بررسی کارایی فرایند انعقاد الکتریکی در حذف رنگ از فاضلاب صنایع نساجی پلی آکریلیک

محمدرضا مسعودی نژاد[1] احمدرضا یزدانبخش[2] هاجر شریفی ملکسری[3]

(دریافت ۹۰/۱۰/۱۰ پذیرش ۹۱/۲/۱۰)

چکیده

رنگها به‌دلیل ماهیتشان از آلاینده‌های ظاهری بوده و حتی در غلظتهای نسبتاً پایین شفافیت و کیفیت زیبایی شناختی آبهای سطحی را از بین می‌برند. تا کنون از فرایندهای متعددی برای حذف رنگ از پساب استفاده شده است. در سالهای اخیر از روشهای الکتروشیمیایی به‌طور موفقیت آمیزی برای تصفیه فاضلاب رنگی استفاده شده است. در این مطالعه فرایند انعقاد الکتریکی با الکترودهای آلومینیوم به‌منظور تصفیه فاضلاب نساجی با COD برابر ۱۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر به‌کار گرفته شد. این مطالعه در مقیاس آزمایشگاهی انجام گردید. نمونه مورد نظر به درون راکتور الکتروشیمیایی حاوی ٤ عدد الکترود آلومینیوم وارد شد. سپس به حالت تک قطبی به یک منبع جریان برق مستقیم متصل گردید و اثر ۳ پارامتر عملیاتی زمان الکترولیز از ۲۰ تا ٦۰ دقیقه، شدت جریان الکتریکی ۰/۵ تا ۲/۵ آمپر و pH از ۴ تا۹ ، بر کارایی حذف رنگ و COD مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از مطالعه نشان داد که کارایی حذف رنگ و COD با افزایش جریان الکتریکی و زمان واکنش رابطه مستقیم و با افزایش pH رابطه عکس دارد. شرایط بهینه عملیاتی در شدت جریان ۱/۵ آمپر، زمان واکنش ۶۰ دقیقه و pH طبیعی فاضلاب خام حاصل شد که در آن ۸۶ درصد از رنگ و ۸۵ درصد از COD حذف گردید. این مطالعه نشان داد که فرایند انعقاد الکتریکی با الکترودهای آلومینیوم می‌تواند به‌عنوان یک روش مؤثر و کارآمد برای تصفیه فاضلاب نساجی پلی آکریلیک باشد.

واژه‌های کلیدی: حذف رنگ، COD، انعقاد الکتریکی، پلی آکریلیک، الکترود آلومینیوم

Investigation of Electrocoagulation Process Efficiency for Color Removal from Polyacrylic Textile Industrial Wastewater

Mohammad Reza Massoudinejad [1] *Ahmad Reza Yazdanbakhsh [2]* *Hajar Sharifi Maleksari [3]*

(Received Dec. 31, 2011 Accepted April 29, 2012

Abstract

Dyes due to coloring nature are appearance pollutants and destroys the transparency and aesthetic quality of surface waters even at relatively low concentration. Several processes have been used for dye removal from wastewater. In recent years, electrochemical methods have been successfully employed to treat dying wastewater.In this study, the electrocoagulation method with aluminum electrodes were used for polyacrylic textile wastewater treatment. COD of wastewater was 1400mg/l. This study was conducted in laboratory scale. The sample was placed in to the electrochemical reactor contains 4 electrodes. The electrodes were connected to a DC power supply. Then the effect of the three operational parameters, electrolysis time (20-60 minutes), electrical applied current (0.5-2.5 Ampere) and pH (4-9) on color and COD removal efficiency has been investigated. The results showed that the color and COD removal efficiency is a direct relation with increasing of the reaction time and inverse relation with increase of pH. Optimum operation conditions were in applied current of 1.5 A, the retention time of 60 minutes and pH of 4. In this condition, color and COD removals were 86% and 85%, respectively. This study showed that electrocoagulation process is an effective and efficient method to treatment of polyacrylic textile wastewater.

Keywords: Color Removal, COD, Electrocoagulation, Polyacrylic, Aluminum Electrode.

۱- دانشیار گروه مهندسی بهداشت محیط و عضو هیئت مؤسس مرکز تحقیقات ارتقا، ایمنی و پیشگیری از مصدومیت‌ها، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران

۲- دانشیار گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران

۳- کارشناسی ارشد مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران (نویسنده مسئول) ۰۹۱۲۷۹۸۴۸۲۲ h_sharifimalek@yahoo.com

1. Assoc. Prof. of Environmental Health Eng, and Member of Safety Promotion and Injury Prevention Research Center, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran
2. Assoc. Prof. of Environmental Health Eng., Faculty of Public Health, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran
3. M.Sc. of Environmental Health Eng., Faculty of Public Health, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran (Corresponding Author) 09127984822 h_sharifimalek@yahoo.com

۱- مقدمه

صنایع نساجی مقدار زیادی آب و مواد شیمیایی را برای فرایندهای رنگرزی مورد استفاده قرار می‌دهند. در طی این فرایند حدود ۵ تا ۲۰ درصد از رنگ به‌علت عدم تثبیت کامل آن بر روی الیاف وارد فاضلاب می‌گردد[۱]. بنابراین فاضلاب رنگی معمولاً شامل آلاینده‌هایی از قبیل اسیدها، بازها، جامدات محلول، ترکیبات سمّی و مواد رنگی است که حتی در مقادیر خیلی کم قابل توجه بوده و باید قبل از تخلیه فاضلاب به منابع آبی حذف شوند[۲]. زیرا رنگها به‌دلیل ماهیتشان از آلاینده‌های ظاهری بوده و حتی در غلظتهای نسبتاً پایین شفافیت و کیفیت زیبایی شناختی آبهای سطحی را از بین می‌برند، از نفوذ نور به درون آبهای دریافت کننده جلوگیری می‌کنند و می‌توانند برای ماهیان، فون و فلور موجود در منطقه سرطان‌زا، جهش زا و سمّی باشند[۳ و ۴].

