مجله علمی دانشگاه علوم پزشکی کردستان/ دوره هفدهم / پاییز۱۳۹۱/۸۱-۷۲

بررسی کارایی فرآیندالکتروفنتون در تصفیه محلول‌های آبی حاوی فرمالدهید با غلظت بالا توسط الکترودهای آلومینیم و آهن

امیر باقری[۱]، غلامرضا موسوی[۲]، علی خوانین[۳]

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی بهداشت محیط، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده پزشکی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۲ .دانشیار گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده علوم پزشکی، دانشکده دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران (مولف مسئول) تلفن: ۸۲۸۸۳۸۲۷-۰۲۱، moussavi@modares.ac.ir

۳. دانشیار گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای، دانشکده علوم پزشکی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

چکیده

زمینه و هدف: استفاده از فرمالدهید به دلیل واکنش پذیری بالا، ماهیت بی رنگ، پایداری، خلوص در اشکال تجاری و قیمت پائین در صنایع افزایش یافته است. طبق لیست CERCLA فرمالدهید ماده ای خطرناک و سمی برای انسان و محیط زیست است. هدف از این تحقیق بررسی کارایی فرآیند الکتروفنتون در پیش‌تصفیه فاضلاب صنعتی حاوی غلظت بالای فرمالدهید است.

روش بررسی: این تحقیق مطالعه‌ای تجربی- آزمایشگاهی است که ابتدا راکتور آن طراحی و ساخته شد. سپس زمان بهینه انجام فرآیند تعیین شد. با یافتن زمان واکنش بهینه و ثابت نگه داشتن آن، pH بهینه انجام واکنش تعیین شد. با بهینه سازی pH فرآیند و زمان واکنش، اثر سایر پارامترهای راهبری مانند غلظت پراکسید هیدروژن اولیه، نوع چیدمان الکترودهای آهن و آلومینیم به عنوان آند و کاتد در دانسیته جریان ثابت، تحت شرایط هواده ۱ لیتر در دقیقه و در تصفیه فاضلاب سنتتیک حاوی غلظت اولیه ۷۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر فرمالدهید مورد بررسی قرار گرفت. آنالیز و تفسیر داده‌ها با استفاده از نرم افزار MS Excel 2010 و انحراف معیار استاندارد انجام شد.

یافته‌ها: طبق نتایج بدست آمده کارایی حذف فرمالدهید با استفاده از فرآیند الکتروفنتون با افزایش pH و غلظت پراکسید هیدروژن اولیه افزایش می یابد. راندمان حذف فرمالدهید با استفاده از این فرآیند با افزایش زمان ماند تا ۱۰ دقیقه افزایش می‌یابد و پس از ۱۰ دقیقه با افزایش زمان واکنش کارآیی سیستم کاهش می‌یابد. همچنین مشخص شد که در چیدمان الکترودها به صورت آند آهن و کاتد آهن راندمان حذف فرمالدهید از سایر چیدمان‌های ممکن بین الکترودهای آهن و آلومینیم مورد آزمایش بیشتر است.

نتیجه‌گیری: مطابق با نتایج آزمایشهای انجامی حداکثر راندمان حذف فرمالدهید، ۷۱/۵۴ درصد، در شرایط راهبری pH=۱۰، شدت جریان برابر با ۸/۵۰ میلی آمپر بر سانتی‌متر مربع، در مدت زمان ۱۰ دقیقه، با غلظت اولیه ۵۰ میلی‌مول بر لیتر از هیدروژن پراکسید و با استفاده از الکترودهای آند آهن - کاتد آهن ، بدست آمد.

واژگان کلیدی: فاضلاب صنعتی، فرمالدهید، الکتروفنتون، الکترود آهن، الکترود آلومینیم.

وصول مقاله :۹۰/۷/۱۶ اصلاحیه نهایی:۹۱/۲/۱۳ پذیرش:۹۱/۳/۲۳

مقدمه

فرمالدهید ترکیبی شیمیایی با بوی تند است که فرمول شیمیایی آن HCHO است(۱). این ماده ساده‌ترین ترکیب خانواده آلدهیدهاست(۲) و با نام‌های متیل‌آلدهید، متانال، متیل‌اکسید و فرمیک‌آلدهید شناخته می‌شود(۳). استفاده از فرمالدهید به دلیل واکنش‌پذیری بالا، ماهیت بی‌رنگ، پایداری، خلوص در اشکال تجاری و قیمت پائین در صنایع

[Downloaded from sjku.muk.ac.ir on 2026-11-06]

افزایش یافته است (۴). صنایعی همچون ساخت رزین‌های مصنوعی، چسب سازی، لوازم بهداشتی- آرایشی، نگهدارنده‌ها، تولید کاغذ، پردازش چوب، تولید پارچه، ساخت گندزداها، صنایع شیمیایی و پتروشیمی، صنایع پلاستیک، ساخت فیبرهای پلی استر و فیبرهایی با دانسیته متوسط و صنعت فایبرگلاس در زمره مصرف کنندگان فرمالدهید هستند (۵). فرمالدهید سبب ایجاد ناهنجاری‌های کروموزومی، تحریک چشمها، بینی، حلق، درماتیت و عفونت‌های دستگاه گوارشی (در کودکان) می‌شود. طبق لیست CERCLA فرمالدهید ماده‌ای خطرناک و سمی برای انسان و محیط زیست است. بنابراین فاضلاب قبل از تخلیه به محیط زیست باید بطور موثری مورد تصفیه قرار بگیرد(۶).

