

تصفیه الکتروشیمیایی پساب حاوی مخلوط مواد رنگزای راکتیو با به کارگیری الکتروکاتد بر پایه نانولوله‌های کربنی

نادر جعفرزاده^۱

۱- استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی واحد میانه، میانه n.jafarzadeh@gmail.com

(دریافت ۹۳/۱۱/۲۳ پذیرش ۹۴/۷/۵)

چکیده

تصفیه پساب‌های حاوی مواد رنگی آلی با روش‌های متفاوتی از جمله فرایندهای اکسایش الکتروشیمیایی پیشرفته صورت می‌گیرد. فرایند الکتروفتون یکی از انواع این فرایندهاست که در آن با اعمال برق به الکتروده‌های آند و کاتد، طی واکنش‌های الکتروشیمیایی، رادیکال‌های هیدروکسیل تولید شده و با حمله به آلاینده‌ها، باعث حذف آنها می‌شوند. در این پژوهش برای اجرای فرایند الکتروفتون ابتدا الکتروکاتد کربن پارچه‌ای با نانولوله‌های کربنی اصلاح شد و در ادامه برای تصفیه محلول حاوی مخلوط مواد رنگزای راکتیو آبی ۶۹، راکتیو قرمز ۱۹۵ و راکتیو زرد ۸۴ استفاده شد. آزمایش‌های مقایسه‌ای نشان داد که کارایی الکتروکاتد اصلاح شده در حذف مواد رنگزای بهتر از کاتد کربن پارچه‌ای است. برای ۵۰۰ میلی‌لیتر از مخلوط مواد رنگزای با غلظت ۵۰ میلی‌گرم در لیتر از هر کدام، حاوی الکتروولت سولفات سدیم و یون آهن سه ظرفیتی، اجرای فرایند تصفیه نشان داد، تحت شدت جریان الکتریکی ۳۰۰ میلی‌آمپر و زمان الکتروولتیز ۲۱۰ دقیقه، بهترین راندمان حذف رنگ به دست می‌آید. محاسبه میزان جریان مؤثر و انرژی الکتریکی مصرفی با توجه به اندازه‌گیری‌های COD نشان داد که در شدت جریان ۳۰۰ میلی‌آمپر و زمان ۲۱۰ دقیقه، بیشترین جریان مؤثر برقرار است و کمترین انرژی الکتریکی مصرف می‌شود. میزان معدنی شدن مواد رنگزای بعد از اجرای فرایند الکتروفتون تحت شرایط ذکر شده مشخص کرد که در محلول‌های رنگی حدود ۷۸ درصد COD اولیه حذف شده است. فرایند الکتروفتون می‌تواند برای تصفیه پساب‌های حاوی مخلوط آلاینده رنگی استفاده شود. پارامترهای مؤثر بر کارایی این فرایند نوع الکتروکاتد، شدت جریان الکتریکی و زمان الکتروولتیز است.

واژه‌های کلیدی: الکتروفتون، مواد رنگزای راکتیو، نانولوله کربنی، کاهش COD

۱- مقدمه

فرایند پراکسید هیدروژن به صورت الکتریکی در محیط اسیدی از احیای گاز اکسیژن موجود در محیط و یا دمیده شده به سطح الکتروکاتد با اعمال پتانسیل الکتریکی مناسب در محل تولید می‌شود [۲-۶]



پراکسید هیدروژن اگر چه یک اکسنده قوی است، اما به تنهایی قادر به تخریب و اکسید کردن مطلوب آلاینده‌های آلی نیست. اما توان قدرت اکسندگی آن با اضافه شدن یون Fe^{2+} در محیط‌های اسیدی طی واکنش زیر، افزایش می‌یابد



یکی از مزایای عمده الکتروفتون این است که یون‌های Fe^{3+} تولید شده می‌توانند در سطح کاتد به‌طور هم‌زمان با تولید H_2O_2 به Fe^{2+} احیا شده و باعث افزایش کارایی این روش شوند



مهم‌ترین مواد شیمیایی مورد مصرف در جهان مواد رنگزای سنتزی است که در صنایعی مانند نساجی و رنگرزی، چرم‌سازی، تولید کاغذ، صنایع غذایی و غیره کاربرد گسترده‌ای دارند. سالانه در حدود ده هزار ماده رنگزای آلی مصنوعی با مقدار تقریبی 7×10^5 تن در جهان تولید و در بخش‌های مختلف به مصرف می‌رسد که در نهایت باعث ایجاد حجم بالایی از پساب‌های رنگی می‌شود. این پساب‌ها با جذب نور و تحت تأثیر قرار دادن فرایندهای بیولوژیکی در محیط‌های آبی، باعث ایجاد اثرات نامطلوبی در فرایند فتوسنتز گیاهان می‌شوند. بنابراین ضروری است کلیه پساب‌های رنگی قبل از تخلیه به محیط زیست تصفیه شوند، که امروزه یکی از روش‌های پیشرفته تصفیه آنها، به‌کارگیری فرایندهای اکسایش الکتروشیمیایی پیشرفته است [۱]. این فرایندها سازگار با محیط زیست‌اند، زیرا در آنها رادیکال‌های هیدروکسیل به‌عنوان عامل اکسنده قوی در محل تولید و مصرف می‌شود. فرایند الکتروفتون، یکی از روش‌های مؤثر برای حذف آلاینده‌های آلی مقاوم در پساب‌ها است. در این