تاکنون از فرایندهای متعددی مانند ترسیب، انعقاد شیمیایی، تبادل یونی، جذب بر روی کربن فعال (جذب سطحی)، اکسیداسیون شیمیایی، فرایندهای غشایی مانند نانوفیلتراسیون و اسمز معکوس و فرایند تجزیه بیولوژیکی برای حذف رنگ از پساب استفاده شده است[۵-۷]. گرچه این روشها مؤثر به‌نظر می‌رسند اما اغلب ناکافی و پرهزینه هستند[۸]. در سالهای اخیر به فرایندهای الکتروشیمیایی به‌علت سادگی کاربرد و سازگار بودن با محیط زیست توجه بسیار زیادی شده است. یکی از مهم‌ترین این فرایندها انعقاد الکتریکی[1] است که به‌طور مؤثری برای حذف رنگ از فاضلاب استفاده شده است. این فرایند یک روش ساده، قابل اعتماد، کم هزینه و اثر بخش را برای تصفیه فاضلاب بدون افزودن مواد شیمیایی فراهم می‌کند. علاوه بر این، مقدار لجن دفعی را نیز کاهش می‌دهد. در فرایند EC از یک منبع جریان برق مستقیم بین الکترودهای فلزی فرو رفته در آب آلوده استفاده می‌شود. جریان الکتریکی منجر به انحلال صفحات فلزی در فاضلاب می‌گردد. یون‌های فلزی در pH مناسب می‌توانند رنج گسترده‌ای از گونه‌های منعقد کننده و هیدروکسیدهای فلزی را تشکیل دهند که آلاینده‌های محلول را جذب و ترسیب و ذرات معلق را ناپایدار و متراکم می‌کنند[۹]. به‌علاوه حبابهای کوچک گاز هیدروژن در کاتد تولید می‌شود که بیشتر لخته‌ها را شناور نموده و جداسازی آنها را از آب تصفیه شده آسان می‌سازد[۱۰]. این فرایند تا زمانی که منبع انرژی الکترودها تأمین می‌شود می‌تواند ادامه یابد، بنابراین به‌منظور تصفیه ترکیبات آلی مقاوم به تجزیه بیولوژیکی گزینه مناسب‌تری است[۱۱]. الکترودهای مورد استفاده در فرایند EC اغلب از جنس آهن یا آلومینیوم هستند[۹].

اگر از الکترودهای آلومینیوم در فرایند EC استفاده شود، واکنش‌های اصلی به‌صورت زیر خواهد بود[۱۲]

$$Al \rightarrow Al^{+3}_{(aq)} + 3e^- \qquad \text{آند} \qquad (۱)$$

$$3H_2O_2 + 3e^- \rightarrow \frac{3}{2}H_{2(g)} + 3OH^- \qquad \text{کاتد} \qquad (۲)$$

یون‌های Al^{3+} و OH^- تولید شده طی واکنش‌های ۳ و ۴، گونه‌های متنوع مونومریک را تولید می‌نمایند که سطح زیادی را برای جذب سریع ترکیبات آلی و به دام انداختن ذرات کلوئیدی ایجاد می‌نماید[۱۲]

$$Al^{3+}_{(aq)} + 3H_2O \rightarrow Al(OH)_3 + 3H^+ \qquad (۳)$$

$$nAl(OH)_3 \rightarrow Al_n(OH)_{3n} \qquad (۴)$$

مکانیسم‌های واکنش متعددی ممکن است بین مولکول‌های رنگ و محصولات جانبی هیدرولیز رخ دهد. دو مکانیسم اصلی معمولاً عبارت‌اند از: ترسیب برای pH کمتر از ۶/۵ و جذب برای pH بالاتر از ۶/۵:

۱- ترسیب: pH : ۴-۵

آلومینیوم مونومری- رنگ ⟶ آلومینیوم مونومری + رنگ

pH : ۵-۶

آلومینیوم پلیمری- رنگ ⟶ آلومینیوم پلیمری + رنگ

۲- جذب:

ذره ⟶ ⟶ ⟶ $Al(OH)_{3(s)}$ + آلومینیوم پلیمریک- رنگ

$nAl(OH)_3 \rightarrow Al_n(OH)_{3n}$: این لخته‌ها پلیمرایز می‌شوند

فرایند انعقاد الکتریکی به‌طور موفقیت‌آمیزی به‌منظور تصفیه فاضلابهایی از جمله کاغذسازی، روغن زیتون، دباغی، فاضلاب شهری، فاضلاب حاوی فلزات سنگین، رختشوی‌خانه، صنایع غذایی و پروتئینی، فاضلاب حاوی نیترات، فاضلاب روغنی، فاضلاب رستوران، کارخانه تولید چیپس سیب زمینی، شیرابه محل دفن و به‌طور گسترده‌ای برای رنگ‌زدایی فاضلابهای متنوع نساجی استفاده شده است[۲، ۷-۹ و ۱۳-۲۴]. در این مطالعات فرایند EC در مقیاس آزمایشگاهی در شرایط مختلف عملیاتی انجام شده است و توانسته است آلاینده‌هایی همچون COD، کدورت، جامدات معلق، فلزات سنگین، نیترات، ترکیبات آلی مقاوم به تجزیه بیولوژیکی و رنگ را به‌خوبی حذف نماید. به‌عنوان مثال در تصفیه پساب کارخانه خمیر و کاغذ از الکترودهای آلومینیوم استفاده شده است و اثر پارامترهای مؤثر دانسیته جریان، pH، زمان الکترولیز، فاصله بین الکترود، غلظت NaCl و سرعت هم زدن بررسی گردیده

[1] Electrocoagulation (EC)

است و در شرایط بهینه، کارایی ۹۴، ۹۰ و ۸۷ درصد به‌ترتیب برای رنگ، COD و BOD حاصل شده است[۱۳]. در تصفیه فاضلاب کارخانه روغن زیتون به‌روش انعقاد الکتریکی با الکترودهای آلومینیوم، بیش از ۷۰ درصد از COD و پلی فنول‌ها در شرایط بهینه آزمایشگاهی حذف گردیده است[۱۴]. در مطالعه اودج و همکاران[1] که به‌منظور حذف رنگ قرمز مستقیم ۸۱ از محلولهای آبی به‌روش انعقاد الکتریکی انجام شده است، تحت شرایط بهینه عملیاتی، ۹۸ درصد از رنگ حذف گردیده است[۹].