تکنیک‌های تصفیه قدیمی مانند الکتروکواگولاسیون، الکتروفلوتاسیون، الکتروفلوکولاسیون، کاهش الکتریکی و کلرزنی الکتریکی تنها بخشی از آلاینده را حذف می‌کنند، علاوه بر آن برخی محصولات جانبی‌ای را تولید می‌کنند که نامطلوب و خطرناکند. راندمان کم تصفیه متداول در تخریب بسیاری از مواد سمی و مقاوم به تجزیه بیولوژیک سبب شده تا به دنبال روشهای موثرتری برای تجزیه این ترکیبات باشیم. محبوب‌ترین AOP شیمیایی روش فنتون است که در آن از Fe^{2+} و H_2O_2 (عامل فنتون) برای تجزیه مواد آلی مقاوم استفاده می‌شود (۸و۷). توانایی اکسیداسیون فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته (Advance Oxidation Processes) وقتی محتوای مواد آلی بالا باشد، بطور قابل توجهی کاهش می‌یابد(>۵g/L)، بنابراین نیاز به مصرف مقدار بیشتری واکنش‌دهنده است که این تکنیک تصفیه فوق را از نظر هزینه- کاربری، بسیار بی‌ارزش می‌کند (۹). به دلیل بالا بودن غلظت فرمالدهید در فاضلاب‌های صنعتی (در حدود ۱۰-۴g/L) و با در نظر گرفتن محدودیت‌های فرآیندهای تصفیه‌ای متداول در تصفیه این فاضلابها، انجام تحقیقات بیشتر جهت مطالعه فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته ضروری است. بر اساس این مطلب، تکنولوژی الکتروشیمیایی برای جلوگیری از بروز مسائل مرتبط با آلودگی در بسیار مورد توجه قرار گرفته است (۱۲-۱۰). فرآیندهای اکسیداسیون الکتروشیمیایی (Electrochemical Advanced Oxidation Processes) بر اساس واکنش‌های شیمیایی فنتون، تکنولوژی جدیدی است که در تصفیه آب استفاده می‌شود. فرآیند الکتروفنتون یکی از گزینه‌های پیشنهادی در مجموعه فرآیندهای اکسیداسیون الکتروشیمیایی است.

مزیت اصلی این روش الکترو- اکسیداسیون در مقایسه با سایر روشها موارد زیر است:

- سازگاری با محیط زیست، که در آن الکترون عامل اصلی است که یک عامل پاک است.
- تطبیق‌پذیری، راندمان انرژی بالا، کنترل الکترونیکی و ایمنی سیستم به دلیل راهبری تحت شرایط کنترل شده.
- امکان کنترل کنتیک‌های تجزیه جهت مطالعات پویایی واکنش‌ها.
- میزان تجزیه بالاتر آلاینده‌های آلی به دلیل تولید مداوم Fe^{2+} در کاتد که این خود سبب کاهش حجم لجن تولیدی نیز می‌شود(۷).

واکنش‌هایی که بطور همزمان در محلول مورد تصفیه رخ خواهد داد شامل موارد زیر است:

[واکنش آندی]

$$Fe^{3+} + e^- \rightarrow Fe^{2+} \qquad E^0 = 0.711\ V \qquad (۱)$$

[واکنش کاتدی]

$$O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O_2 \qquad (۲)$$

[واکنش کلی در محلول مورد تصفیه]

$$Fe^{2+} + H_2O_2 \rightarrow Fe^{3+} + {}^{\cdot}OH + OH^- \qquad k = 51\ M^{-1}s^{-1} \qquad (۳)$$

پراکسید هیدروژن با یون فروس مطابق با واکنش ۳، واکنش می‌دهد و تولید رادیکال هیدروکسیل می‌کند. این رادیکال در محل و در بستر واکنش تولید می‌گردد و به عنوان اکسیدکننده‌ای غیرانتخابی با ترکیبات آلی روبرو می‌شود.

[Downloaded from sjku.muk.ac.ir on 2026-11-06]

$OH^{\cdot}$ بعد از فلوئور دومین عامل اکسیدکننده قدرتمند است که پتانسیل کاهشی استاندارد آن $E^0(^{\cdot}OH/H_2O)=2.8$ V/SHE است. رادیکال هیدروکسیل توانایی تخریب اغلب آلاینده‌های آلی و آلی- فلزی تا حد معدنی‌سازی کامل، به عنوان مثال تبدیل این ترکیبات به دی‌اکسیدکربن، آب و یون‌های غیر آلی را دارد (۱۴و۱۳).