اصلاح شده با نانولوله‌های کربنی به‌عنوان کاتد مورد مطالعه و ارزیابی قرار گرفت.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مواد

تجهیزات اصلی استفاده شده در این پژوهش شامل دستگاه اسپکتروفوتومتر تک شعاعی UV-Vis محصول کمپانی هج^۱ آمریکا، میکروسکوپ الکترونی روبشی VEGA SEM, Tescan, Czech^۲، اتولب کنترل شده با کامپیوتر^۳ و منبع تغذیه^۴ است.

۲-۲- مواد رنگزای استفاده شده

مواد رنگزای راکتیو قرمز ۱۹۵ (RR195)، راکتیو آبی ۶۹ (RB69) و راکتیو زرد ۸۴ (RY84) محصول کمپانی Ciba-Geigy سوئیس با خلوص بالای ۹۹ درصد و به‌صورت پودر تجاری استفاده شد. در جدول ۱ مشخصات کلی این مواد رنگزا آورده شده است. از این مواد رنگزا در کارخانه فرش و پتوی تبریز برای رنگرزی الیاف‌های فرش‌های دستباف استفاده می‌شود.

۲-۳- نحوه تهیه الکتروکاتد بر پایه CNT

الکتروکاتد کربن پارچه‌ای (CP) ساخت کمپانی Toray آمریکا تار و پودهایی از جنس الیاف کربنی دارد و در ظاهر به‌صورت پارچه معمولی است و در برابر تنش‌ها، محیط‌های اسیدی و قلیایی دارای استحکام کافی است. برای ساخت الکتروکاتد بر پایه CNT، ابتدا ترکیبی از پودر نانولوله‌های کربنی چند دیواره با ابعاد درونی: ۳ تا ۵ نانومتر و ابعاد بیرونی ۸ تا ۱۵ نانومتر، محلول ۱۰ درصد پلی‌تترافلورواتیلن (PTFE)، آب مقطر و بوتانول نرمال تهیه شد و برای همگن شدن کامل، ۲۰ دقیقه تحت امواج اولتراسونیک قرار گرفت. سپس محلول حرارت ملایم داده شد تا بیشتر آب موجود تبخیر شود و حالت خمیری به‌دست آید و در ادامه پماد خمیری به دقت در سطوح کربن پارچه‌ای مالیده شد (شکل ۱-الف) و برای تثبیت نانولوله‌های کربن و ایجاد پیوند به‌وسیله PTFE در کوره الکتریکی در دمای ۳۵۰ درجه سلسیوس به‌مدت ۳۰ دقیقه حرارت داده شد. در شکل ۱-ب تصاویر گرفته شده با میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح الکتروکاتد کربن پارچه‌ای اصلاح شده با نانولوله‌های کربنی (CP-CNT) نشان داده شده است.

واکنش آندی الکتروفنتون، اکسایش آب به اکسیژن مولکولی است، که O₂ تولیدی می‌تواند در کاتد مصرف شود



در کلیه فرایندهای الکتروشیمیایی، جنس الکترودهای مورد استفاده نقش اساسی در کارایی فرایند دارد. در فرایند الکتروفنتون، معمولاً از صفحه پلاتین و یا پلاتین مشبک و آند لایه نازک الماس دوپه شده با بور به‌عنوان الکتروکاتد استفاده شده است [۱، ۲، ۷ و ۸]. به‌عنوان الکتروکاتد نیز به‌طور معمول از مشتقات دارای کربن نظیر نمود کربنی، گرافیت صفحه‌ای گرافیت سه بعدی، الکتروکاتد کربن-پلی‌تترافلورواتیلن و کاتد فیبر کربن فعال و سایر ترکیب‌های کربنی استفاده شده است. در فرایندهای الکتروشیمیایی تصفیه، تولید پراکسید هیدروژن در سطح الکتروکاتد صورت می‌گیرد و هرچه سطح کاتد به ازای واحد جرم و حجم بیشتر باشد، کارایی الکتروکاتد بیشتر خواهد شد.

