلال فلز می‌شود. این یون تولید Cl_2 می‌کند که با سرعت



۵- قدردانی

آب و محیط‌زیست دانشگاه صنعتی شریف که از هر نظر برای انجام این طرح پژوهشی مساعدت کرده است، کمال قدردانی را دارند. نویسندگان این پژوهش، از پژوهشکده علوم و فناوری‌های انرژی،

References

- Alinasafi, A., Khemis, M., Pons, M. N. & Leclerc, J. 2005. Electrocoagulation of reactive textile dyes and textile wastewater. *Chemical Engineering and Processing*, 44, 461-470.
- Al-Tohamy, R., Ali, S. S., Li, F., Okasha, K. M., Mahmoud, Y. A. G., Elsamahy, T., et al. 2022. A critical review on the treatment of dye-containing wastewater: ecotoxicological and health concerns of textile dyes and possible remediation approaches for environmental safety. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 231, 113160.
- Aoudj, S., Khelifa, A., Drouicage, N. & Hecini, M. 2010. Electrocoagulation process applied to wastewater containing dyes from textile industry. *Chemical Engineering and Processing*, 49, 1176-1182.
- Asfaha, Y., Zewge, F., Yohannes, T. & Kebede, S. 2022. Application of hybrid electrocoagulation and electrooxidation process for treatment of wastewater from the cotton textile industry. *Chemosphere Journal*, 302, 134706.
- Babu, R., Bhadrinarayana, N. S., Sheriffa Begum, K. M. & Anantharaman, N. 2007. Treatment of tannery wastewater by electrocoagulation. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*, 42(2), 201-206.
- Bener, S., Atalay, S. & Ersöz, G. 2020. The hybrid process with eco-friendly materials for the treatment of the real textile industry wastewater. *Ecological Engineering*, 148, 105789.
- Bulca, Ö., Palas, B., Atalay, S. & Ersoz, G. 2021. Performance investigation of the hybrid methods of adsorption or catalytic wet air oxidation subsequent to electrocoagulation in treatment of real textile wastewater and kinetic modelling. *Journal of Water Process Engineering*, 40, 101821.
- Criado, S. P., Gonçalves, M. J., Tavares, L. & Bertoli, S. L. 2020. Optimization of electrocoagulation process for disperse and reactive dyes using the response surface method with reuse application. *Journal of Cleaner Production*, 275, 122690.
- Crini, G. & Badot, P. M. 2008. Application of chitosan, a natural aminopolysaccharid for dye removal from aqueous solutions by adsorption processes using batch studies: a review of recent literature. *Progress in Polymer Science*, 33(4), 399-447.
- Hakizimana, J., 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.
- Holt, P. K., Barton, G. W. & Mitchell, C. A. 2005. The future for electrocoagulation as a localised water treatment technology. *Chemosphere*, 59(3), 355-367.
- Keramati, M. & Ayati, B. 2018. Petroleum wastewater treatment and optimization of effective parameters using electrocoagulation process. *Modares Civil Engineering Journal*, 18(5), 177-187. (In Persian)
- Kilic, M. G. & Hosten, C. 2010. A comparative study of electrocoagulation and coagulation of aqueous suspensions of kaolinite powders. *Journal of Hazardous Materials*, 176(1), 735-740.
- Koby, M., Gengec, E. & 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.
- Körbahti, B. K. & Tanyolaç, A. 2008. Electrochemical treatment of simulated textile wastewater with industrial