در طی دهه گذشته تجربیات نشان داده است که این تکنیک در جهت تصفیه فاضلاب‌های آلوده به آفت‌کش‌های سمی و مقاوم، رنگ‌های آلی سنتتیک، محصولات مراقبت‌های فردی و دارویی و طیف وسیعی از آلاینده‌های صنعتی بسیار موثر است. در تحقیقی که در سال ۲۰۰۷ انجام شد، از فرآیند الکتروفنتون در حذف متیل پاراتیون استفاده شد که طی انجام آزمایش TOC در بستر پرکلریک و در pH ۳، معدنی شدن کامل در کمتر از ۴۵ دقیقه روی داد (۱۵). در سال ۲۰۰۸ این تکنیک در تصفیه علف‌کش پیکلورام بکار گرفته شد و طی آن علف‌کش پیکلورام طی الکترولیز ۸ ساعته به مقدار ۹۵ درصد حذف شد که این میزان حذف بر اساس TOC گزارش شد. در این مطالعه از آند Pt و کاتد Carbon felt استفاده شد (۱۶). در سال ۲۰۱۱ با استفاده از فرآیند الکتروفنتون اسید کوماریک موجود در فاضلاب صنایع روغن سازی مورد تصفیه قرار گرفت. در این مطالعه راندمان حذف ۹۵ درصد از TOC اولیه در شرایط بهینه دانسیته جریان ۳۰۰ میلی‌آمپر، در pH برابر با ۳ و پس از ۳۶۰ دقیقه زمان واکنش بدست آمد (۱۷). در سال ۲۰۱۲ با استفاده از فرآیند الکتروفنتون جهت حذف رنگ و آمونیاک از شیرابه محل دفن بهداشتی مواد زائد استفاده شد. راندمان حذف رنگ و آمونیاک طی این مطالعه به ترتیب ۹۸/۶ و ۵۵/۲ درصد بدست آمد (۱۸). در این پژوهش راندمان تصفیه با استفاده از فرآیند الکتروفنتون بر اساس اثر نحوه چیدمان آند و کاتد (الکترودهای آهن و آلومینیم)، غلظت اولیه هیدروژن پراکسید (۵۰ تا ۵ میلی‌مول بر لیتر)، pH فاضلاب مصنوعی(۱۲ تا ۲) و زمان فرآیند (۶۰ تا ۱ دقیقه)، در شدت جریان ۸/۵۰ میلی‌آمپر بر سانتی‌متر مربع در سیستم جریان بسته همراه با هوادهی ۱ لیتر در دقیقه در مقیاس آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت.

روش بررسی

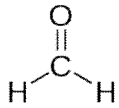
پژوهش حاضر مطالعه‌ای تجربی- کاربردی است که در مقیاس آزمایشگاهی در سال ۹۰-۱۳۸۹ در آزمایشگاه آب و فاضلاب دانشکده پزشکی دانشگاه تربیت مدرس انجام گردیده است.

ساخت فاضلاب مصنوعی

برای ساخت فاضلاب مصنوعی با غلظت ۷۵۰۰ میلی گرم بر لیتر، از محلول ۳۷ درصد حاوی فرمالدهید ساخت شرکت MERCK استفاده شد. در جدول ۱ مشخصات و خصوصیات فرمالدهید مورد استفاده آورده شده است. پس از تهیه حجم مناسب از فاضلاب مصنوعی با استفاده از آب شهری، pH محلول حاصل با استفاده از اسید سولفوریک و سود سوزآور تنظیم شد.

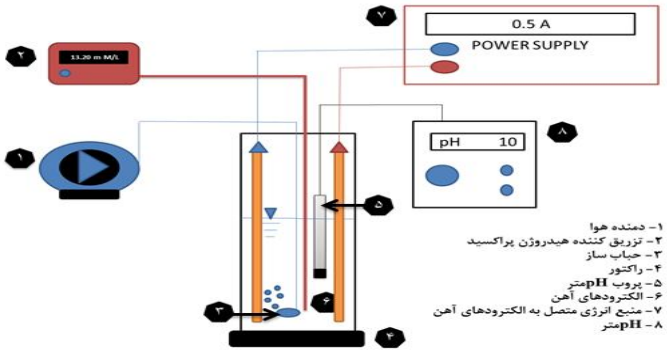
[Downloaded from sjku.muk.ac.ir on 2026-11-06]

جدول ۱ – مشخصات و خصوصیات فرمالدهید

نام شیمیایی	متیل‌آلدهید
ساختار شیمیایی	
میزان انحلال در آب	۴۰۰ $g\ dm^{-3}$
دانسیته	۱/۰۹ $Kg\ L^{-1}$
نقطه ذوب	-۹۲°C
متانول	۹ -۱۱ ٪