در سال‌های اخیر محققان علوم نانوفناوری با بهره‌گیری از فناوری‌های مدرن و با استفاده ترکیبات شیمیایی در مقیاس نانو، کارایی الکترودها و در نهایت کارایی فرایند را افزایش داده‌اند. نانولوله‌های کربنی از جمله ترکیبات ساده و در دسترس می‌باشند که در آنها نسبت سطح به حجم بسیار بالا است. ساخت الکتروکاتد بر پایه این مواد و استفاده از آنها به‌عنوان کاتد در فرایند الکتروفنتون باعث افزایش تولید پراکسید هیدروژن و در نتیجه افزایش تولید رادیکال هیدروکسیل و در نهایت تخریب بیشتر مواد آلاینده می‌شود. از سایر ویژگی‌های نانولوله‌های کربنی می‌توان به هدایت الکتریکی خوب، استحکام مکانیکی، بی‌اثر بودن از نظر شیمیایی در بیشتر محلول‌های الکترولیتی، سطح فعال بالا و محدوده پتانسیل وسیع قابل استفاده اشاره کرد [۲].

پژوهش‌های بسیاری در زمینه استفاده از فرایندهای الکتروشیمیایی پیشرفته به‌ویژه فرایند الکتروفنتون برای حذف آلاینده‌های مختلف آلی رنگزا از آب‌های آلوده انجام شده است [۷، ۱۱ و ۱۴]. در داخل کشور نیز پژوهش‌هایی در زمینه استفاده از فرایند الکتروفنتون انجام شده است [۳، ۵ و ۱۴]. اما با وجود این پژوهش‌ها برای حذف یک ماده رنگزا از محلول‌های آبی، پژوهش‌های اندکی بر روی حذف پساب حاوی مخلوطی از مواد رنگزا که شرایط مشابه پساب حقیقی نساجی را داشته باشد، صورت گرفته است. در پژوهش حاضر فرایند الکتروفنتون برای حذف پساب رنگی حاوی سه ماده رنگزای آلی راکتیو آبی ۶۹، راکتیو قرمز ۱۹۵ و راکتیو زرد ۸۴ با استفاده از الکتروکاتد کربن پارچه‌ای

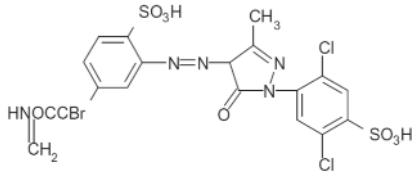
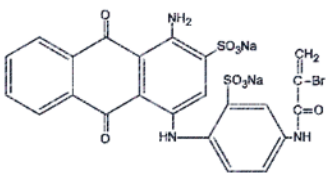
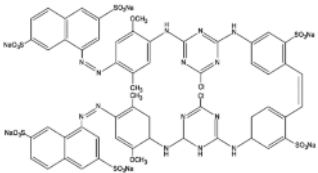
¹ DR 5000, Hach, USA

² Scanning Electron Microscope (SEM)

³ PGStat 30, Eco Chemie, Netherland

⁴ APS3005S, Atten, China

جدول ۱- مشخصات کلی مواد رنگزای آلی راکتیو

مواد رنگزا	راکتیو قرمز ۱۹۵	راکتیو آبی ۶۹	راکتیو زرد ۸۴
λ_{max} (nm)	542	610	408
ساختار شیمیایی			
فرمول مولکولی	$C_{31}H_{19}ClN_7Na_5O_{19}S_6$	$C_{23}H_{14}BrN_3Na_2O_9S_2$	$C_{56}H_{38}Cl_2N_{14}Na_6O_{20}S_6$
طبقه بندی شیمیایی	مونوآزو	آنتروکینون	دی آزو
کمیت	$LD_{50} > 2000$ (mg/kg)	$LD_{50} > 1000$ (mg/kg)	$LD_{50} > 100$ (mg/kg)

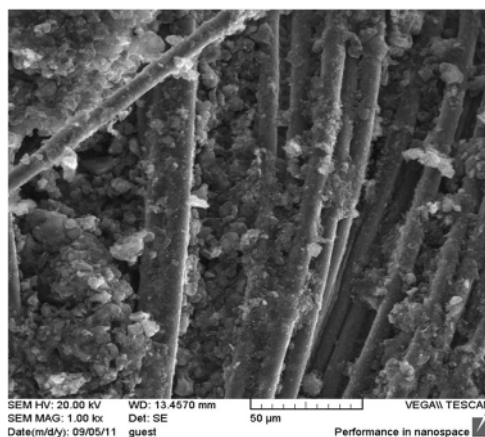
۲-۴- روش اجرای آزمایش‌ها و اندازه‌گیری غلظت آلاینده‌ها