همچنین نتایج مطالعه کوبیا و همکاران[2] با الکترودهای آلومینیوم، کارایی حذف ۹۵ درصد را نشان داده است[۲]. در ایران نیز مطالعاتی به‌منظور حذف رنگ از پسابهای رنگی انجام شده است. نتایج مطالعه جعفرزاده و دانشور در حذف رنگهای بازیک به‌روش انعقاد الکتریکی به‌ترتیب کارایی حذف ۹۴ و ۸۲ درصد رنگ و COD را نشان داده است[۲۵]. رحمانی و سمرقندی که در مطالعه خود تصفیه‌پذیری پسابهای رنگی به‌روش انعقاد الکتریکی را مورد بررسی قرار داده‌اند، در شرایط بهینه عملیاتی شامل ولتاژ ۳۰ ولت، زمان واکنش ۳۰ دقیقه و pH برابر با ۳/۵، کارایی حذف رنگ برای الکترودهای آهن و آلومینیوم را به‌ترتیب ۹۶ و ۸۶ درصد گزارش نموده‌اند[۲۶].

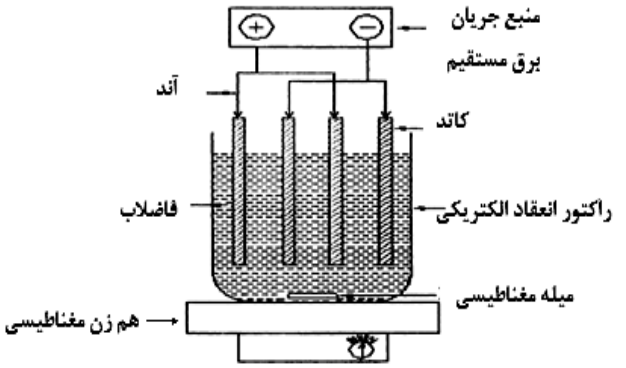
هدف از این مطالعه انجام یک بررسی آزمایشگاهی در حذف رنگ از فاضلاب طبیعی صنعت نساجی پلی آکریلیک با استفاده از فرایند انعقاد الکتریکی با الکترودهای آلومینیوم و با بررسی اثر ۳ پارامتر مؤثر زمان الکترولیز، شدت جریان الکتریکی، pH فاضلاب و ارزیابی شرایط بهینه از نظر عملیاتی به‌منظور غلبه بر مشکلات محیط زیستی مربوط به فاضلاب این صنایع بود. لازم به‌ذکر است که الیاف آکریلیک از دسته الیاف مصنوعی بوده که از ترکیبات آکریلونیتریل[3] ساخته شده‌اند و معمولاً از رنگهای قلیایی که گاهی اوقات کاتیونیک نامیده می‌شوند برای رنگرزی آن‌ها استفاده می‌گردد.

۲- مواد و روشها

نمونه فاضلاب مورد بررسی در این مطالعه از خروجی واحد رنگرزی الیاف پلی آکریلیک کارخانه کرک نخ سمنان واقع در شهرک صنعتی شرق سمنان جمع‌آوری و در ظرف پلاستیکی در دمای ۴ درجه سلسیوس برای انجام آزمایش‌ها نگهداری شد. نمونه مورد نظر حاوی رنگهای آبی قلیایی ۴۱، قرمز قلیایی ۴۶، زرد قلیایی ۲۸، دیسپرس زرد ۶۰ و دیسپرس زرد ۲۳ بود. ویژگی‌های فاضلاب مورد بررسی در جدول ۱ و ساختار شیمیایی رنگهای ذکر شده در جدول ۲ آمده است. تمامی ترکیبات مورد استفاده از جمله کلرید سدیم، هیدروکسید سدیم، اسید هیدروکلریک، اسید سولفوریک از محصولات شرکت مرک[4] آلمان بودند. تجهیزات مربوط به واحد انعقاد الکتریکی در شکل ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱- خصوصیات فاضلاب خام

پارامتر	مقدار میانگین	پارامتر	مقدار میانگین
طول موج حداکثر جذب (نانومتر)	۶۰۷	BOD (میلی‌گرم در لیتر)	۲۰۰
رنگ (درصد جذب در نانومتر ۶۰۷)	۰/۵۸	COD (میلی‌گرم در لیتر)	۱۴۰۰
pH	۴/۰۵	هدایت الکتریکی ms/cm	۳/۱۷
Cl^- (میلی‌گرم در لیتر)	۷۲		



شکل ۱- واحد انعقاد الکتریکی مورد استفاده در مطالعه

راکتور الکتروشیمیایی شامل یک محفظه روباز شیشه‌ای با ابعاد ۸×۸×۱۵ سانتی‌متر و با حجم مؤثر ۵۰۰ میلی‌لیتر بود که چهار عدد الکترود صفحه‌ای از جنس آلومینیوم با ابعاد ۰/۱×۴×۱۵ سانتی‌متر و با سطح مؤثر ۹۶ سانتی‌متر مربع داخل آن قرار گرفتند. الکترودها شامل ۲ عدد آند و ۲ عدد کاتد بودند که به‌صورت یک در میان با فاصله ۲۰ میلی‌متر به یک منبع جریان برق مستقیم متصل شدند. سپس به‌منظور برقراری اختلاط درون راکتور کل محفظه بر روی یک همزن مغناطیسی با دور مشخص قرار گرفت. به‌منظور کاهش مصرف انرژی و تأمین هدایت الکتریکی مناسب از محلول نمک کلرور سدیم با غلظت ۸/۵ میلی‌مول بر لیتر و به‌منظور تنظیم pH فاضلاب از محلول هیدروکسید سدیم ۱ نرمال استفاده گردید. در