روش کار و تجهیزات مورد استفاده

تمامی آزمایشات در دمای اتاق در یک راکتور شیشه‌ای تک‌بخشی مدور به حجم کلی ۵۰۰ میلی‌لیتر به ارتفاع ۳۴/۵۰ سانتی‌متر و با قطر داخلی ۵/۲۰ سانتی‌متر انجام شد. در هر آزمایش از حجم ۲۰۰ میلی‌لیتر فاضلاب فرمالدهیدی با غلظت ۷۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر استفاده شد. سطح موثر الکترودهای مورد استفاده برابر با ۵۸/۷۵ سانتی‌مترمربع (۲×۲/۵cm×۱۱/۷۵cm) تعیین شد. فاصله بین دو الکترود و فاصله الکترودها از دیواره راکتور به ترتیب ۳/۵ و ۰/۷۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. لحظاتی قبل از شروع عملیات الکترولیز، هوادهی با میزان جریان ۱ لیتر بر دقیقه از طریق حباب‌ساز هوایی که در انتهای راکتور تعبیه شده بود وارد سیستم می‌گردید که علاوه بر تامین هوا، اختلاط مورد نظر در سیستم را نیز بوجود می‌آورد. همزمان با آغاز عملیات الکترولیز، آهن مورد نیاز فرآیند الکتروفنتون از طریق اکسایش الکترود آهن مورد استفاده تامین می‌شد (شکل ۱). در این تحقیق از الکترودهای آهن و آلومینیم، مطابق جدول ۲ به تناوب به عنوان آند و کاتد استفاده گردید.



شکل ۱- تصویر شماتیک سیستم مورد استفاده در فرآیند الکتروفنتون

[Downloaded from sjku.muk.ac.ir on 2026-11-06]

میزان شدت جریان و اختلاف پتانسیل در سیستم به طور مداوم طی الکترولیز با استفاده از دستگاه با قدرت DC (SANJESH, TEK8051) تنظیم و مورد اندازه گیری قرار گرفت. از pH متر JENWAY3505 با الکترود شیشه‌ای کالیبره شده با محلول‌های کالیبراسیون شرکت JENWAY استفاده شد.

جدول۲- تناوب استفاده از الکترودهای آهن و آلومینیم به عنوان آند و کاتد

رویه کاری	آند	کاتد
۱	آهن	آهن
۲	آهن	آلومینیم
۳	آلومینیم	آهن

روش اندازه‌گیری

غلظت آهن محلول بر اساس روش فنانترولین مورد محاسبه قرار گرفت (۱۹). مقدار H_2O_2 موجود در سیستم بر اساس روش پرمنگنومتری اندازه گیری شد (۱۹). غلظت اولیه و نهایی فاضلاب مصنوعی ساخته شده از فرمالدهید با استفاده از روش واکنش Hantzsch اندازه گیری گردید. این روش بر اساس رنگ‌سنجی در طول موج ۴۱۲ نانومتر نور مرئی با معرف Hantzsch است (۲۰).

یافته‌ها

اثرات پارامترهای راهبری سیستم بر تجزیه فرمالدهید

اثر زمان فرآیند، pH فاضلاب مصنوعی، غلظت اولیه هیدروژن پراکسید تحت شرایط تزریق یکباره و اثر نوع الکترود بر کارایی فرآیند الکتروفنتون جهت حذف فرمالدهید در نمودارهای ۱ تا ۴ آمده است.

تعیین زمان واکنش بهینه در فرآیند الکتروفنتون جهت حذف فرمالدهید

جهت یافتن بهترین زمان تصفیه برای فاضلاب سنتتیک با غلظت ۷۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر فرمالدهید، سیستم در زمان‌های ۱، ۲، ۴، ۶، ۸، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ دقیقه، تحت دانسیته جریان ۸/۵۰ میلی‌آمپر بر سانتی‌مترمربع، تزریق یکباره پراکسید هیدروژن در شروع فرآیند به غلظت ۵۰ میلی‌مول بر لیتر، pH اولیه خنثی، تحت شرایط هوادهی ۱ لیتر در دقیقه و با استفاده از الکترودهای آهن و آلومینیم راهبری شد. مطابق با نمودار۱، راندمان حذف در زمان‌های ۱، ۲، ۴، ۶ ، ۸ و ۱۰ دقیقه به ترتیب ۱۵، ۴۰، ۴۷، ۶۰ ، ۶۷ و ۷۰ درصد بدست آمد. با افزایش زمان به ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ دقیقه به ترتیب راندمان‌های حذف ۶۹، ۶۷، ۶۳، ۶۰، ۵۴، ۵۲ و ۵۰ درصد بدست آمد.

تعیین pH بهینه در فرآیند الکتروفنتون جهت حذف فرمالدهید

برای یافتن pH مناسب، فاضلاب سنتتیک با غلظت ۷۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر فرمالدهید با pHهای ۲، ۴، ۶، ۷، ۸، ۱۰ و ۱۲ ساخته شد و طی زمان بهینه بدست آمده، تحت دانسیته جریان ۸/۵۰ میلی‌آمپر بر سانتی‌مترمربع و با تزریق یکباره پراکسید هیدروژن در شروع فرآیند به غلظت ۵۰ میلی‌مول بر لیتر، تحت شرایط هوادهی ۱ لیتر در دقیقه و با استفاده از الکترودهای آهن و آلومینیم راهبری شد. طبق نمودار۲، راندمان‌های حذف فرمالدهید در pHهای ۲، ۴، ۶، ۷، ۸، ۱۰ و ۱۲ به ترتیب ۵، ۲۲، ۲۶، ۵۱، ۶۴، ۷۳/۲ و ۷۳/۴ درصد بدست آمد.