سیستم الکتروفنتون شامل یک منبع تغذیه DC، سل الکتروشیمیایی به حجم ۱۰۰۰ میلی‌لیتر، سیم‌های رابط، پمپ هوا، همزن مغناطیسی، الکتروود صفحه پلاتین با مساحت ۴۰ سانتی‌متر مربع به‌عنوان آند و الکتروود CP-CNT با مساحت ۵۰ سانتی‌متر مربع به‌عنوان کاتد است. برای هر آزمایش ۵۰۰ میلی‌لیتر از مخلوط مواد رنگزا با غلظت هر کدام ۵۰ میلی‌گرم در لیتر، الکتروولیت Na_2SO_4 با غلظت ۰/۰۵ مولار و یون Fe^{+3} با غلظت ۰/۱۵ میلی‌مولار تهیه و pH محیط در حدود ۳ تنظیم شد. سپس الکتروودها در داخل محلول قرار داده شد و محلول به‌وسیله همزن مغناطیسی به‌طور یکنواخت با سرعت ۱۰۰ دور در دقیقه همزده شده و دمش هوا به داخل محلول با سرعت ثابت صورت گرفت.

با اعمال شدت جریان ثابت، فرایند الکتروولیز شروع شد و تا مدت زمان معین ادامه پیدا کرد. در نهایت، اعمال جریان و هوادهی متوقف شد و از محلول برای ارزیابی فرایند نمونه‌برداری شد. اندازه‌گیری‌ها با گرفتن طیف جذبی UV-Vis و میزان معدنی شدن مواد رنگزا با اندازه‌گیری COD بعد از اجرای فرایند صورت گرفت. وقتی که در محلول آبی فقط یک ماده رنگزا وجود دارد، با اندازه‌گیری جذب در طول موج بیشینه (λ_{max}) غلظت با کمک رابطه بیرلامبرت و رسم نمودار کالیبراسیون به‌دست می‌آید. اما در این کار پژوهشی از ترکیب سه ماده رنگزا استفاده شد و طیف جذبی به‌دست آمده مجموع طیف جذبی سه ماده رنگزا بود (شکل ۲). بنابراین امکان اندازه‌گیری غلظت مواد رنگزا با روش معمول وجود نداشت و فقط کاهش شدت طیف‌های جذبی میزان حذف آلاینده‌ها را نشان داد.



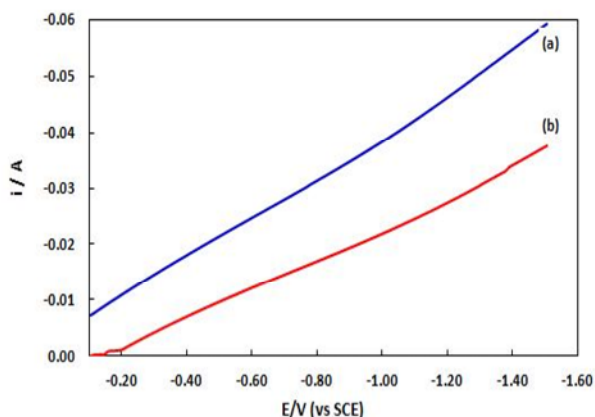
(الف)



(ب)

شکل ۱- الف) نحوه اصلاح سطح الکتروود با نانولوله‌های کربنی و ب) تصویر SEM الکتروود CP-CNT

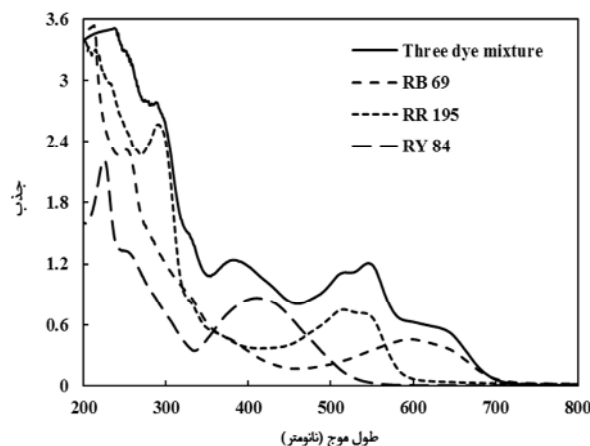
همچنین افزایش جریان کاتدی برای الکتروود CP-CNT (منحنی a) بیشتر از الکتروود CP بوده و با شیب تند و ثابتی صورت گرفت. این امر ناشی از مقاومت الکتریکی پایین الکتروود CP-CNT و توانایی بیشتر آن در احیای اکسیژن محلول موجود در محیط است. بنابراین می توان گفت کارایی الکتروود CP-CNT در تولید الکتروشیمیایی پراکسید هیدروژن بیشتر است و این امر باعث می شود در نهایت رادیکال های هیدروکسیل بیشتری نسبت به الکتروود CP تولید شود.



