

## کاهش COD پساب صنایع بازیافت کاغذ با استفاده از روش الکترو فنتون

کامشن کاوسی<sup>۱</sup>، شادمان پورموسی<sup>۲\*</sup>، احمدجهان لتیباری<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت مقاله: اردیبهشت ماه ۱۳۹۹

تاریخ پذیرش مقاله: شهریور ماه ۱۳۹۹

## چکیده

صنایع بازیافت کاغذ حجم قابل توجهی از آب تمیز را در فرایندهای خود مصرف می‌کنند. بازیابی کامل و یا قسمت عمده پساب ایجاد شده همواره جزو اولویت‌ها و سیاست‌های صنایع می‌باشد. در این پژوهش از الکترودهای آلومینیومی به ابعاد  $150 \times 20 \times 2$  میلی‌متر استفاده شد و با اضافه کردن هیدروژن پراکسید به پساب و انجام واکنش الکتروفنتون غلظت COD باقی‌مانده با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر اندازه‌گیری گردید. پس از به دست آوردن مقادیر بهینه شاخص‌های ولتاژ جریان، سرعت همزن، زمان واکنش، pH، غلظت هیدروژن پراکسید، نسبت مولی هیدروژن پراکسید به سولفات آهن و فاصله الکترودها، درصد حذف COD در آن‌ها به دست آمد. شرایط بهینه بازده کاهش COD برای واکنش الکتروفنتون با ولتاژ جریان برابر ۶ ولت، pH معادل ۲، سرعت همزن برابر ۳۰۰ دور در دقیقه، غلظت هیدروژن پراکسید معادل ۱۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر، فاصله الکترودها برابر ۳ سانتی‌متر، نسبت مولی هیدروژن پراکسید به سولفات آهن معادل ۱/۴ و زمان ۹۰ دقیقه برای نمونه پساب صنایع بازیافت کاغذ برابر ۹۵/۵۰٪ به دست آمد. نتایج نشان داد که روش الکتروفنتون می‌تواند با ملاحظات برای تصفیه پساب صنایع بازیافت کاغذ استفاده شود.

## ۱- مقدمه

اهداف کلان توسعه اقتصادی و رشد جمعیت، رقابت را برای دسترسی بیشتر به منابع محدودی مانند آب شدیدتر نموده و نگرانی‌ها را در تأمین کارآمد آن در بین بخش‌های مختلف افزایش داده است. امروزه آب زیادی توسط بسیاری از صنایع مانند کارخانه‌های خمیر و کاغذ برای افزایش و پایداری تولید، مصرف می‌شود [۳]. تصفیه‌خانه‌های فاضلاب برای کاهش آلودگی فاضلاب‌های تولید شده توسط فعالیت‌های انسان و حداقل‌سازی تأثیرات منفی آن بر روی کیفیت محیط‌زیست و سلامت انسان، طراحی و راه‌اندازی شده‌اند [۴]. گزینه‌های مختلف تصفیه فاضلاب ویژگی‌های عملکردی مختلف و اثرات مستقیم و مشخصی را بر محیط‌زیست تحمیل می‌کنند [۵]، بنابراین نه تنها جنبه‌های فناورانه و اقتصادی بلکه معیارهای محیط‌زیستی برای انتخاب مناسب‌ترین فناوری می‌بایست در نظر گرفته شود [۶].

## واژه‌های کلیدی

الکتروفنتون، پساب، بازیافت، کاغذسازی، COD<sup>۴</sup>

- ۱- دانشجوی کارشناسی ارشد علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج، البرز، ایران (kamshankavousi@gmail.com).
- ۲- دانشیار، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج، البرز، ایران (x نویسنده مسئول: Sh.pourmousa@gmail.com)
- ۳- استاد، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج، البرز، ایران (Latibari.aj@gmail.com).

## 4- Chemical Oxygen Demand

فصلنامه علمی علوم و فنون

بسته‌بندی

فرآیند تجزیه الکتروفتون با شدت جریان ۱۳۲/۵ میلی‌آمپر (با بازدهی ۷۷/۷۹ درصد)، غلظت کاتالیزور ۰/۱۰ میلی‌لیتر و دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد، به دست آمد [۱۱].

هوانگ<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۱۸) در "تجزیه مؤثر COD از پساب ترابانتین<sup>۴</sup> عمل‌آوری شده با ترکیب فرآیندهای تصفیه‌ای میکروالکترولیز آهن-کربن و فتون: مطالعه طولانی مدت و مقیاس‌پذیر" روشی مؤثر برای تصفیه پساب صنایع عمل‌آوری ترابانتین (سفر) با رویکرد محیط‌زیستی به دست آوردند. در این روش تصفیه ابتدا توسط میکروالکترولیز با پرکننده آهن-کربن و سپس فرآیند فتون در pH حدود ۲ انجام گرفته و سپس pH پساب در حدود ۷ تنظیم می‌گردد. در این تحقیق، میزان حذف COD و هزینه انجام تصفیه در مقیاس بزرگ را اقتصادی گزارش نمودند [۱۲].

گوموس و اکبال<sup>۵</sup> (۲۰۱۶) در بررسی عملکرد روش‌های فتون و الکتروفتون در تجزیه فنول، شرایط بهینه واکنش را با pH ۳، پراکسید هیدروژن ۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر، شدت جریان ۳ میلی‌آمپر بر سانتی‌متر مربع اعلام نمودند. راندمان حذف فنل و کاهش اکسیژن‌خواهی شیمیایی برای الکتروفتون به ترتیب ۹۳/۳۲٪ و ۸۷/۵٪ و حذف فنل در روش فتون ۵۹٪ بود [۱۳].

هدف کلی این تحقیق، امکان تصفیه پساب صنایع کاغذسازی و پاک‌سازی آن از COD به منظور جلوگیری از به هدر رفتن آب، کنترل آلودگی محیط‌زیست با روش الکتروفتون در صنایع خمیر و کاغذ می‌باشد.

## ۲- روش تحقیق

### ۲-۱- تهیه پساب

به منظور بررسی تأثیر فرآیند الکتروفتون در حذف COD از پساب صنایع با زیافت کاغذ، از محل ورودی پساب به سیستم تصفیه با روش شناورسازی شرکت صنایع کاغذ کاوه واقع در شهر صنعتی کاوه در استان

انتخاب یک الگوی تصفیه به غیر از ملاحظات اقتصادی به سطح کیفی شاخص‌های خروجی فرایند نیز وابسته است. یکی از مهم‌ترین شاخص‌های ارزیابی، مقدار اکسیژن شیمیایی محلول در آب<sup>۱</sup> است. تاکنون روش‌های مختلفی برای تصفیه COD از پساب‌ها مورد استفاده قرار گرفته است که تصفیه فیزیکی، شیمیایی، فیزیکوشیمیایی، بیولوژیکی، قارچی، انواع ترکیبی و غیره از جمله مرسوم‌ترین آن‌ها است [۷].