تعیین غلظت بهینه پراکسید هیدروژن اولیه تحت شرایط تزریق یکباره

برای تعیین اثر دوز پراکسید هیدروژن، فاضلاب سنتتیک با غلظت ۷۵۰۰ میلی‌گرم‌برلیتر فرمالدهید ساخته شد و راندمان حذف فرمالدهید در غلظت‌های ۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ میلی‌مول بر لیتر پراکسید هیدروژن در شرایط تزریق یکباره (Batch)، تحت زمان و pH بهینه، دانسیته جریان ۸/۵۰

[Downloaded from sjku.muk.ac.ir on 2026-11-06]

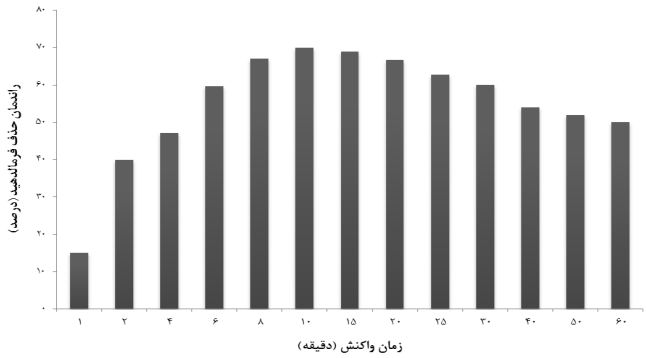
میلی‌آمپر بر سانتی‌مترمربع، در شرایط هوادهی ۱ لیتر در دقیقه و با استفاده از الکترودهای آهن و آلومینیم مورد بررسی قرار گرفت. نمودار۳ اثر غلظت‌های مختلف پراکسید هیدروژن تحت شرایط تزریق یکباره در ابتدای فرآیند را نشان می‌دهد. مطابق با این شکل با افزایش در غلظت اولیه پراکسید هیدروژن، راندمان حذف فرمالدهید نیز افزایش می‌یابد. راندمان‌های حذف ۲۷، ۳۱، ۴۸، ۶۰، ۶۲/۵ و ۷۵ درصد به ترتیب به ازای تزریق ۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ میلی‌مول بر لیتر از پراکسید هیدروژن بدست آمد.

تعیین چیدمان مناسب آند و کاتد

جهت تعیین چیدمان مناسب آند و کاتد با استفاده از الکترودهای آهن و آلومینیم، پس از بهینه‌سازی زمان واکنش، pH فرآیند و غلظت پراکسید هیدروژن اولیه، توالی آندی و کاتدی بین دو نوع الکترود آهن و آلومینیم تحت شرایط بهینه بدست آمده مورد بررسی قرار گرفت. هنگامیکه از چیدمان‌های آند آهن- کاتد آهن، آند آهن- کاتد آهن- کاتد آلومینیم و آند آلومینیم- کاتد آهن استفاده شد، میزان آهن تولید شده از طریق الکترودها به دلیل شدت جریان موجود در سیستم، به ترتیب برابر ۱۳۲ ، ۱۰۳ و ۸۷ میلی‌گرم بر لیتر اندازه‌گیری شد. میزان پراکسید هیدروژن باقیمانده در سیستم نیز به ترتیب ۱۹۸، ۳۱۰ و ۱۷۵۵ میلی‌گرم بر لیتر اندازه‌گیری شد.

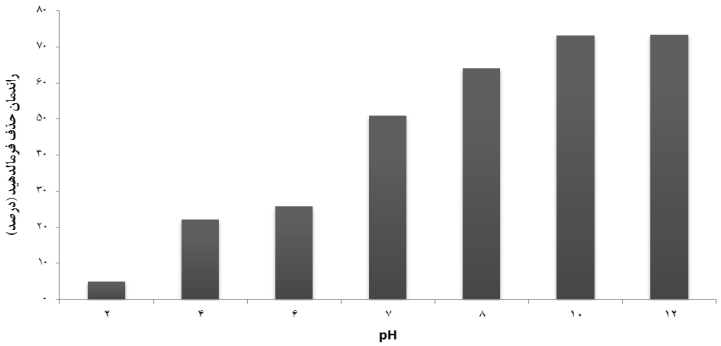
طبق نمودار۴ در زمان واکنش ۱۰ دقیقه، pH برابر با ۱۰، با غلظت اولیه ۵۰ میلی‌مول بر لیتر از پراکسید هیدروژن، دانسیته جریان ۸/۵۰ میلی‌آمپر بر سانتی‌مترمربع و در شرایط هوادهی ۱ لیتر در دقیقه با استفاده از چیدمان‌های آند آهن- کاتد آهن، آند آهن- کاتد آلومینیم و آند آلومینیم- کاتد آهن راندمان‌های حذف به ترتیب ۷۱/۵، ۶۷/۴ و ۵۹/۳۵ درصد بدست آمد.

لازم به ذکر است که میزان انحراف معیار نسبی (RSD) کمتر از ۱/۹ حاکی از میزان تکرار پذیری بالای داده‌های بدست آمده طی آزمایشات بود.