[1] Aoudj et al.
[2] Kobya et al.
[3] Acrylonitrile
[4] Merck

این مطالعه تأثیر ۳ پارامتر شدت جریان، زمان الکترولیز و pH بر کارایی فرایند در حذف رنگ و COD مورد بررسی قرار گرفت. در هر مرحله از آزمایش ۴۰۰ میلی‌لیتر از فاضلاب مورد نظر وارد راکتور شد و با روشن نمودن منبع جریان برق مستقیم، فرایند انعقاد الکتریکی آغاز گردید. آزمایش‌ها در pH ۴، ۷ و ۹، شدت جریان ۰/۵، ۱/۵ و ۲/۵ آمپر و زمان واکنش ۲۰، ۴۰ و ۶۰ دقیقه انجام شد. بعد از هر مرحله از آزمایش به محتویات درون راکتور زمان داده شد تا فرایند ته‌نشینی لخته‌ها بهبود یابد. سپس از درون راکتور نمونه‌گیری شد و پس از صاف نمودن با کاغذ صافی واتمن ۴۲، رنگ باقیمانده، COD و pH نمونه‌ها مطابق با روشهای استاندارد برای آزمایش‌های آب و فاضلاب (pH با استفاده از دستگاه pH متر Corning 120، COD با روش Open Reflux-Colorimetric-5220B، رنگ با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر DR 5000) اندازه‌گیری شد[۲۷].

با توجه به اینکه نمونه فاضلاب مورد مطالعه حاوی ترکیبی از رنگهای ذکر شده بود، رنگ نمونه‌ها بر اساس طول موج حداکثر جذب و از طریق اسکن آنها در محدوده طول موج مرئی اندازه‌گیری شد که در مطالعه حاضر در قبل و بعد از آزمایش تنها در طول موج ۶۰۷ نانومتر حداکثر میزان جذب مشاهده شد. بعد از هر مرحله از آزمایش الکترودها شسته شدند و به‌مدت ۱۵ دقیقه درون محلول اسید کلریدریک رقیق (۱۵ درصد وزنی) قرار گرفتند و با برس پلاستیکی تمیز و به‌خوبی آبکشی و خشک گردیدند. به‌منظور دقت و صحت در نتایج، هر کدام از آزمایش‌ها ۳ بار تکرار گردید و نتایج به‌صورت میانگین گزارش شد و نمودارهای مربوطه با استفاده از نرم‌افزار Excel نسخه ۲۰۰۳ ترسیم گردید.

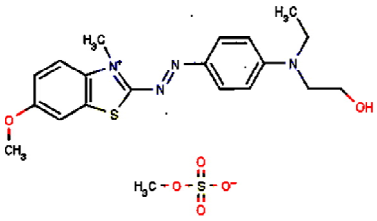
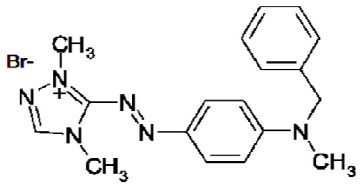
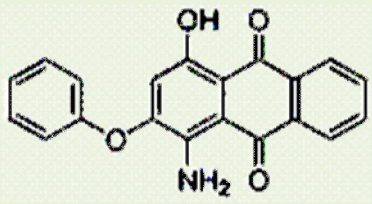
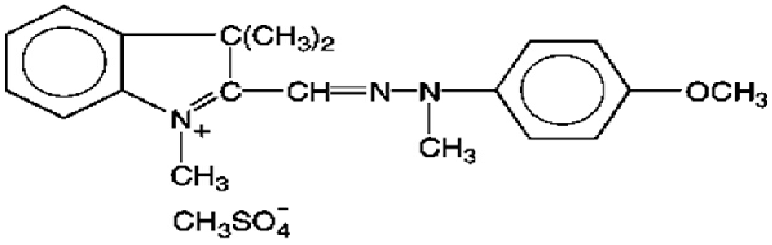
کارایی حذف رنگ و COD بعد از فرایند انعقاد الکتریکی به‌وسیله رابطه زیر تعیین شد

$$R\ \text{درصد} = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \qquad (۵)$$

که در این رابطه

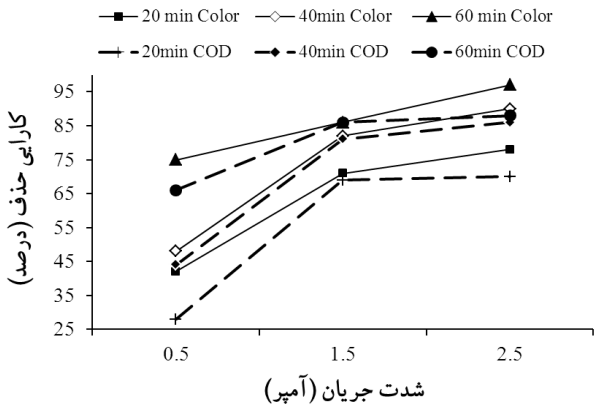
C_0 و C_t غلظت COD و یا جذب اولیه نمونه در ۶۰۷ نانومتر به‌ترتیب قبل و بعد از فرایند هستند.

جدول ۲- ساختمان شیمیایی رنگهای موجود در فاضلاب خام

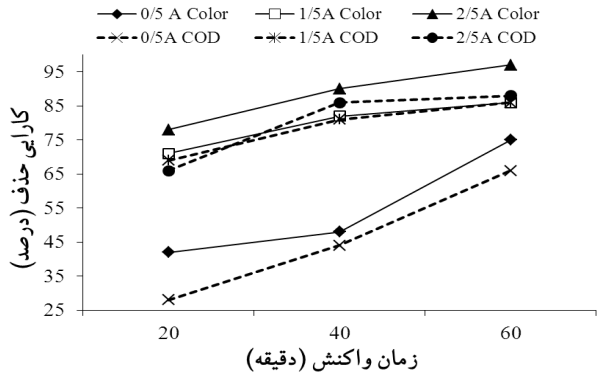
ماده رنگزا	ساختمان شیمیایی	ماده رنگزا	ساختمان شیمیایی
BB41 (آبی قلیایی ۴۱)		BR46 (قرمز قلیایی ۴۶)	
DR60 (زرد دیسپرس ۶۰)		DY23 (زرد دیسپرس ۲۳)	
BY28 (زرد قلیایی ۲۸)			