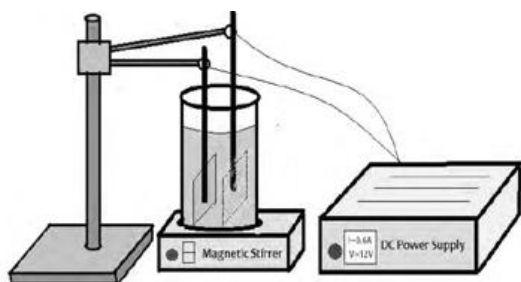
یکی از فرآیندهای اکسیداسیون شیمیایی، فتون است که در آن، یون آهن به‌عنوان کاتالیست در یک محیط اسیدی با اکسیدان وارد واکنش شده و تولید رادیکال هیدروکسیل می‌نماید. این واکنش از نوع واکنش‌های اکسایش و احیا می‌باشد. کارایی این روش تحت تأثیر عوامل مختلفی از جمله: pH، دما، غلظت آهن، پراکسید هیدروژن و زمان واکنش است [۱]. فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته مانند فتون برای تصفیه فاضلاب‌های با شاخص تجزیه‌پذیری زیستی پایین [۸] و فاضلاب صنایع خمیر و کاغذ به‌طور موفقیت‌آمیزی عملیاتی شده است [۹].

یزدان بخش و همکاران (۲۰۱۵)، در بررسی مقایسه‌ای فرآیندهای فتون، شبه فتون و الکتروفتون در حذف اکسیژن مورد نیاز شیمیایی از فاضلاب مصنوعی، اعلام کردند که چگالی جریان برابر با ۲۰ میلی‌آمپر در سانتی‌متر مربع، غلظت پراکسید هیدروژن معادل ۲ میلی‌متر، زمان الکترولیز ۶۰ دقیقه و PH برابر ۳ در هر دو فرآیند فتون و شبه فتون و برای شبه فتون معادل هفت و غلظت پراکسید هیدروژن برای فتون و شبه فتون به ترتیب ۰/۲ و ۰/۴ میلی‌متر محدوده‌های مطلوب برای نیل به کارایی مناسب حذف COD بودند [۱۰].

بوفتیا<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۱۸)، در پژوهش "فرآیند الکتروفتون برای انجام تصفیه فاضلاب لیکور سیاه اسیدی" حذف COD از محلول فاضلاب صنایع کاغذسازی (لیکور سیاه) را ۷۴/۸۲ درصد گزارش کردند. شرایط مطلوب برای

3- Huang  
4- Térébenthine  
5- Gümüş & Akbal

1- Chemical Oxygen Demand (COD)  
2- Buftia



شکل ۱- شماتیک فرایند در روش الکتروفتون

مرکزی نمونه‌گیری گردید. نمونه‌ها به مدت یک ساعت در شرایط ته‌نشینی نگهداری و پساب صاف شده از کل پساب، جداسازی گردید. ابتدا آزمایش‌های اولیه پساب انجام و سپس برای ادامه مراحل تحقیق، پساب صاف شده در یخچال با دمای ۴ درجه سلسیوس نگهداری گردید. در مراحل بعد تأثیر شاخص‌های مختلف واکنش در حذف COD بررسی و مقادیر بهینه آن‌ها به دست آمد. در کلیه آزمایشات مقادیر بهینه شاخص‌های فرایندی قبل لحاظ گردید.

### ۳- روش کار

برای تهیه غلظت‌های مختلف ابتدا محلول با غلظت

### ۲-۲- فرایند الکتروفتون

جدول ۱- شرایط و متغیرهای تحقیق

متغیرهای تحقیق	واحد	مقادیر عددی متغیرهای تحقیق
شدت جریان	ولت	۲،۴،۶،۸،۱۰
سرعت همزن	دور در دقیقه	۱۰۰،۳۰۰،۵۰۰
زمان واکنش	دقیقه	۱۵،۳۰،۶۰،۹۰،۱۲۰
اسیدیته (pH)	-	۲،۳،۴،۵،۶
غلظت هیدروژن پراکسید	میلی گرم بر لیتر	۲۵۰،۵۰۰،۷۵۰،۱۰۰۰
فاصله الکترودها	سانتی‌متر	۱،۳،۵
نسبت مولی هیدروژن پراکسید به سولفات آهن	نسبت	۱/۶، ۱/۴، ۱، ۰/۶، ۰/۲

در هر آزمایش از فرایند الکتروفتون، ابتدا مقادیر مشخصی از هیدروژن پراکسید و نمونه پساب تهیه شده درون ظرفی به حجم ۱۰۰۰ میلی‌لیتری ریخته شد. در این پژوهش از الکترودهای آلومینیومی به منظور آزاد کردن  $Al^{3+}$  به ابعاد (۲×۲۰×۱۵۰) میلی‌متر استفاده شد که به عنوان الکترودهای کاتد و آند به منبع جریان متصل شدند (شکل ۱). بعد از انجام واکنش الکتروفتون بر اساس متغیرهای تعریف شده، غلظت COD باقی‌مانده با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر<sup>۱</sup> در طول موج ۵۰۰ نانومتر اندازه‌گیری شد.

۱۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر ساخته شد. به این صورت که مقدار ۸۸۴ میکرولیتر از هیدروژن پراکسید ( $H_2O_2$ ) با دستگاه نمونه بردار برداشته و در بالن ژوژه به حجم ۱۰۰۰ میلی‌لیتر رسانده شد. برای ساختن بقیه غلظت‌ها از فرمول  $n_1V_1 = n_2V_2$  استفاده گردید که در آن  $n_1$  نرمالیه محلول غلیظ اولیه (مقدار معلوم)،  $V_1$  حجم موردنیاز از محلول غلیظ اولیه (مقدار مجهول)،  $n_2$  نرمالیه محلول رقیق ثانویه (مقدار معلوم) و  $V_2$  حجم موردنیاز محلول رقیق ثانویه (مقدار معلوم) است. با توجه به این فرمول برای ساختن مقدار ۱۰۰ میلی‌لیتر هیدروژن پراکسید ۱۵۰ میلی‌گرم بر لیتر باید ۱۵ میلی‌لیتر از محلول ۱۰۰۰ میلی‌گرم برداشته و با آب مقطر به حجم ۱۰۰ میلی‌لیتر رسید و به همین ترتیب برای ساختن مقدار ۱۰۰ میلی‌لیتر هیدروژن پراکسید ۲۵۰، ۵۰۰ و ۷۵۰ میلی‌گرم بر لیتر به ترتیب باید ۲۵، ۵۰ و ۷۵

### 1- Spectrophotometer

#### ۴- نتایج

نتایج اولیه ویژگی‌های پساب ورودی از سیستم تصفیه شرکت صنایع کاغذ کاوه در (جدول ۲) خلاصه شده است.