- components and Levafix Blue CA reactive dye: optimization through response surface methodology. *Journal of Hazardous Materials*, 151(2), 422-431.
- Lin, S. H. & Chen, M. L. 1997. Treatment of textile wastewater by chemical methods for reuse. *Water Research*, 31(4), 868-876.
- Lin, S. H. & Peng, C. F. 1996. Continuous treatment of textile wastewater by combined coagulation, electrochemical oxidation and activated sludge. *Water Research*, 30(3), 587-592.
- Malakootian, M. & Nabavian, M. R. 2015. The study of the performance of electrocoagulation in comparison to electro-fenton processes at decoloration of methylene blue dye from aqueous solutions using iron electrode. *Rafsanjan University of Medical Science Journal*, 14(9), 755-768. (In Persian)
- Mohammed, M. A., Shitu, A. & Ibrahim, A. 2014. Removal of methylene blue using low cost adsorbent: a review. *Research Journal of Chemical Sciences*, 4(1), 91-102.
- Mollah, M. Y. A., Schennach, R., Parga, J. R. & Cocke, D. L. 2001. Electrocoagulation (EC)-science and applications. *Journal of Hazardous Materials*, 84(1), 29-41.
- Ni'am, M., Othman, F., Sohaili, J. & Fauzia, Z. 2007. Removal of COD and turbidity to improve wastewater quality using electrocoagulation technique. *The Malaysian Journal of Analytical Sciences*, 11(1), 198-205.
- Núñez, J., Yeber, M., Cisternas, N., Thibaut, R., Medina, P., Carrasco, C., et al. 2019. Application of electrocoagulation for the efficient pollutants removal to reuse the treated wastewater in the dyeing process of the textile industry. *Journal of Hazardous Materials*, 371, 705-711.
- Órfão, J. J. M., Silva, A. I. M., Pereira, J. C. V., Barata, S. A., Fonseca, I. M., Faria, P. C. C., et al. 2006. Adsorption of a reactive dye on chemically modified activated carbons-influence of pH. *Journal of Colloid and Interface Science*, 296(2), 480-489.
- Ramalho, P. A. 2005. Degradation of dyes with microorganisms studies with ascomycete yeasts. PhD. Thesis, Biology Department, University of Minho, Braga, Portugal.
- Salleh, M., Mahmoud, D., Abdul Karim, W. & Idris, A. 2011. Cationic and anionic dye adsorption by agricultural solid wastes: a comprehensive review. *Desalination*, 280(1), 1-13.
- Shahriari, T., Karbasi, A. & Reihani, M. 2019. Evaluation of the electrocoagulation process in API oil refinery wastewater treatment (case study: Arak, Shazand). *Environmental Sciences*, 17(1), 141-154. (In Persian)
- Tanveer, R., Yasar, A., Ikhlaq, A., Nissar, H. & Nizami, A. S. 2022. Comparison of ozonation, Fenton, and photo-Fenton processes for the treatment of textile dye-bath effluents integrated with electrocoagulation. *Journal of Water Process Engineering*, 46, 102547.
- Teo, S. H., Ng, C. H., Islam, A., Abdulkareem-Alsultan, G., Joseph, C. G., Janaun, J., et al. 2022. Sustainable toxic dyes removal with advanced materials for clean water production: a comprehensive review. *Journal of Cleaner Production*, 332, 130039.
- Weber, E. J. & Stickney, V. C. 1993. Hydrolysis kinetics of reactive blue 19-vinyl sulfone. *Water Research*, 27(1), 63-67.
- Yeddou, N. & Bensmaili, A. 2005. Kinetic models for the sorption of dye from aqueous solution by clay-wood sawdust mixture. *Desalination*, 185(1), 499-508.
- Yousuf, M., Mollah, A. & Schennach, R. 2001. Electrocoagulation (EC)-science and applications. *Journal of Hazardous Material*, 86, 29-41.
- Zaroual, Z., Azzi, M., Saib, N. & Chainet, E. 2006. Contribution to the study of electrocoagulation mechanism in



basic textile effluent. *Journal of Hazardous Materials*, 131, 73-78.

Zazou, H., Afanga, H., Akhouairi, S., Ouchtak, H., Addi, A. A., Akbour, R. A., et al. 2019. Treatment of textile industry wastewater by electrocoagulation coupled with electrochemical advanced oxidation process. *Journal of Water Process Engineering*, 28, 214-221.

Zhuo, Q., Ma, H., Wang, B. & Gu, L. 2007. Catalytic decolorization of azo-stuff with electro-coagulation method assisted by cobalt phosphomolybdate modified kaolin. *Journal of Hazardous Materials*, 142(1-2), 81-87.



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