۳- نتایج و بحث

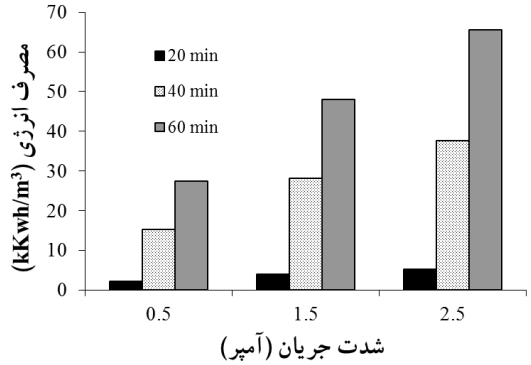
حذف رنگ از فاضلاب با استفاده از فرایند انعقاد الکتریکی از جمله روشهای رو به توسعه است. در این مطالعه حذف رنگ از فاضلاب صنایع نساجی پلی آکریلیک با بررسی اثر پارامترهای کلیدی شدت جریان، زمان واکنش و pH انجام شد. نتایج حاصل از مطالعه در شکلهای ۲ تا ۶ ارائه شده است.



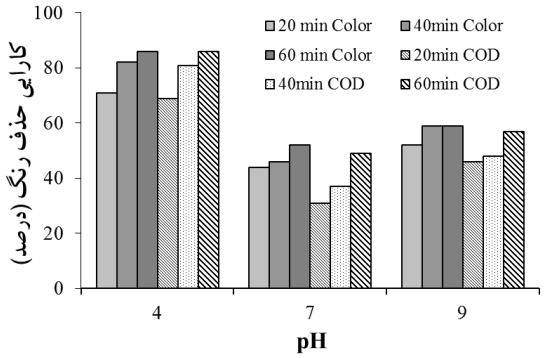
شکل ۲- رابطه شدت جریان الکتریکی با کارایی حذف رنگ و COD در pH برابر ۴



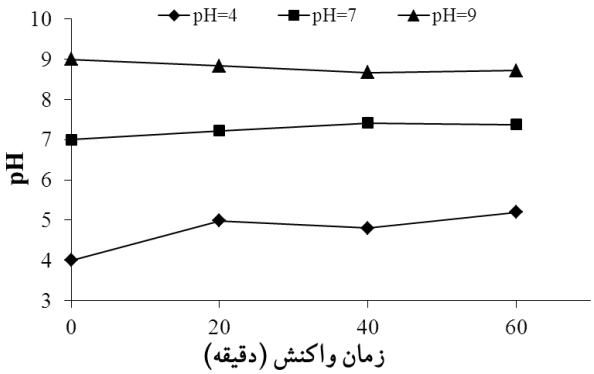
شکل ۳- رابطه زمان واکنش با کارایی حذف رنگ و COD در pH برابر ۴



شکل ۴- مقایسه انرژی الکتریکی مصرفی در شدت جریان ۰/۵ تا ۲/۵ آمپر، زمان‌های واکنش ۲۰ تا ۶۰ دقیقه و pH برابر ۴



شکل ۵- رابطه pH با کارایی حذف رنگ و COD در شدت جریان ۱/۵ آمپر و زمان واکنش ۲۰ تا ۶۰ دقیقه



شکل ۶- تغییرات pH بعد از فرایند انعقاد الکتریکی در شدت جریان ۱/۵ آمپر و زمان‌های تماس مختلف

۳-۱- اثر شدت جریان الکتریکی و زمان واکنش بر کارایی فرایند

ابتدا فرایند انعقاد الکتریکی در pH طبیعی فاضلاب معادل ۴ در شدت جریان‌های ۰/۵ تا ۲/۵ آمپر و زمان واکنش ۲۰ تا ۶۰ دقیقه انجام گردید. ارتباط کارایی حذف رنگ و COD با افزایش شدت جریان الکتریکی و زمان واکنش در شکلهای ۲ و ۳ ارائه شده است. نتایج نشان داد که با افزایش شدت جریان الکتریکی در هر زمان از واکنش، کارایی حذف رنگ و COD افزایش می‌یابد. به‌طوری که در زمان ۲۰ دقیقه در شدت جریان الکتریکی ۲/۵ آمپر، ۷۸ درصد از رنگ و ۷۰ درصد از COD و در همان زمان در شدت جریان الکتریکی ۰/۵ آمپر ۴۲ درصد از رنگ و ۲۸ درصد از COD حذف شد. از طرفی نتایج نشان داد که در شدت جریان الکتریکی بالاتر، فرایند تصفیه سریع‌تر انجام می‌شود و همان‌طور که شدت جریان افزایش می‌یابد، زمان لازم برای رسیدن به کارایی مشابه کاهش می‌یابد. به‌عنوان مثال برای حذف تقریباً ۷۰ درصد از رنگ و COD در شدت جریان ۱/۵ آمپر تنها ۲۰ دقیقه زمان لازم است، درحالی که در شدت جریان ۰/۵ آمپر، ۶۰ دقیقه زمان لازم است.

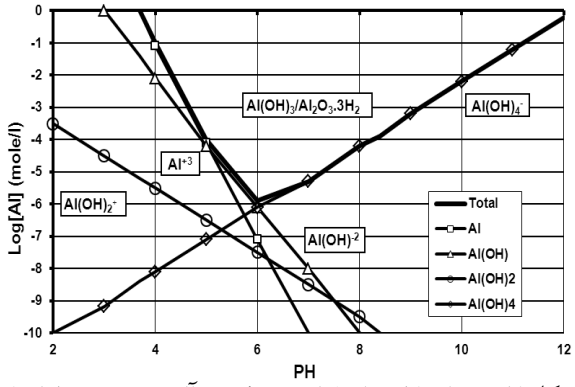
کیتکیاو و همکاران[1] نیز در مطالعات خود به‌منظور حذف رنگ از فاضلاب صنعت نساجی به این نتیجه رسیده‌اند که کارایی فرایند با افزایش شدت جریان و زمان واکنش رابطه مستقیم دارد و در شدت جریان ۱/۵ آمپر، ۹۲/۵ درصد از رنگ و ۴۵/۹۰ درصد از COD را در زمان واکنش ۶۰ دقیقه حذف نموده‌اند[۲۸]. در مطالعه جعفرزاده و دانشور که با الکترودهای آهن در دانسیته جریان A/m^2 ۹۰-۸۰ انجام گردیده است، راندمان حذف رنگ و COD به‌ترتیب ۹۴ و ۸۲ درصد بعد از ۸ دقیقه زمان الکترولیز بوده است[۲۵]. مطالعه کوبیا و همکاران به‌منظور حذف رنگ نارنجی لاوافیکس[2] از محلول آبی به‌روش انعقاد الکتریکی با الکترودهای آلومینیوم نشان می‌دهد که پارامترهای عملیاتی واکنش در شرایط بهینه شامل دانسیته جریان A/m^2 ۱۰۰، زمان الکترولیز ۱۲ دقیقه و pH برابر ۶/۴، قادر است ۹۵ درصد از رنگ را حذف نماید[۲].