میلی‌لیتر از محلول ۱۰۰۰ میلی‌گرم برداشته و با آب مقطر به حجم ۱۰۰ میلی‌لیتر رسید. کلیه مراحل تحقیق در آزمایشگاه و در دمای اتاق (بازه ۲۰ الی ۲۳ درجه سلسیوس) انجام گرفت. اندازه‌گیری COD

جدول ۲- داده‌های اولیه ویژگی‌های کیفی پساب

BOD <sub>5</sub> (mg/L)	COD(mg/L)	TDS(mg/L)	TSS(mg/L)	اسیدیته	نوع پساب
۱۳۱۵	۲۱۰۰	۸۴۴۰	۶۵۰	۷/۱	بازیافت کاغذ

#### ۴-۱- نتایج آزمایش بهینه‌سازی فاصله الکترودها

در این پژوهش الکترودها در فواصل ۱، ۳ و ۵ سانتی‌متر از یکدیگر قرار گرفتند و نتایج با اختلاف نشان داد که مطلوب‌ترین فاصله تیغه‌ها از همدیگر حدود ۳ سانتی‌متر می‌باشد و همچنین با توجه به نتایج (جدول ۳) و منحنی برازش درجه ۲، در (نمودار ۱) مشاهده می‌شود که تغییر فواصل تأثیر فراوانی را بر درصد حذف COD دارد.

#### ۴-۲- نتایج آزمایش بهینه‌سازی شدت جریان

شدت جریان یک عامل محرک در آزاد شدن یون  $Fe^{2+}$  می‌باشد که به‌طور غیرمستقیم سبب بالا رفتن میزان تولید رادیکال هیدروکسیل و یون  $Fe^{3+}$  در محلول می‌گردد و در نتیجه سبب افزایش کارایی حذف می‌شود. همان‌طور که در (جدول ۴) مشاهده می‌کنید این آزمایش در ولتاژهای ۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ انجام گرفت و نمودار برازش از نتایج در (نمودار ۲) آمده است. با توجه به ضریب تعیین به دست آمده، منحنی برازش بسیار مطلوب بود و بهینه‌ترین مقدار ولتاژ بر اساس معادله منحنی برازش مقدار ۶ ولت می‌باشد و همچنین با مشاهده روند تغییرات منحنی برازش می‌توان دریافت مقدار شدت جریان بر عملکرد حذف COD مؤثر می‌باشد.

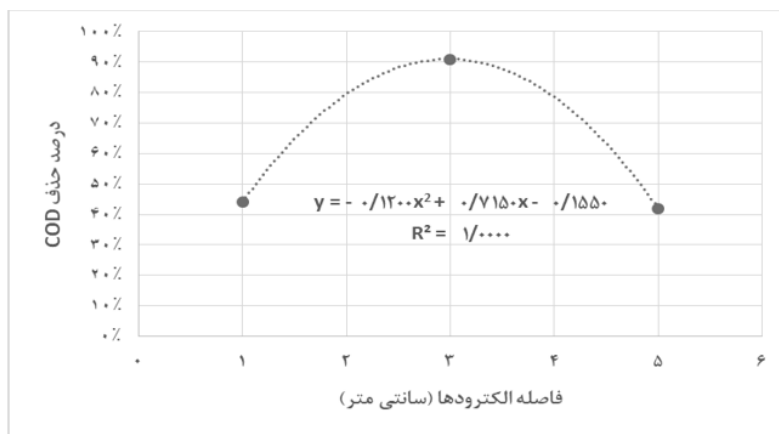
در داخل آزمایشگاه با استفاده از دستگاه اسپکتروفوتومتر مدل DR5000 ساخت کارخانه Hack آلمان به شرح زیر انجام گرفت.

برای این کار نیاز به محلول هضم<sup>۱</sup> یا دی‌کرومات پتاسیم و اسید مخصوص اندازه‌گیری COD حاوی اسیدسولفوریک و سولفات نقره می‌باشد. در هر یک از ویال‌های مخصوص دستگاه، مقدار ۲/۵ میلی‌لیتر نمونه، ۱/۵ میلی‌لیتر محلول هضم و ۳/۵ میلی‌لیتر اسید مخصوص COD ریخته می‌شود. برای انجام فرآیند هضم، ویال‌ها در دمای ۱۵۰ درجه به مدت ۱۲۰ دقیقه در دستگاه راکتور COD مدل DR-B200 کارخانه Hack آلمان قرار می‌گیرد. پس از انجام فرآیند هضم، ویال‌های حاوی نمونه به مدت ۴۵ دقیقه برای رسیدن به دمای محیط در حالت ساکن قرار می‌گیرند. در انتها مقدار جذب در مقابل ویال شاهد که در آن از ۲/۵ میلی‌لیتر آب مقطر به‌عنوان نمونه استفاده شده است، اندازه‌گیری می‌گردد. آزمایش‌ها به‌صورت طرح کاملاً تصادفی با ۳ بار تکرار انجام گردید تا مقادیر بهینه واکنش به دست آید و تأثیر این فرایندها بر روی حذف COD از پساب‌ها بررسی گردید. تأثیر عوامل مختلف در حذف این آلاینده با تغییر یک شاخص و ثابت نگه‌داشتن سایر شاخص‌ها بررسی و مقادیر بهینه آن‌ها به دست آمد. این شاخص‌ها شامل شدت جریان، سرعت همزدن، زمان واکنش، pH، غلظت هیدروژن پراکسید، نسبت مولی هیدروژن پراکسید به سولفات آهن و فاصله الکترودها می‌باشند.