شکل ۳- منحنی پلاریزاسیون کاتدی: (a) CP-CNT و (b) CP (سرعت روبش = ۵۰ mVs⁻¹, [Na₂SO₄] = ۰/۰۵ M, pH=۳)

۳-۲- کارایی الکترودهای کاتد در میزان تصفیه پساب

در فرایندهای الکتروشیمیایی تصفیه پساب خصوصاً فرایند الکتروفنتون، نوع و کیفیت الکتروود کاتد نقش اساسی و مهم در میزان و چگونگی تولید عوامل تخریب کننده مواد آلی رنگزا (رادیکال های فعال هیدروکسیل) دارد [۱۱]. برای مقایسه کارایی فرایند الکتروفنتون در حین استفاده از الکتروود کاتد CP و یا CP-CNT، پسابی با غلظت ۵۰ میلی گرم در لیتر از هر سه ماده رنگزا تهیه شد و طی دو آزمایش با شدت جریان ۳۰۰ میلی آمپر و مدت زمان ۲۱۰ دقیقه و سایر شرایط یکسان مورد تصفیه قرار گرفت. بعد از اتمام کار با گرفتن طیف جذبی UV-Vis از محلول تصفیه شده، نتایج مطابق شکل ۴ به دست آمد. با توجه به نتایج حاصل، طیف جذبی محلول های بعد از تصفیه نسبت به طیف جذبی محلول رنگی قبل از تصفیه دارای کاهش قابل ملاحظه ای بود، همچنین میزان کاهش طیف جذبی در حین استفاده از الکتروود کاتد CP-CNT بیشتر از فرایند تصفیه ای بود که در آن الکتروود کاتد CP استفاده شد. بنابراین می توان گفت که کارایی الکتروود کاتد CP-CNT در این فرایند بیشتر از کاتد CP برای تصفیه پساب حاوی مخلوط مواد رنگزا است. در کارهای پژوهشی انجام گرفته قبلی نیز



شکل ۲- طیف جذبی سه ماده رنگزا به صورت مجزا و مخلوط (غلظت هر کدام ۵۰ میلی گرم در لیتر)

برای بررسی میزان تخریب مواد رنگزا در محلول های رنگی و تبدیل شدن به ترکیب های معدنی، کاهش COD صورت گرفت [۱۵]. معادله مورد استفاده برای محاسبه درصد کاهش COD محلول های رنگی بعد از فرایند الکتروفنتون عبارت است از

$$\text{COD decay (\%)} = \frac{\text{COD}_0 - \text{COD}_t}{\text{COD}_0} \times 100 \quad (5)$$

که در آن

COD₀ میزان COD اولیه محلول قبل از حذف رنگ و COD_t میزان آن بعد از فرایند الکتروفنتون است.

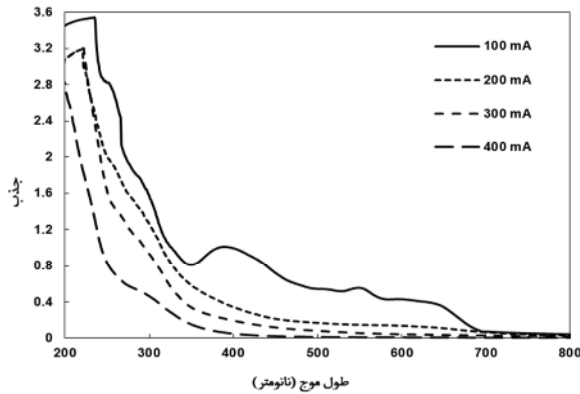
۳- نتایج و بحث

۳-۱- رفتار الکتروشیمیایی الکترودهای به کار رفته

در ابتدا، رفتار الکتروشیمیایی الکترودهای CP و CP-CNT با رسم منحنی پلاریزاسیون کاتدی (LSV) آنها مورد مطالعه قرار گرفت و نتایج مطابق شکل ۳ به دست آمد. در رسم این منحنی ها، الکتروود پلاتین به عنوان آنود، الکتروود کالومل به عنوان الکتروود شاهد و الکترودهای CP و CP-CNT به عنوان کاتد مورد استفاده قرار گرفتند. همان گونه که در شکل مشاهده می شود، جریان کاتدی از پتانسیل حدود ۰/۲- ولت شروع به افزایش می کند که مربوط به کاهش اکسیژن و تشکیل پراکسید هیدروژن از طریق واکنش زیر است



جریان بهینه برای حذف مخلوط مواد رنگزا در نظر گرفته شد. مقایسه نتایج این بخش با سایر پژوهش‌ها مشخص می‌کند که در شرایط مشابه برای تصفیه پساب‌های سنتتیک، با شدت جریان‌های ۲۰۰ تا ۴۰۰ میلی‌آمپر، بیشترین راندمان حذف مواد رنگزا به دست آمده است [۲ و ۶].