کارایی حذف رنگ و COD به میزان تولید یون‌های آلومینیوم بستگی دارد که این میزان مطابق با قانون فارادی به شدت جریان کاربردی و زمان الکترولیز وابسته است[۱]. هنگامی که یکی از ۲ پارامتر افزایش می‌یابد تراکم عوامل منعقدکننده نیز افزایش می‌یابد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که کارایی بالاتر حذف رنگ در زمان طولانی و پتانسیل بالاتر مشاهده می‌شود[۹]. از این رو افزایش بازده حذف رنگ با افزایش شدت جریان الکتریکی را می‌توان به افزایش پتانسیل انجام واکنش الکترود نسبت داد[۲۶]. به‌گونه‌ای که در مطالعه حاضر در شدت جریان ۲/۵ آمپر و زمان واکنش ۶۰ دقیقه، بالاترین کارایی حذف رنگ یعنی ۹۷ درصد و COD یعنی ۸۸ درصد، حاصل شد. اما همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده است با افزایش شدت جریان الکتریکی و زمان واکنش، مصرف انرژی نیز افزایش می‌یابد، به‌گونه‌ای که در زمان واکنش ۶۰ دقیقه و شدت جریان‌های ۰/۵، ۱/۵ و ۲/۵ آمپر، مصرف انرژی به‌ترتیب Kwh/m^3 ۵/۱۳، ۳۷/۵ و ۶۵/۶۲ بود. بنابراین به‌منظور جلوگیری از افزایش مصرف انرژی، شدت جریان ۱/۵ آمپر به‌عنوان مقدار بهینه انتخاب شد.

۳-۲- اثر pH بر کارایی فرایند

مطالعات نشان داد که pH اولیه محلول مهم‌ترین فاکتور در عملیات رنگ‌زدایی توسط روش انعقاد الکتریکی است. شکل ۵ تأثیر pH بر کارایی فرایند را با توجه به زمان واکنش در شدت جریان الکتریکی ثابت ۱/۵ آمپر نشان می‌دهد. همان‌گونه که در نمودار نیز مشاهده می‌شود، افزایش pH از ۴ به ۷ منجر به کاهش و از ۷ به ۹ منجر به افزایش کارایی فرایند گردید، به‌گونه‌ای که در زمان واکنش ۲۰ دقیقه، ۷۱ درصد از رنگ در pH برابر ۴، ۴۴ درصد در pH برابر ۷ و ۴۶ درصد در pH برابر ۹ حذف شد و کارایی حذف COD نیز به‌ترتیب ۶۹، ۳۱ و ۴۶ درصد بود. با توجه به نتایج حاصل از مطالعات می‌توان گفت که فرایند انعقاد الکتریکی با الکترود آلومینیوم در pH اسیدی (pH برابر ۴) که pH طبیعی فاضلاب است، مؤثرتر است.

تغییرات کارایی فرایند در اثر تغییرات pH به ماهیت واکنش بین یون‌های آلومینیوم و هیدروکسید وابسته است. گونه‌های هیدروکسید آلومینیوم مطابق با pH محلول متفاوت است[۲]. هنگامی که pH مطالعه بین ۴ تا ۹ باشد، یون‌های Al^{3+} و OH^-، گونه‌های متنوع مونومریک مانند $Al(OH)_2^+$ و $Al(OH)_2^{2+}$ و گونه‌های پلیمریک مانند $Al_6(OH)_{15}^{3+}$ و $Al_7(OH)_{17}^{4+}$ و $Al_{13}(OH)_{34}^{5+}$ را تولید می‌کنند که سرانجام به $Al(OH)_{3(s)}$ غیرمتبلور نامحلول از طریق کنتیک‌های ترسیب/پلیمریزاسیون تغییر شکل می‌دهند[۲۹]. لخته‌های $Al(OH)_3$ مساحت سطحی بزرگ‌تری دارند که برای جذب ترکیبات آلی محلول و به دام انداختن ذرات کلوئیدی مفیدند[۹]. بنابراین همان‌طور که در شکل ۷ نشان داده شده است، در pH اولیه ۴ احتمالاً تراکم عوامل منعقد کننده مؤثر مانند $Al(OH)_2^+$ و $Al(OH)_3$ بیشتر است که منجر به کارایی بالاتر فرایند گردیده است. در pH برابر ۷، کارایی حذف آلاینده‌ها پایین‌تر است و آن می‌تواند به‌دلیل تراکم کمتر عوامل منعقد کننده و یا احتمالاً به‌علت تشکیل $Al(OH)_4^-$ محلول از $Al(OH)_3$ باشد، که ظرفیت رنگ‌زدایی کمی دارد و کارایی فرایند را کاهش می‌دهد[۳۰].



شکل ۷- نمودار قابلیت انحلال هیدروکسید آلومینیوم در محلول با توجه به pH [۹]

افزایش مجدد کارایی حذف رنگ در pH برابر ۹ نیز می‌تواند به‌دلیل تولید انواع مختلفی از گونه‌های منعقد کننده مؤثر باشد که منجر به افزایش کارایی فرایند نسبت به pH برابر ۷ شده است.

این نتایج مطابق با نتایج آلاتون و همکاران[3] بود که بالاترین

[1] Kitkaew et al.
[2] Lavafix
[3] Alaton et al.