جدول ۳- داده‌های آزمایش بهینه‌سازی فاصله الکترودها

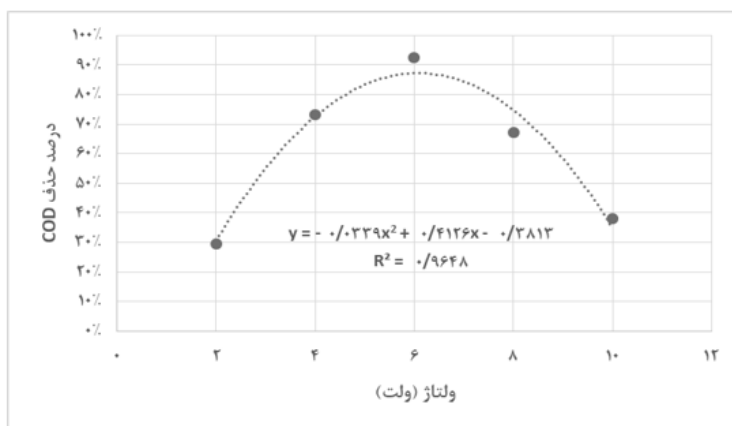
شماره آزمایش	دور همزن (دور بر دقیقه)	pH	ولتاژ (ولت)	فاصله الکترود (cm)	فاصله الکترود / FeSO <sub>4</sub>	غلظت H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (mg/L)	زمان واکنش (دقیقه)	فاصله الکترود (cm)	COD اولیه	COD ثانویه	درصد حذف COD
۱	۱۰۰	۲	۶	۱	۱	۱۰۰۰	۳۰	۱	۲۱۰۰	۱۱۷۶	٪۴۴،۰۰
۲	۱۰۰	۲	۶	۳	۱	۱۰۰۰	۳۰	۳	۲۱۰۰	۱۸۹	٪۹۱،۰۰
۳	۱۰۰	۲	۶	۵	۱	۱۰۰۰	۳۰	۵	۲۱۰۰	۱۲۱۸	٪۴۲،۰۰



نمودار ۱- فاصله بهینه الکترودها در شرایط ثابت سایر شاخص‌ها

جدول ۴- داده‌های آزمایش بهینه‌سازی شدت جریان

شماره آزمایش	دور همزن (دور بر دقیقه)	pH	فاصله الکترود (cm)	فاصله الکترود / FeSO <sub>4</sub>	غلظت H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (mg/L)	زمان واکنش (دقیقه)	ولتاژ (ولت)	COD اولیه	COD ثانویه	درصد حذف COD
۱	۱۰۰	۲	۳	۱	۱۰۰۰	۳۰	۲	۲۱۰۰	۱۴۷۸	٪۲۹/۶۳
۲	۱۰۰	۲	۳	۱	۱۰۰۰	۳۰	۴	۲۱۰۰	۵۶۳	٪۷۳/۲۱
۳	۱۰۰	۲	۳	۱	۱۰۰۰	۳۰	۶	۲۱۰۰	۱۵۹	٪۹۲/۴۵
۴	۱۰۰	۲	۳	۱	۱۰۰۰	۳۰	۸	۲۱۰۰	۶۸۹	٪۶۷/۱۷
۵	۱۰۰	۲	۳	۱	۱۰۰۰	۳۰	۱۰	۲۱۰۰	۱۳۰۲	٪۳۷/۹۹



نمودار ۲- مقدار بهینه شده جریان در شرایط ثابت سایر شاخص‌ها

### ۳-۴- نتایج آزمایش بهینه‌سازی pH

فرایند الکتروفنتون با افزایش یون  $H^+$  کامل می‌شود؛ بنابراین انتظار می‌رود کاهش pH باعث افزایش راندمان در فرایند الکتروفنتون گردد. برای به دست آوردن pH بهینه، مقادیر ۱، ۲، ۳، ۴، ۵ و ۶ مورد بررسی قرار گرفت. با مشاهده نتایج در (جدول ۵) و نمودار منحنی برآزش درجه ۲ (نمودار ۳) از مقادیر pH می‌توان دریافت مقدار آغازین بهینه این شاخص حدود ۲ می‌باشد و با افزایش این مقدار درصد حذف COD کاهش پیدا می‌کند.

با بررسی pH در این مطالعه مشخص شد حذف COD در pH پایین و برابر ۲ دارای بیشترین درصد حذف COD

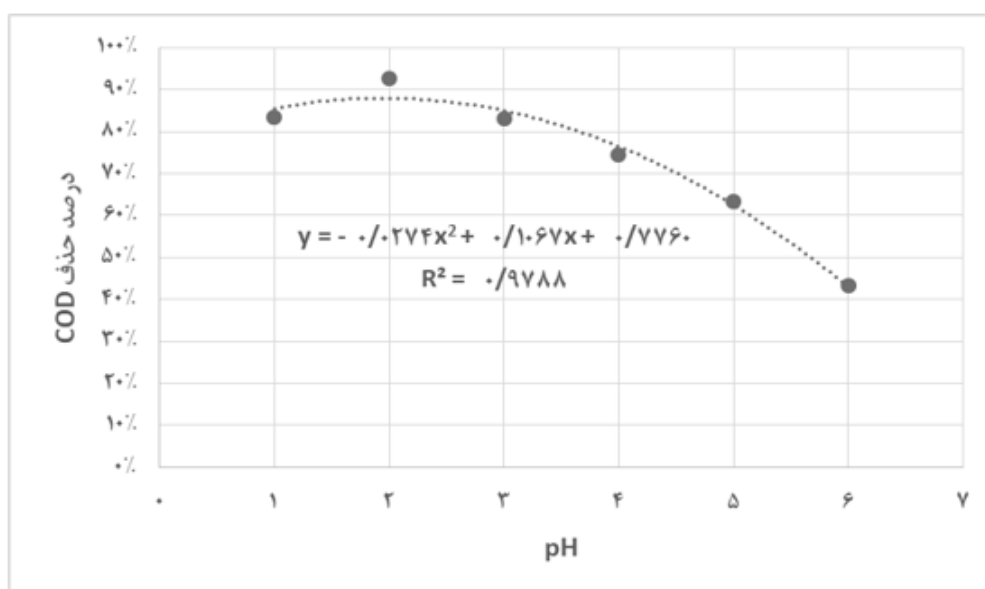
می‌باشد و بهترین عملکرد را دارد که این نتایج با تحقیق ملکوتیان و همکاران (۱۳۹۲)، هوانگ و همکاران (۲۰۱۰)، مطابقت داشت [۲ و ۱۲].