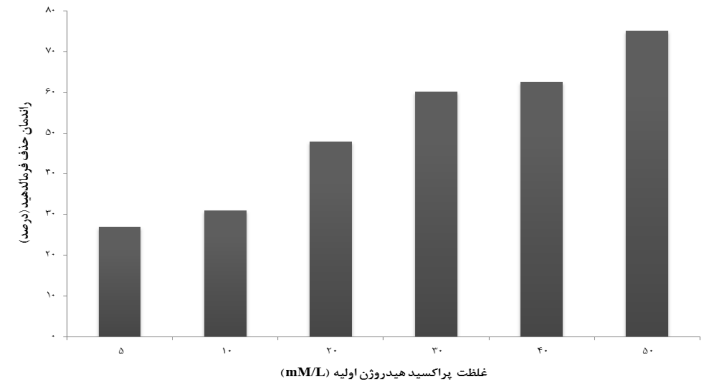


نمودار۱- راندمان حذف فرمالدهید در شرایط زمانی متفاوت توسط فرآیند الکتروفنتون:
(C_o= 7500mg/L, I=8.5mA/cm^2, pH=7 , H_2O_2=50mM/L, V=200cc)

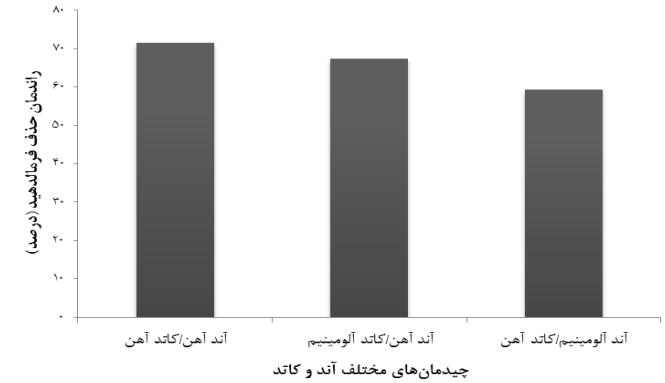
[Downloaded from sjku.muk.ac.ir on 2026-11-06]



نمودار۲- راندمان حذف فرمالدهید در pH های متفاوت توسط فرآیند الکتروفنتون
(C_o= 7500mg/L, I=8.5mA/cm^2, H_2O_2=50mM/L, t=10min,V=200cc)



نمودار۳- راندمان حذف فرمالدهید در غلظت های متفاوت هیدروژن پراکسید توسط فرآیند الکتروفنتون:
(C_o= 7500mg/L, I=8.5mA/cm^2, pH=10, t=10min, V=200cc)



نمودار۴- راندمان حذف فرمالدهید توسط فرآیند الکتروفنتون حین استفاده از الکترودهای مختلف:
(C_o=7500 mg/L, t=10min, I=8.5mA/cm^2, pH=10, H_2O_2=50mM/L, V=200cc)

بحث

مطابق با نمودار۱، با افزایش زمان واکنش از ۱ تا ۱۰ دقیقه راندمان حذف فرمالدهید افزایش می‌یابد و به حداکثر مقدار خود، ۷۰ درصد می‌رسد. با افزایش زمان واکنش به بیش از ۱۰ دقیقه راندمان حذف فرمالدهید روندی نزولی را طی

[Downloaded from sjku.muk.ac.ir on 2026-11-06]

می‌کند. در این پژوهش تمامی ۵۰ میلی مول بر لیتر از پراکسید هیدروژن در ابتدا به سیستم افزوده شد. به دلیل مصرف شدن پراکسید هیدروژن افزوده شده به سیستم، با افزایش زمان واکنش راندمان حذف بعد از زمان ۱۰ دقیقه روندی کاهشی دارد. دیگر علت کاهش راندمان با افزایش زمان ماند، افزایش دمای محلول مورد تصفیه است. نکته قابل تامل اینکه با افزایش دمای سلول الکتروشیمیایی کنیتیک واکنش‌ها نیز تسریع می‌شود و همانطور که بیان شد واکنش دهنده‌ها با سرعت بیشتری مصرف می‌شوند، از طرف دیگر با افزایش دمای سیستم وقوع واکنش پارازیتی تجزیه‌ای H_2O_2 طبق واکنش‌های (۴) و (۵)، به اکسیژن مولکولی و آب شدت می‌گیرد و سبب کاهش راندمان با افزایش زمان واکنش می‌شود(۲۱).

$$H_2O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow 2H_2O \quad (۴)$$

$$2H_2O_2 \rightarrow O_{2(g)} + 2H_2O \quad (۵)$$

طبق نمودار۲، با افزایش pH فاضلاب مورد تصفیه، راندمان حذف فرمالدهید نیز افزایش می یابد. از آنجائیکه در سیسنم انتخابی در این پژوهش پراکسید هیدروژن به سیستم افزوده می‌شود و از الکترودها در جهت تولید الکتروشیمیایی آهن استفاده می‌شود، باید شرایط آزمایش را به گونه‌ای مهیا کرد تا پراکسید هیدروژن اضافه شده در سیستم به نحو موثری مورد استفاده قرار گیرد. طبق مطالعات انجام شده، در صورت استفاده از پراکسید هیدروژن به عنوان عامل اکسیداسیون، راندمان حذف ترکیبات آلدهیدی در pHهای قلیایی در حضور این عامل اکسیداسیون بالاتر می‌باشد (۲۲). همچنین به دلیل اینکه آهن در pHهای قلیایی خصوصا بالاتر از ۱۰ به شکل $Fe(OH)_2$ می‌باشد، مکانیسم تولید کننده رادیکال هیدروکسیل از واکنش $Fe(OH)_2$ با H_2O_2 افزوده شده به سیستم صورت می گیرد (۱۳).