کارایی حذف رنگ یعنی ۹۰-۸۰ درصد را در pH اسیدی (pH برابر ۳ تا ۵) گزارش داده‌اند[۳۱]. کوبیا و همکاران نیز نشان داده‌اند که بالاترین راندمان حذف رنگ در شرایط اسیدی حاصل شده است، به‌طوری که در pH برابر ۳ با استفاده از الکترودهای آلومینیومی بالاترین راندمان یعنی ۹۹/۹ درصد را گزارش نموده‌اند[۲]. مطالعه رحمانی و سمرقندی در تصفیه پسابهای رنگی به‌روش انعقاد الکتریکی با الکترود آلومینیوم نیز نشان می‌دهد که حداکثر کارایی حذف رنگ به میزان ۸۶ درصد در pH برابر ۳/۵ حاصل شده است که با نتایج این تحقیق همخوانی دارد[۲۶].

تغییرات pH فاضلاب بعد از فرایند انعقاد الکتریکی نیز در شدت جریان الکتریکی ۱/۵ آمپر و زمان واکنش ۲۰ تا ۶۰ دقیقه در شکل ۶ نشان داده شده است. شکل ۷ بیانگر افزایش pH در محیط اسیدی (pH برابر ۴) است که می‌تواند به‌دلیل تولید تدریجی گاز هیدروژن در اطراف الکترود کاتد و تشکیل یون OH^- باشد[۱].

در محیط خنثی نیز pH فاضلاب افزایش یافت، اما این افزایش pH چندان محسوس نبود. تغییرات کم pH ناشی از این حقیقت است که پدیده قلیایی شدن با اسیدی شدن جبران می‌شود[۳۲]. در محیط قلیایی (pH برابر ۹) یک افت کم pH مشاهده شد. افت pH در شرایط قلیایی به تشکیل $Al(OH)_3$ در اطراف الکترود آند مربوط است که باعث آزاد شدن H^+ شده و pH را کاهش می‌دهد و یا در بعضی از مواقع می‌تواند ناشی از تشکیل رسوبات هیدروکسید سایر کاتیون‌ها باشد که قلیاییت را مصرف می‌کنند[۳۳].

از آنجایی که افزایش pH هنگامی رخ می‌دهد که pH اسیدی است و کاهش pH هنگامی رخ می‌دهد که pH قلیایی است، می‌توان گفت که فرایند EC با استفاده از الکترود آلومینیوم به‌صورت یک خنثی کننده pH عمل می‌کند و پساب حاصل از فرایند EC بدون نیاز به افزودن مواد شیمیایی به‌منظور خنثی‌سازی قابل دفع است.

۴- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر کاربرد فرایند انعقاد الکتریکی به‌منظور کاهش رنگ و COD فاضلاب نساجی پلی آکریلیک مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج حاصل از بررسی اثر پارامترهای عملیاتی بر میزان کارایی فرایند نشان داد که pH محلول، شدت جریان الکتریکی و زمان واکنش از پارامترهای مؤثر بر کارایی حذف رنگ و COD هستند. شرایط عملیاتی بهینه به‌منظور دستیابی به بیشترین کارایی حذف و همچنین اجتناب از مصرف بالای انرژی در pH طبیعی فاضلاب (pH برابر ۴)، شدت جریان الکتریکی ۱/۵ آمپر و در زمان واکنش ۶۰ دقیقه حاصل شد که در آن، کارایی حذف رنگ و COD به‌ترتیب ۸۶ و ۸۵ درصد بود. مطابق با استاندارد ملی تخلیه پساب به محیط زیست، رنگ فاضلاب خروجی باید به‌گونه‌ای باشد که ظواهر طبیعی آبهای پذیرنده و محل تخلیه را به‌طور محسوس تغییر ندهد و حداکثر میزان COD پساب خروجی باید ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر باشد تا تنها برای مصارف کشاورزی قابل استفاده باشد. لذا نتایج حاصل از مطالعه نشان داد که فاضلاب تصفیه شده به‌روش انعقاد الکتریکی با الکترود آلومینیوم قابلیت تخلیه به محیط زیست را دارد. در مجموع با توجه به نتایج حاصل شده می‌توان اظهار داشت که این فرایند می‌تواند به‌عنوان یک روش سازگار با محیط زیست در تصفیه پسابهای رنگی مخصوصاً به‌منظور کاهش غلظت آلاینده‌ها و آمادگی آن برای ورود به سایر واحدهای تصفیه مانند واحد بیولوژیکی مطرح شود.

۵- قدردانی

با توجه به اینکه موضوع تحقیق در قالب طرح تحقیقاتی دانشجویان ارشد به شماره ۷۷۲۶-۸۵-۰۱-۱۳۹۰ دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی مصوب گردید و در کلیه مراحل آزمایشگاهی آن از امکانات آزمایشگاه آب و فاضلاب دانشکده بهداشت دانشگاه علوم پزشکی استفاده شد، به این وسیله نویسندگان این مقاله از معاونت محترم پژوهشی دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی و پرسنل آزمایشگاه مذکور تشکر و قدردانی می‌نمایند.

۶- مراجع

1- Zaied, M., and Bellakhal, N. (2009). "Electrocoagulation treatment of black liquor from paper industry." *J. of Hazardous Materials*, 163, 995-1000.

2- Kobya, M., Demirbas, E., Can, O.T., and Bayramoglu, M. (2006). "Treatment of levafix orange textile dye solution by electrocoagulation." *J. of Hazardous Materials*, 132,183-188.

3- Zin, N.S.B. (2005). "Decolourisation of dye solution containing azo acid orange 7 by electricity." M.Sc. Thesis, Malaysia Technology University, Malaysia.

4- Daneshvar, N., Ashassi-Sorkhabi, H., and Tizpar, A. (2003). "Decolorization of orange II by electro coagulation method." *J. of Separation and Purification Technology*, 31,153-162.

5- Diez, M.C., Mora, M.L., and Videla, S. (1999). "Adsorption of phenolic compounds and color from bleached Kraft mill effluent allophonic compounds." *J. of Water Research*, 33(1), 125-130.