### ۴-۴- نتایج آزمایش بهینه‌سازی نسبت مولی هیدروژن پراکسید به سولفات آهن

در این آزمایش نسبت‌های ۰/۲، ۰/۶، ۱/۰، ۱/۴ و ۱/۸ ادر نظر گرفته شد. با توجه به تحقیق مهاجری و همکاران (۲۰۱۰) لازم به ذکر است سولفات آهن ( $FeSO_4$ ) کاتالیزوری مهم در این فرآیند می‌باشد، نسبت  $H_2O_2$  به

جدول ۵- داده‌های آزمایش بهینه‌سازی pH

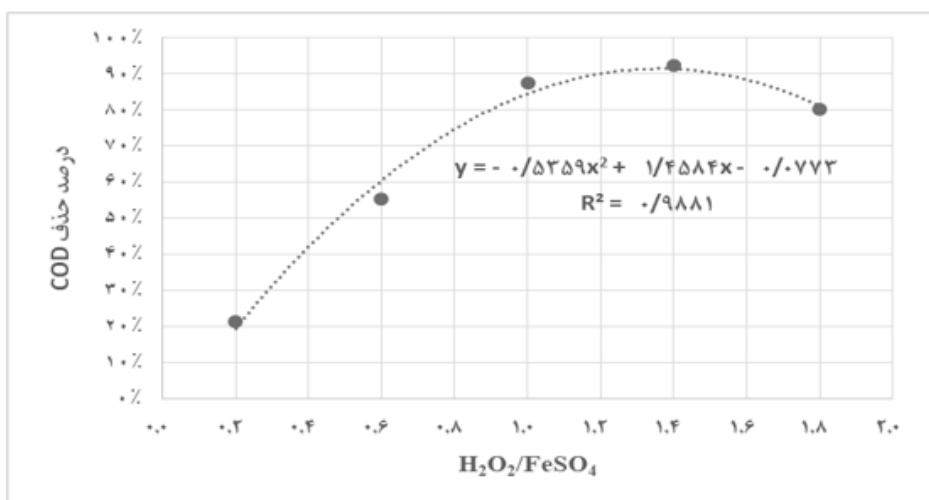
شماره آزمایش	دور همزن (دور بر دقیقه)	ولتاژ (ولت)	فاصله الکترود (cm)	FESO <sub>4</sub> / FeSO <sub>4</sub>	غلظت H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (mg/L)	زمان واکنش (دقیقه)	pH	COD اولیه	COD ثانویه	درصد حذف COD
۱	۱۰۰	۶	۳	۱	۱۰۰۰	۶۰	۱	۲۱۰۰	۳۴۷	۸۳/۵۰٪
۲	۱۰۰	۶	۳	۱	۱۰۰۰	۶۰	۲	۲۱۰۰	۱۵۵	۹۲/۶۰٪
۳	۱۰۰	۶	۳	۱	۱۰۰۰	۶۰	۳	۲۱۰۰	۳۵۳	۸۳/۲۰٪
۴	۱۰۰	۶	۳	۱	۱۰۰۰	۶۰	۴	۲۱۰۰	۵۳۸	۷۴/۵۰٪
۵	۱۰۰	۶	۳	۱	۱۰۰۰	۶۰	۵	۲۱۰۰	۷۶۷	۶۳/۵۰٪
۶	۱۰۰	۶	۳	۱	۱۰۰۰	۶۰	۶	۲۱۰۰	۱۱۹۳	۴۳/۲۰٪



نمودار ۳- مقدار بهینه pH در شرایط ثابت سایر شاخص‌ها

جدول ۶- داده‌های آزمایش بهینه‌سازی نسبت مولی هیدروژن پراکسید به سولفات آهن

شماره آزمایش	دور همزن (دور بر دقیقه)	pH	ولتاژ (ولت)	فاصله الکترود (cm)	غلظت H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (mg/L)	زمان واکنش (دقیقه)	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> / FeSO <sub>4</sub>	COD اولیه	COD ثانویه	درصد حذف COD
۱	۱۰۰	۲	۶	۳	۱۰۰۰	۳۰	۰/۲	۲۱۰۰	۱۶۵۲	۲۱/۳۳٪
۲	۱۰۰	۲	۶	۳	۱۰۰۰	۳۰	۰/۶	۲۱۰۰	۹۳۷	۵۵/۴۰٪
۳	۱۰۰	۲	۶	۳	۱۰۰۰	۳۰	۱	۲۱۰۰	۲۶۳	۸۷/۵۰٪
۴	۱۰۰	۲	۶	۳	۱۰۰۰	۳۰	۱/۴	۲۱۰۰	۱۰۵	۹۲/۵۰٪
۵	۱۰۰	۲	۶	۳	۱۰۰۰	۳۰	۱/۸	۲۱۰۰	۴۱۸	۸۰/۱۰٪



نمودار ۴- مقدار بهینه نسبت مولی هیدروژن پراکسید به سولفات آهن در شرایط ثابت سایر شاخص‌ها

اکسیدکنندگی کمتری نسبت به رادیکال‌های هیدروکسیل برخوردارند. همچنین مقادیر بیش از حد هیدروژن پراکسید باعث کاهش راندمان حذف می‌شود. به همین دلیل، غلظت بهینه آن مورد نیاز است. این آزمایش در غلظت‌های ۲۵۰، ۵۰۰، ۷۵۰ و ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر انجام گرفت. با مشاهده نتایج (جدول ۷) و منحنی برازش شده درجه ۲ از داده‌ها در (نمودار ۵) می‌توان دریافت که این شاخص منجر به تغییرات معنی‌داری در درصد حذف COD نمی‌شود.

هرچند میزان ۱۰۰۰ میلی‌گرم از هیدروژن پراکسید باعث به دست آمدن درصد بالایی از حذف COD گردید ولی در کل غلظت هیدروپراکسید اثر چندانی در درصد حذف COD به‌وسیله فرآیند الکتروفتون نداشت و تغییرات درصد حذف COD با توجه به تغییرات این

سولفات آهن نقش بسیار مهمی از این فرآیند را به خود اختصاص می‌دهد. با مشاهده نتایج (جدول ۶) و منحنی برازش درجه ۲ در (نمودار ۴) می‌توان دریافت که تغییرات این نسبت تأثیر فراوانی بر درصد حذف COD دارد و با توجه به معادله به دست آمده از منحنی بهترین نسبت به دست آمده ۱/۳۶ می‌باشد.