طبق مطالب فوق چنین تفسیر می‌گردد که مکانیسم حذف در pHهای اسیدی خصوصا زیر ۴، مکانیسم واکنش (۶) فنتون است. مکانیسم حذف در pHهای قلیایی بر اساس واکنش (۷) است(۲۳).

طبق نمودار۳، با افزایش غلظت اولیه پراکسید هیدروژن افزوده شده به سیستم راندمان حذف فرمالدهید نیز افزایش می‌یابد. همانطورکه در واکنش‌های (۷و۶) مشاهده می‌شود، با افزایش تولید آهن در محلول مورد تصفیه، میزان مصرف H_2O_2 افزایش می‌یابد. با وقوع این دو واکنش میزان تولید رادیکال هیدروکسیل نیز افزایش می‌یابد و افزایش در میزان تولید رادیکال هیدروکسیل به منزله افزایش در راندمان حذف آلاینده است.

$$Fe^{2+} + H_2O_2 \rightarrow Fe^{3+} + OH^- + {}^{\cdot}OH \quad (۶)$$

$$2Fe(OH)_2 + H_2O_2 \rightarrow 2{}^{\cdot}OH + Fe_2O_3 + 3H_2O \quad (۷)$$

هنگامیکه الکترولیز در سیستم بر قرار است و آهن در سیستم تولید می‌گردد به دلیل مصرف Fe^{2+} و $Fe(OH)_2$ در جهت تولید رادیکال هیدروکسیل طی واکنش (۹) فنتون و راهبری سیستم در شرایط قلیایی۱۰=pH، بخشی از آهن تولیدی در سیستم به Fe^{3+} تبدیل می‌شود. تولید Fe^{2+} از Fe^{3+} مستلزم مصرف بخشی از H_2O_2 افزوده شده به سیستم است. طی واکنش (۸) با باز تولید Fe^{2+} از طریق مصرف H_2O_2، تولید رادیکال هیدروکسیل از طریق واکنش (۹) فنتون نیز افزایش می‌یابد. عوامل اکسیدکننده در این سیستم با توجه به قلیایی بودن محیط واکنش و ماده تحت اثر(فرمالدهید)، هر دوی H_2O_2 و ${}^{\cdot}OH$ می‌باشد. بنابراین با افزایش غلظت پراکسید هیدروژن تزریقی به سیستم، راندمان حذف افزایش می‌یابد.

$$Fe^{3+} + H_2O_2 \rightarrow Fe^{2+} + H^+ + HO_2{}^{\cdot} \quad (۸)$$

$$H_2O_2 + Fe^{2+} \rightarrow Fe^{3+} + {}^{\cdot}OH + OH^- \quad k= 51\ M^{-1}s^{-1} \quad (۹)$$

بالاترین میزان تولید آهن حین استفاده از چیدمان آند آهن- کاتد آهن می‌باشد و میزان راندمان حذف در این شرایط نیز

[Downloaded from sjku.muk.ac.ir on 2026-11-06]

بالاتر است. این در حالی است که هنگام استفاده کاتد آلومینیم در برابر آند آهن به دلیل پتانسیل اکسیداسیون بالاتر آلومینیم (۱/۶۶V-) در برابر آهن (۰/۴۴V-)، مقدار آهن تولید شده توسط آند، در مقایسه با دو چیدمان دیگر بیشتر است، اما به دلیل اینکه میزان تولید کلی آهن در این چیدمان نسبت به حالت اول کمتر است، میزان حذف کمتر از حالت اول و بیشتر از حالت سوم است. در حالت سوم، زمانیکه از آند آلومینیم در برابر کاتد آلومینیم استفاده شد، میزان تولید آهن کمتر از سایر چیدمان‌ها بود، زیرا پتانسیل اکسیداسیون آند بیشتر از کاتد بوده است. مقدار پراکسید هیدروژن باقی‌مانده در محلول مورد تصفیه پس از زمان واکنش ۱۰ دقیقه در چیدمان اول کمتر از دو چیدمان دیگر است که خود بیانگر مصرف پراکسید هیدروژن افزوده شده از طریق واکنش فنتون با کاتالیست آهن است. در نتیجه به دلیل تولید بیشتر عامل اکسیداسیون (رادیکال هیدروکسیل) در چیدمان الکترودی آند آهن- کاتد آهن،راندمان نیز بیشتر است(۲۴). عامل فنتون به طریق الکتروشیمیایی در محلول مورد تصفیه با موفقیت تولید شد که منجر به تولید موثر رادیکال هیدروکسیل شد. این فرآیند در حذف فرمالدهید موفق عمل نمود. راندمان حذف ۷۱/۵۴ درصد در غلظت اولیه ۷۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر از فرمالدهید در pH=۱۰، در زمان ۱۰ دقیقه، غلظت اولیه ۵۰ میلی‌مول بر لیتر H_2O_2، در شدت جریان ۸/۵۰ میلی‌آمپر بر سانتی‌متر مربع، با هوادهی ۱ لیتر در دقیقه و با استفاده از چیدمان‌های آند آهن- کاتد آهن بدست آمد.