شکل ۵- طیف جذبی مخلوط مواد رنگزا بعد از اعمال شدت جریان‌های متفاوت

۳-۴- برآورد جریان مؤثر^۱ و انرژی الکتریکی مصرفی نسبت به زمان الکترولیز

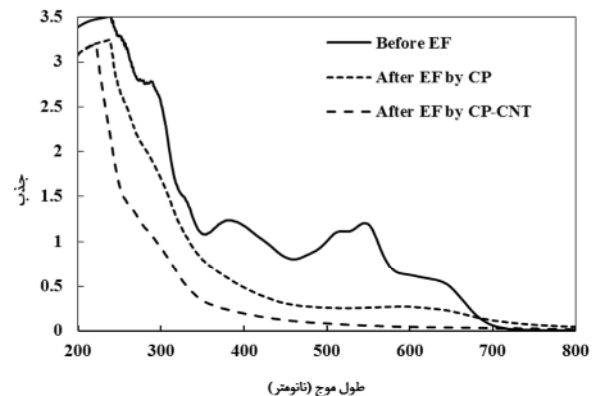
میزان انرژی الکتریکی مصرفی در فرایندهای الکتروشیمیایی صنعت تصفیه پساب‌ها از لحاظ اقتصادی مهم و تأثیرگذار است. پارامتر جریان مؤثر، نمادی از میزان معدنی شدن مواد آلی به ازای مصرف مقدار مشخصی از انرژی الکتریکی در مدت زمان معین بوده و مطابق رابطه ۶ قابل محاسبه است [۲ و ۷].

$$\text{Current Efficiency}(\%) = \frac{(\text{COD}_0 - \text{COD}_t)F \cdot V_s}{8I \cdot t_{\text{EF}}} \times 100 \quad (7)$$

که در این رابطه

COD_0 و COD_t به ترتیب میزان اکسیژن مورد نیاز شیمیایی محلول رنگی قبل و بعد از الکتروفتون بر حسب گرم اکسیژن بر دسی مترمکعب، F عدد فارادی برابر ۹۶۴۸۷ کولن بر مول، V_s حجم محلول آزمایشی بر حسب دسی مترمکعب، I شدت جریان اعمال شده بر حسب آمپر، t_{EF} زمان الکترولیز بر حسب ثانیه و عدد ثابت ۸ گرم اکی والان اکسیژن بر حسب گرم بر اکی والان است. نتایج به دست آمده از محاسبه جریان مؤثر نشان می‌دهد، در مدت زمان ۲۱۰ دقیقه از زمان الکترولیز، بیشترین جریان مؤثر برای تخریب مواد رنگزا در سیستم الکتروفتون اعمال شده است (شکل ۶).

الکترودهای اصلاح شده با نانولوله‌های کربنی کارایی بهتری در حذف مواد آلی رنگزا و یا سایر آلودگی‌ها از خود نشان داده‌اند [۲]. همچنین برای دو محلول تصفیه شده در شرایط یکسان در حین استفاده از کاتد CP، مقدار COD به میزان ۵۷ درصد کاهش یافت و با کاتد CP-CNT درصد حذف به ۷۸ درصد رسید. بنابراین با توجه به کارایی بهتر الکترودهای اصلاح شده، در ادامه آزمایش‌های تصفیه پساب فقط از الکترودهای کاتد CP-CNT استفاده شد.



شکل ۴- طیفی جذبی مخلوط مواد رنگزا قبل و بعد از فرایند الکتروفتون با کاتدهای CP و CP-CNT

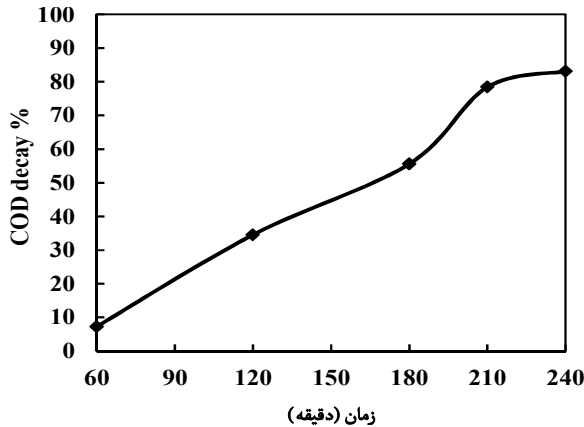
۳-۳- تأثیر شدت جریان الکتریکی اعمالی

در کلیه فرایندهای الکتروشیمیایی برای تصفیه پساب، شدت جریان اعمال شده به سل الکتروشیمیایی تأثیر مستقیم در میزان تولید رادیکال‌های فعال هیدروکسیل دارد [۱]. برای بررسی تأثیر این پارامتر، محلول‌های رنگی با مشخصات ذکر شده در بخش آزمایش‌ها، آماده شد و در مدت زمان ۲۱۰ دقیقه با اعمال شدت جریان‌های ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ میلی‌آمپر با الکترودهای CP-CNT مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج به دست آمده در شکل ۵ ارائه شده است.