#### ۴-۵- نتایج آزمایش بهینه‌سازی غلظت هیدروژن پراکسید

آب‌اکسیژنه منبع اصلی تولید رادیکال‌های هیدروکسیل است. به همین دلیل پیش‌بینی می‌شود که با افزایش غلظت آب‌اکسیژنه، درصد حذف ماده آلی نیز افزایش می‌یابد، اما از طرفی غلظت بیش از اندازه آب‌اکسیژنه باعث تولید رادیکال‌های هیدروپروکسیل می‌گردد که از قدرت

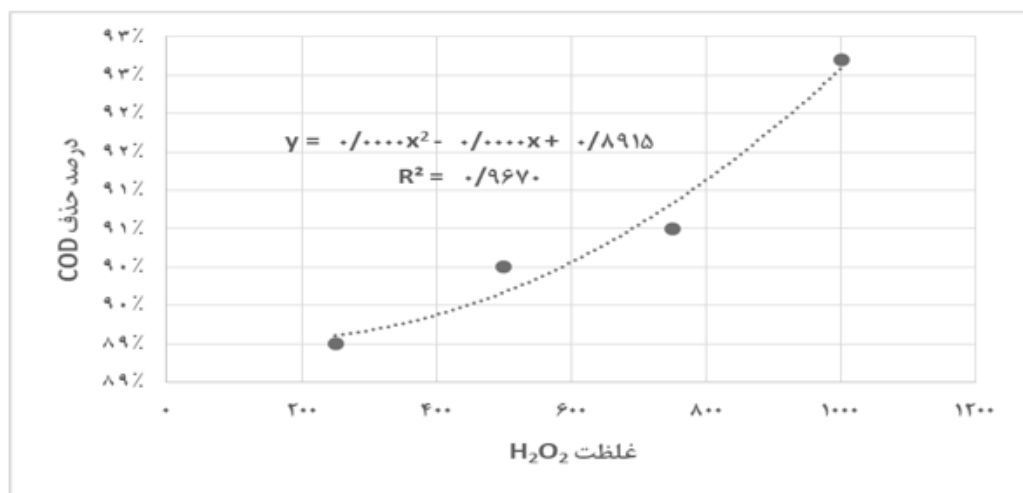
شاخص قابل چشم پوشی بود. با توجه به اینکه در تحقیقات پیشین، از الکتروود آهنی در فرآیند الکتروفتون استفاده گردیده است، لذا زمانی که پراکسید هیدروژن در حد متعادل و مناسب به فرآیند اضافه می‌گردد، کارایی آن در حداکثر مقدار خود می‌باشد، اما با افزودن بیش از حد آن، به دلیل مصرف شدن پراکسید هیدروژن جهت اکسید کردن یون‌های آهن در طی واکنش از محیط واکنش خارج شده و از سویی دیگر با تولید رادیکال پراکسیل که در مقایسه با رادیکال هیدروکسیل از پتانسیل اکسیداسیون کمتری برخوردار است، تجزیه و تخریب آلاینده با روند کاهشی مواجه خواهد شد. در تحقیق حاضر با توجه به عدم حضور الکترودهای آهنی، یون‌های آهن تنها از طریق کاتالیزور سولفات آهن در واکنش حضور داشتند که مقدار آن‌ها با توجه به نسبت مولی بهینه ثابت و محدود در نظر گرفته شده بود، در نتیجه تغییر غلظت هیدروژن پراکسید تأثیر بسزایی در راندمان حذف نداشته

#### ۶-۴- نتایج آزمایش بهینه‌سازی سرعت همزن

در این آزمایش سرعت همزن به‌عنوان متغیر با سرعت‌های ۱۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ دور بر دقیقه در نظر گرفته شد و سایر شاخص‌ها ثابت نگه‌داشته شدند. افزایش بیش از حد هم زدن، فرصت یون‌ها را برای تماس بهتر با الکترودها و انجام واکنش‌های دلخواه کاهش می‌دهد. اگر سرعت از حدی کمتر باشد نمی‌تواند از تجمع حباب‌های گاز بر روی الکتروود کاند جلوگیری کند و سبب کاهش سطح مؤثر الکتروود می‌گردد. با توجه به نتایج (جدول ۸) بهترین سرعت ۳۰۰ دور بر دقیقه و بر اساس معادله به دست آمده در (نمودار ۶) و مشتق‌گیری از آن، حداکثر مقدار حذف COD مربوط به سرعت ۲۷۷٫۷۸ دور بر دقیقه می‌باشد که سرعت بهینه در این آزمایش می‌باشد. در این

جدول ۷- داده‌های آزمایش بهینه‌سازی غلظت هیدروژن پراکسید

شماره آزمایش	دور همزن (دور بر دقیقه)	pH	ولتاژ (ولت)	فاصله الکتروود (cm)	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> / FeSO <sub>4</sub>	زمان واکنش (دقیقه)	غلظت H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (mg/L)	COD اولیه	COD ثانویه	درصد حذف COD
۱	۱۰۰	۲	۶	۳	۴/۱	۳۰	۲۵۰	۲۱۰۰	۲۳۱	۸۹٪
۲	۱۰۰	۲	۶	۳	۴/۱	۳۰	۵۰۰	۲۱۰۰	۲۱۰	۹۰٪
۳	۱۰۰	۲	۶	۳	۴/۱	۳۰	۷۵۰	۲۱۰۰	۲۰۰	۹۰/۵۰٪
۴	۱۰۰	۲	۶	۳	۴/۱	۳۰	۱۰۰۰	۲۱۰۰	۱۵۳	۹۲/۷۰٪