نتیجه گیری

فرآیند الکتروفنتون، فرآیندی اقتصادی- دوستدار محیط زیست است که از آن در حذف ترکیبات مقاوم و سمی استفاده شده است. راندمان این فرآیند را با استفاده از تابش فرابنفش و یا تصفیه بیولوژیکی می توان ارتقا داد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان از حمایت‌های مالی و آزمایشگاهی دانشکده پزشکی دانشگاه تربیت مدرس کمال تشکر را دارند.

Reference

1. Liang WJ, Li J, Li JX, Zhu T, Jin YQ. Formaldehyde removal from gas streams by means of $NaNO_2$ dielectric barrier discharge plasma. Journal of Hazardous Materials 2010;175:1090-5.
2. Schmidt B, specialist air. Formaldehyde screening study winter, MISSOULA CITY-COUNTY HEALTH DEPARTMENT, 1993-1994.
3. Lotfy HR, Rashed I. A method for treating wastewater containing formaldehyde. Water Research 2002;36:633-7.
4. Moussavi G, Heidarizad M. Biodegradation of mixture of phenol and formaldehyde in wastewater using a single-basin MSCR process. Journal of Biotechnology 2010;150:240-5.
5. Hill MK. Understanding environmental pollution, Cambridge University Press, Cambrige, UK, 1997.
6. Patterson JW. Industrial wastewater treatment technology, United States, second edition, 1985.
7. Andreozzi R, Caprio V, Insola A, Marotta R. Advanced oxidation processes (AOP) for water purification and recovery. Catalysis Today 1999;53:51-9.
8. Tarr MA. Chemical degradation methods for wastes and pollutants: environmental and industrial applications: CRC Press; University of New Orleans, Louisiana, USA, 2003.
9. Simonsson D. Electrochemistry for a cleaner environment. Chem Soc Rev 1997;26:181-9.

[Downloaded from sjku.muk.ac.ir on 2026-11-06]

10. Pletcher D, Walsh F. Industrial electrochemistry: Springer: London, LDN, United Kingdom, 1990.
11. Rajeshwar K, Ibanez JG. Environmental electrochemistry: fundamentals and applications in pollution abatement: Academic Press; 1st edition, San Diego, CA,1997.
12. Özcan A, Şahin Y, Savaş Koparal A, Oturan MA. Carbon sponge as a new cathode material for the electro-Fenton process: Comparison with carbon felt cathode and application to degradation of synthetic dye basic blue 3 in aqueous medium. Journal of Electroanalytical Chemistry 2008;616:71-8.
13. Zhang T, Yu SR, Feng HX. Fenton-like mineralization of anion surfactant by Fe_2O_3/attapulgite catalyst. Advanced Materials Research 2012;399:1392-5.
14. Poyatos J, Muñio M, Almecija M, Torres J, Hontoria E, Osorio F. Advanced oxidation processes for wastewater treatment: state of the art. Water, Air and Soil Pollution 2010;205:187-204.
15. Silva AMT, Castelo-Branco IM, Quinta-Ferreira RM, Levec J. Catalytic studies in wet oxidation of effluents from formaldehyde industry. Chemical Engineering Science 2003;58:963-70.
16. Hammami S, Oturan N, Bellakhal N, Dachraoui M, Oturan MA. Oxidative degradation of direct orange 61 by electro-fenton process using a carbon felt electrode: Application of the experimental design methodology. Journal of Electroanalytical Chemistry 2007;610:75-84.
17. Elaoud SC, Panizza M, Cerisola G, Mhiri T. Coumaric acid degradation by electro-fenton process. Journal of Electroanalytical Chemistry 2011;667:19-23.
18. Shi Y, Yu HC, Xu DY, Zheng XQ. Degradation of landfill leachate by combined three-dimensional electrode and electro-fenton. Advanced Materials Research 2012;347:440-3.
19. APHA, Standard methods for the examination of water and wastewater. New York: APHA, 2005.
20. Nash T. The colorimetric estimation of formaldehyde by means of the hantzsch reaction. Biochemical Journal 1953;55:416.
21. Pereira N, Zaiat M. Degradation of formaldehyde in anaerobic sequencing batch biofilm reactor. Journal of Hazardous Materials 2009;163:777-82.
22. Alverez-Gallegos A, Pletcher D. The removal of low level organics via hydrogen peroxide formed in a reticulated vitreous carbon cathode cell. Part 2: The removal of phenols and related compounds from aqueous effluents. Electrochimica Acta 1999;44:2483-92.
23. Qiang Z, Chang JH, Huang CP. Electrochemical regeneration of Fe^{2+} in fenton oxidation processes. Water Research 2003;37:1308-19.
24. Moussavi G, Majidi F, Farzadkia M. The influence of operational parameters on elimination of cyanide from wastewater using the electrocoagulation process. Desalination 2011;280:127-133.

[Downloaded from sjku.muk.ac.ir on 2026-11-06]