با توجه به شکل ۵، با اعمال شدت جریان ۱۰۰ میلی‌آمپر، کاهش چندانی در طیف جذبی محلول تصفیه شده دیده نمی‌شود، ولی افزایش شدت جریان به ۲۰۰ میلی‌آمپر و بالاتر، باعث کاهش قابل ملاحظه ارتفاع طیف‌های جذبی UV-Vis مواد رنگزا شده است. به عبارتی افزایش جریان، تأثیر مستقیم در میزان حذف بیشتر مواد رنگزای آلی دارد. مطابق شکل ۵ افزایش شدت جریان از ۳۰۰ به ۴۰۰ میلی‌آمپر تأثیر زیادی در کاهش ارتفاع طیف جذبی UV-Vis نداشته است، بنابراین برای جلوگیری از مصرف انرژی بیشتر، شدت جریان ۳۰۰ میلی‌آمپر به عنوان شدت

^۱ Current Efficiency

میزان ۷۸ درصد رسید. بعد از آن، افزایش قابل ملاحظه‌ای مشاهده نشد و در زمان ۲۴۰ دقیقه به ۸۳ درصد رسید. بنابراین انتخاب زمان ۲۱۰ دقیقه به‌عنوان زمان واکنش از نظر اقتصادی مقرون به صرفه است.



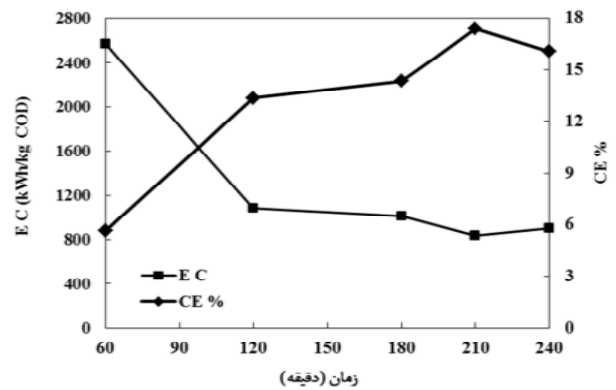
شکل ۷- تأثیر زمان کنترولیز در میزان کاهش COD محلول حاوی مواد رنگزا

۴- نتیجه‌گیری

فرایند الکتروشیمیایی الکتروفنتون با به‌کارگیری الکتروود کاتد بر پایه کربن پارچه‌ای، به‌صورت مؤثر قادر به تصفیه پساب رنگی سنتتیک حاوی چندین ماده آلاینده رنگزای راکتیو است. نتایج نشان داد برای ۵۰۰ میلی‌لیتر از مخلوط مواد رنگزا با غلظت هر کدام ۵۰ میلی‌گرم در لیتر، اجرای فرایند تصفیه با الکتروود کاتد کربن پارچه‌ای اصلاح شده با نانولوله‌های کربنی، تحت شدت جریان الکتریکی ۳۰۰ میلی‌آمپر و زمان کنترولیز ۲۱۰ دقیقه بهترین راندمان حذف رنگ با برقراری بیشترین جریان مؤثر و کمترین انرژی الکتریکی به‌دست می‌آید. همچنین ۷۸ درصد از COD اولیه پساب حاوی مواد رنگزا بعد از اجرای فرایند الکتروفنتون تحت شرایط ذکر شده کاسته می‌شود.

۵- قدردانی

این مقاله حاصل از نتایج طرح پژوهشی به شماره ۶۲۴۹-۵-۱۷-۱۳ مصوب دانشگاه آزاد اسلامی واحد میانه است که با حمایت مالی معاونت پژوهش و فناوری آن دانشگاه اجرا شده است.



شکل ۶- تأثیر زمان کنترولیز در میزان جریان مؤثر و انرژی الکتریکی مصرفی

همانند جریان مؤثر، انرژی الکتریکی مصرفی نیز از میزان کاهش COD مطابق رابطه، قابل محاسبه است [۲ و ۷]

$$\text{Energy Consumption (kWh/kg COD)} = \frac{I \cdot V \cdot t_{EF}}{(\text{COD}_0 - \text{COD}_t) V_s} \quad (8)$$

که در این رابطه

I ولتاژ اعمال شده به سل الکتروشیمیایی بر حسب ولت است. در شکل ۶ نتایج به‌دست آمده از محاسبه انرژی الکتریکی نمایش داده شده است. با توجه به شکل در مدت زمان ۲۱۰ دقیقه از زمان کنترولیز، کمترین انرژی الکتریکی برای تخریب مواد رنگزا در سیستم الکتروفنتون اعمال شده است. با توجه به نتایج، زمان بهینه برای تصفیه مخلوط مواد رنگزا، همان زمان ۲۱۰ دقیقه در نظر گرفته شد.