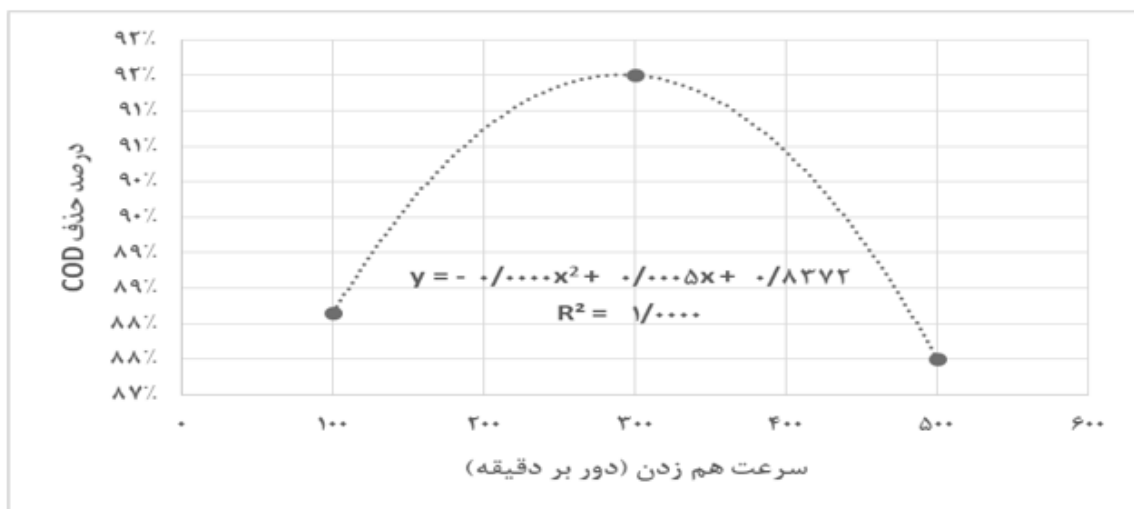


نمودار ۵ - مقدار بهینه غلظت هیدروژن پراکسید در شرایط ثابت سایر شاخص‌ها



جدول ۸- داده‌های آزمایش بهینه‌سازی سرعت همزن

شماره آزمایش	pH	ولتاژ (ولت)	فاصله الکترود (cm)	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> / FeSO <sub>4</sub>	غلظت H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (mg/L)	زمان واکنش (دقیقه)	سرعت همزن (دور بر دقیقه)	COD اولیه	COD ثانویه	درصد حذف COD
۱	۲	۶	۳	۴/۱	۱۰۰۰	۳۰	۱۰۰	۲۱۰۰	۲۷۰	٪۸۷/۱۵
۲	۲	۶	۳	۴/۱	۱۰۰۰	۳۰	۳۰۰	۲۱۰۰	۱۷۹	٪۹۱/۵۰
۳	۲	۶	۳	۴/۱	۱۰۰۰	۳۰	۵۰۰	۲۱۰۰	۲۶۳	٪۸۷/۵۰



نمودار ۶- مقدار بهینه سرعت همزن در شرایط ثابت سایر شاخص‌ها

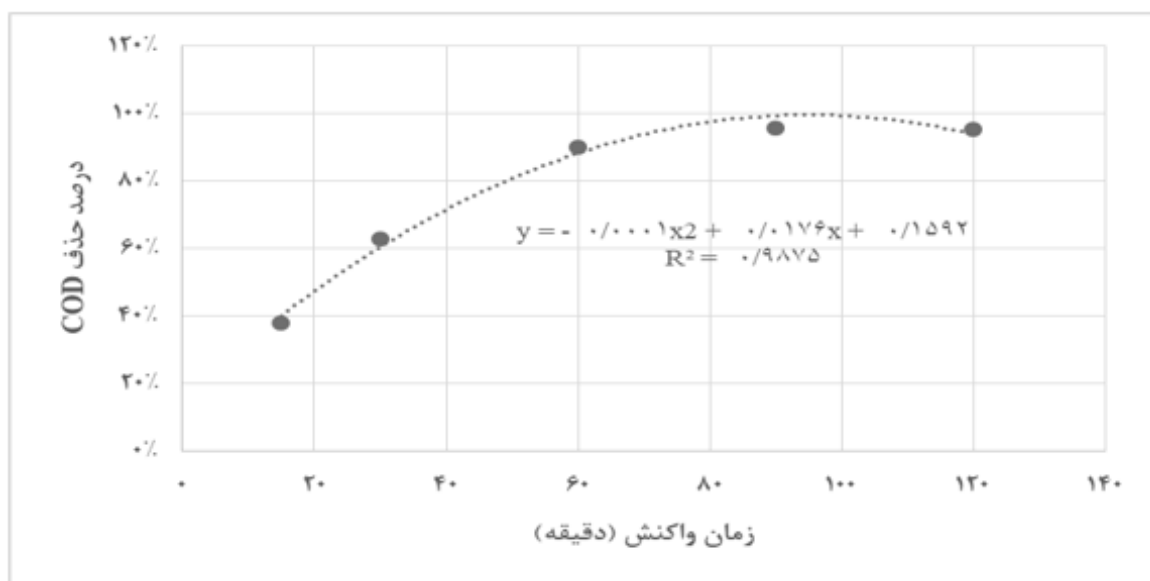
همچنین اگر این سرعت از حدی کمتر باشد نمی‌تواند از تجمع حباب‌های گاز بر روی الکترود کاتد جلوگیری کند و سبب کاهش سطح مؤثر الکترود می‌گردد.

نمودار ضریب تعیین  $R^2$  برابر ۱ شده است که نشان‌دهنده برازش مناسب از داده‌های موجود می‌باشد که حاکی از تعیین دقیق مقدار جواب بهینه می‌باشد. لازم به ذکر است سرعت همزن به این دلیل که باعث افزایش فرصت یونها برای در تماس قرار گرفتن با الکترودها و نیز افزایش سرعت هوادهی می‌شود، بسیار حائز اهمیت می‌باشد.

در روش الکتروفتون با تولید مستمر H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> مرحله هوادهی نقش بسزایی دارد. مطالعات نشان داده است با افزایش سرعت هوادهی میزان تولید الکتروشیمیایی H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> افزایش می‌یابد؛ اما میزان تولید بالای H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> در محیط باعث افزایش COD محیط خواهد شد. افزایش بیش از حد هم‌زدگی محلول باعث کاهش فرصت یونها برای در تماس قرار گرفتن با الکترودها و انجام واکنش‌های دلخواه خواهد شد.

جدول ۹- داده‌های آزمایش بهینه‌سازی زمان واکنش

شماره آزمایش	دور همزن (دور بر دقیقه)	pH	ولتاژ (ولت)	فاصله الکترود (cm)	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> / FeSO <sub>4</sub>	غلظت H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (mg/L)	زمان واکنش (دقیقه)	COD اولیه	COD ثانویه	درصد حذف COD
۱	۳۰۰	۲	۶	۳	۴/۱	۱۰۰۰	۱۵	۲۱۰۰	۱۳۰۲	۳۸.۰۰٪
۲	۳۰۰	۲	۶	۳	۴/۱	۱۰۰۰	۳۰	۲۱۰۰	۷۷۷	۶۳.۰۰٪
۳	۳۰۰	۲	۶	۳	۴/۱	۱۰۰۰	۶۰	۲۱۰۰	۲۱۰	۹۰.۰۰٪
۴	۳۰۰	۲	۶	۳	۴/۱	۱۰۰۰	۹۰	۲۱۰۰	۹۵	۹۵.۵۰٪
۵	۳۰۰	۲	۶	۳	۴/۱	۱۰۰۰	۱۲۰	۲۱۰۰	۹۹	۹۵.۳۰٪



نمودار ۷- مقدار بهینه زمان واکنش در شرایط ثابت سایر شاخص‌ها

کاهش COD پساب صنایع بازیافت کاغذ با استفاده از روش الکترو فنتون

پایین‌تر می‌آید که این نکته باید در نظر گرفته شود. با توجه به (جدول ۹) نتایج حاکی از این است فرآیند الکتروفنتون باعث حذف معنی‌دار COD از پساب می‌شود که مقدار آن ۹۵/۵۰ درصد پساب اولیه می‌باشد.