6- Clark, T., Bruce, M., and Anderson, S. (1994). "Decolarization of extraction stage bleach plant effluent by combined hypochlorite oxidation and anaerobic treatment." *J. of Water Science and Technology*, 29(5-6), 421-432.
7- Kobya, M., Can, O.T., and Bayramoglu, M. (2003). "Treatment of textile wastewaters by electrocoagulation using iron and aluminum electrodes." *J. of Hazardous Materials*, 100, 163-178.
8- Vlyssides, A.G., Papaioannou, D., Loizidoy, M., Karlis, P.K., and Zorpas, A.A. (2000). "Testing an electrochemical method for treatment of textile dye wastewater." *J. of Waste Management*, 20, 569-574.
9- Aoudj, S., Khelifa, A., Drouicage, N., Hecini, M., and Hamitouche, H. (2010). "Electrocoagulation process applied to wastewater containing dyes from textile industry." *J. of Chemical Engineering and Processing*, 49, 1176-1182.
10- Alinasafi, A., Khemis, M., Pons, M.N., Leclerc, J.P., Yaacoubi, A., Benhammou, A., and Nejmeddine, A. (2005). "Electrocoagulation of reactive textile dyes and textile wastewater." *J. of Chemical Engineering and Processing*, 44, 461-470.
11- Kilic, M.G.A. (2004). "Parametric comparative study of electrocoagulation and coagulation of aqueous suspensions of kaolinite and quartz powders." M.Sc. Thesis, University of Mahidol, Bangkok, Thailand.
12- Yousuf, M., Mollah, A., and Schennach, R. (2001). "Electrocoagulation (EC)-science and applications."*J. of Hazardous Material*, 86, 29-41.
13- Sridhar, R., Sivakumar, V., Immanuel, V.P., and Maran, J.P. (2011). "Treatment of pulp and paper industry bleaching effluent by electrocoagulation process." *J. of Hazardous Materials*, 186(2-3), 1495-1502.
14- Hanafi, F., Assobhei, O., and Mountadar, M. (2010). "Detoxification and discoloration of Moroccan olive mill wastewater by electrocoagulation." *J. of Hazardous Material*, 174(1-3), 807-812.
15- Wei, F.J., Bing, S.Y., Zheng, Z., Biao Z.J., Shu, L., and Chun T.Y. (2007). "Treatment of tannery wastewater by electrocoagulation." *J. of Environmental Sciences*, 19, 1409-1415.
16 - Pouet, M.F., and Grasmick, A. (1995). "Urban wastewater treatment by electrocoagulation and flotation." *J. of Water Sci*. Technol., 31, 275-283.
17- Adhoum, N., Monser, L., Bellakhal, N., and Belgaied, J.E. (2004). "Treatment of electroplating wastewater containing Cu^{2+}, Zn^{2+} and Cr(VI) by electrocoagulation." *J. of Hazardous Materials*, 112, 207-213.
18- Wang, C.T., Chou, W.L., and Kuo, Y.M. (2009). "Removal of COD from laundry wastewater by electrocoagulation/electroflotation." *J. of Hazardous Material*, 164, 81-86.
19- Beck, E.C., Giannini, A.P., and Ramirez, E.R. (1974). "Electrocoagulation clarifies food wastewater." *J. of Food Technol.*, 22, 18-19.
20- Koparal, A.S., and Ogutveren, U.B., (2002). "Removal of nitrate from water by electroreduction and electrocoagulation." *J. of Hazardous Materials*, 89, 83-94.
21- Bensadok, K., Belkacem, M., and Nezzal, G. (2007). "Treatment of cutting oil/water emulsion by coupling coagulation and dissolved air flotation." *J. of Desalination*, 206, 440-448.
22- Chen, X., Chen, G., and Yue, P.L. (2000). "Separation of pollutants from restaurant wastewater by electrocoagulation." *J. of Sep. Purif. Technol*., 19, 65-76.
23- Kobya, M., Hiz, H., Senturk, E., Aydiner, C., and Demirbas, E. (2006). "Treatment of potato chips manufacturing wastewater by electrocoagulation". *J. of Desalination*, 190, 201-211.
24- Ilhan, F., Kurt, U., Apaydin, O., and Gonullu M.T. (2007). "Treatment of leachate by electrocoagulation using aluminum and iron electrodes." *J. of Hazardous Material*, 154(1-3), 381-389.
25- Djafarzadeh, N., and Daneshvar, N. (2006). "Treatment of textile wastewater containing basic dyes by electrocoagulation process." *J. of Water and Wastewater*, 57, 22-29. (In Persian)

26- Rahmani, A.R., and Samarghandi, M.R. (2009). "Electrocoagulation treatment of color solution containing colored index Eriochrome Black T." *J. of Water and Wastewater*, 69, 52-58. (In Persian)
27- APHA. (1998). *Standard methods for the examination of water and wastewater*, 20th Ed., American Public Health Association, Washington D.C.
28- Kitkaew, D. (2004). "Color removal from textile wastewater by electrochemical process." M.Sc. Thesis, School University of Mahidol, Bangkok, Thailand.
29- Merzouk, B., Gourich, B., Sekki, A., Madani, K.,Vial, Ch., and Barkaoui, M. (2009)."Studies on the decolorization of textile dye wastewater by continuous electrocoagulation process." *J. of Chemical Engineering*, 149, 207-214.
30- Cerqueira, A., Russo, C., and Marques, M.R.C. (2009). "Electroflocculation for textile wastewater treatment." *J. of Chemical Engineering*, 26(4), 659-668.
31- Alaton, I.A., Kabdasli, I., Vardar, B., and Tunay, O. (2009). "Electrocoagulation of simulated reactive dyebath effluent with aluminum and stainless steel electrodes." *J. of Hazardous Materials*, 164, 1586-1594.
32- Mouedhen, G., Feki, M., Wery, M.D.P., and Ayedi, H.F. (2008). "Behavior of aluminum electrodes in electrocoagulation process." *J. of Hazardous Materials*, 150, 124-135.
33- Ahmadi Moghadam, M., and Amiri, H. (2010). "Investigation of TOC removal from industrial wastewater using electrocoagulation process." *J. of Health and Environment*, 3(2), 186-193.