۳-۵- میزان معدنی شدن پساب

مقدار COD اولیه برای محلولی با غلظت ۵۰ میلی‌گرم در لیتر از هر سه ماده رنگزا برابر ۱۳۸/۷ میلی‌گرم در لیتر اکسیژن اندازه‌گیری شد. برای بررسی میزان تخریب مواد رنگزای آلی، COD محلول بعد از حذف در شرایط بهینه انتخابی با استفاده از الکتروود CP-CNT مورد اندازه‌گیری قرار گرفت و درصد کاهش COD محاسبه شد (شکل ۷). با توجه به شکل میزان کاهش COD با گذشت زمان افزایش یافت، به‌طوری که در زمان ۲۱۰ دقیقه به

۶- مراجع

1. Brillas, E., Sires, I., and Oturan, M.A. (2009). "Electro-fenton process and related electrochemical technologies based on fenton's reaction chemistry." *Chemical Reviews*, 109, 6570-6631.

2. Jafarzadeh, N., Khataee, A.R., Khosravi, M., and Sohrabi, M.R. (2012). "Comparative study of dye solution treatment by electro-fenton process using carbon paper and carbon paper modified with carbon nanotubes as cathode." *Fresenius Environmental Bulletin*, 21(12b), 4022-4029.
3. Malakootian, M., Mansoorian, H., Moosavi, S., and Daneshpazhoh, M. (2013). "Performance evaluation of fenton process to remove chromium, COD and turbidity from electroplating industry wastewater." *J. Water and Wastewater*, Vol. 24, No.2 (86), 2-10. (In Persian)
4. Iglesias, O., Gomez, J., Pazos, M., and Sanroman, M.A. (2014), "Electro-fenton oxidation of imidacloprid by Fe alginate gel beads." *Applied Catalysis B: Environmental*, 144, 416-424.
5. Malakootian, M., Asadi, M., and Mahvi, A.H. (2013). "Evaluation of electro-fenton process performance for COD and Reactive Blue 19 removal from aqueous solution." *Iranian Journal of Health and Environment*, 6(4), 434-443.
6. Jafarzadeh, N., Zarei, M., Behjati, B., and Khataee, A.R. (2013). "Optimization of the oxalate catalyzed photoelectro-fenton process under visible light for removal of reactive red 195 using a carbon paper cathode." *Research on Chemical Intermediates*, 39, 3355-3369.
7. Martinez, C.A., and Brillas, E. (2009). "Decontamination of wastewaters containing synthetic organic dyes by electrochemical methods: A general review." *Applied Catalysis B: Environmental*, 87, 105-145.
8. Tsantaki, E., Velegaki, T.H., Katsaounis, A., and Mantzavinos, D. (2012). "Anodic oxidation of textile dyehouse effluents on boron-doped diamond electrode." *J. of Hazardous Materials*, 208, 91-96.
9. Brillas, E., Calpe, J.C., and Casado, J. (2000). "Mineralization of 2,4-D by advanced electrochemical oxidation processes." *Water Reserch*, 34, 2253-2262.
10. Panizza, M., and Oturan, M.A. (2011). "Degradation of alizarin red by electro-fenton process using a graphite-felt cathode." *Electrochimica Acta*, 56, 7084-7087.
11. Wang, C-Ta., Hua, J-L., Chou, W-L., and Kuo, Y-M. (2008). "Removal of color from real dyeing wastewater by electro-fenton technology using a three-dimensional graphite cathode." *J. of Hazardous Materials*, 152, 601-606.
12. Wang, A., Li, Y-Y., and Estrada, A.L. (2011). "Mineralization of antibiotic sulfamethoxazole by photoelectro-fenton treatment using activated carbon fiber cathode and under UV-A irradiation." *Applied Catalysis B: Environmental*, 102, 378-386.
13. Moreira, F.C., Garcia-Segura, S., Vilar, V.J., Boaventura, A.R., and Brillas, E. (2013). "Decolorization and mineralization of Sunset Yellow FCF azo dye by anodic oxidation, electro-fenton, UVA photoelectro-fenton and solar photoelectro-fenton processes." *Applied Catalysis B: Environmental*, 142(143), 877-890.
14. Khabazi, N., and Rowshanzamir, S. (2014). "Modeling of electrochemical treatment of phenol and prediction of specific energy consumption." *Water and Wastewater*, Vol. 24, No. 4(88), 49-58.
15. WEF. (2005). *Standard method for examination of water and wastewater*, 23th Ed., American Public Health Association Publication, Washington, D.C.