#### ۵- نتیجه‌گیری

با توجه به قرار گرفتن کشور در شرایط بحران آب، استفاده کاربردی از فناوری‌های نوین در زمینه‌های تصفیه آب و فاضلاب و ایجاد شرایط لازم برای استفاده از منابع آب آلوده، امری ضروری است، لذا مطالعات و بررسی‌های بیشتر در زمینه کارایی سیستم‌های نوین را لازم می‌باشد چرا که در صورت عدم انجام این مطالعات و بررسی سایر

#### ۴-۷- نتایج آزمایش بهینه‌سازی زمان واکنش

در این تحقیق شاخص زمان واکنش در زمان‌های ۱۵، ۳۰، ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ دقیقه مورد آزمایش قرار گرفت و باقی شاخص‌ها ثابت نگه‌داشته شدند. با توجه به نتایج (جدول ۹) و (نمودار ۷) درجه ۲ برازش داده شده مقدار بهینه زمان واکنش برابر ۹۷/۷۷ دقیقه به دست آمد. حال با توجه صرف وقت انتظار و افزایش هزینه‌ها بدون توجیه اقتصادی و در نظر گرفتن رادمان می‌توان گفت زمان واکنش در ۹۰ دقیقه بهینه‌ترین گزینه باشد. با مشاهده نمودار چنین دریافت می‌شود که روند حذف COD در ابتدا با شیب و مقدار بیشتری بوده است و هر چه از زمان واکنش می‌گذرد راندمان

- standards from a life cycle perspective,” *Bioresource technology*. 126, 31-40.
5. Wu, J., Meng, X., Liu, X., Liu, X., Zheng, Z., Xu, D., et al. (2010). “Life Cycle Assessment of a Wastewater Treatment Plant Focused on Material and Energy Flows,” *Environmental Management*. 46, 610–617.
  6. Molinos-Senante, M. Gomez, T. Garrido-Baserba, M. Caballero, R., Sala-Garrido, R. (2014). “Assessing the sustainability of small wastewater treatment systems: a composite indicator approach,” *Science of Total Environment*, 607-617.
  7. Hubbe et al. (2016). “Wastewater treatment and reclamation: A review of pulp and paper industry practices and opportunities,” *BioResources*. 11(3), 7953-8091.
  8. Ghernaout, D., Elboughdiri, N. and Ghareba, S. (2020) “Fenton Technology for Wastewater Treatment: Dares and Trends,” *Open Access Library Journal*, 7: e6045. <https://doi.org/10.4236/oalib.1106045>
  9. Hussain, S. Shaikh, S. Farooqui, M. (2013). “COD reduction of wastewater streams of active pharmaceutical ingredient – atenolol manufacturing unit by advanced Oxidation-Fenton process,” *Journal of Saudi Chemical Society*. 17, 199–202.
  10. Yazdanbakhsh, A., Sardar, M., Eliasi, S., and Sheikh Mohammadi, A.; (2015). “Comparison of Azithromycin COD removal from wastewater by Fenton, Fenton like and Electro-Fenton processes,” *Sustain. Environ. Res.*, 25(6), 331-337 .
  11. Buftia, G., Rosales, E., Pazos, M., Lazar, G., Sanromán, M.A. (2018). “Electro-Fenton process for implementation of اولویت‌های موجود، پیامدهای زیست‌محیطی و تنش‌های اقتصادی، اجتماعی حاصل از آن غیرقابل اجتناب خواهد بود. پساب خروجی از واحدهای تولید کاغذ اغلب حاوی مقدار زیادی مواد مضر می‌باشند. در صورت عدم تصفیه مناسب و رهاسازی آن‌ها در محیط‌های پذیرنده ضمن ایجاد مشکلات زیست محیطی، آسیب‌های اجتماعی بسیاری را به وجود می‌آورد.
- نتایج این تحقیق نشان داد که با رعایت برخی از ملاحظات، استفاده از روش الکتروفتون به عنوان یک روش اصلی یا تکمیلی برای پساب صنایع بازیافت کاغذ امکان‌پذیر می‌باشد.
- ۶- منابع**
۱. رحمانی، ع؛ نعمتی ثانی، ا؛ دهقان، ع ؛ اکبری، س؛ اسدزاده، ن؛ حسینی، ا. (۱۳۹۴). «مقایسه کارایی فرایند الکتروفتون و فرایند فتون در حذف کروم شش ظرفیتی در حضور سیاهید به‌عنوان مداخله‌گر از محیط‌های آبی». مجله دانشگاه علوم پزشکی خراسان شمالی، دوره ۷ (۴)، صفحات ۷۷۹-۷۹۲
  ۲. ملکوتیان، م؛ جعفری منصوریان، ح؛ موسوی، س؛ دانش‌پژوه، م. (۱۳۹۲). «ارزیابی کارایی فرایند فتون در حذف کروم، COD و کدورت از فاضلاب صنایع آبکاری». مجله آب و فاضلاب، شماره ۲،
  3. Olejnik, K. (2011). “Water consumption in paper industry reduction capabilities and the consequences in; Atimaty, A.t. sikdar, Sk.(Eds), *security of industrial water supply and management Springer*,” Dordrecht, The Netherlands. 113-129.
  4. Wang, X. Liu, J. Ren, N. Q. Duan, Z. (2012). “Environmental profile of typical anaerobic /anoxic/oxic wastewater treatment systems meeting increasingly stringent treatment

**acid black liquor waste treatment,”** *Science of the Total Environment*. Vol. 635, pp. 397–404.

12. Huang, C., Peng, F., Guo, H.J., Wang, C., Luo, M.T., Zhao, C., Xiong, L., Chen, X.F., Chen, X.D. (2018). **“Efficient COD degradation of turpentine processing wastewater by combination of Fe-C micro-electrolysis and Fenton treatment: Long-term study and scale up,”** *Chemical Engineering Journal*. Vol. 351, 697–707
13. Gümüş, D., & Akbal, F. (2016). **“Comparison of Fenton and electro-Fenton processes for oxidation of pHenol,”** *Process Safety and Environmental Protection*, 103, 252-258.

#### آدرس نویسنده

کرج - گروه صنایع چوب و کاغذ، دانشکده  
کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه آزاد اسلامی  
واحد کرج، کرج، ایران، صندوق پستی:  
۳۱۴۸۵-۳۱۳