

## بررسی کارایی فرایند الکترولیز با الکترودهای ۳ بعدی گرافیت در رنگ زدایی فنل فتالین و فنل رد از محیط آبی

محمد رضا مسعودی نژاد<sup>۱</sup>، هاجر شریفی<sup>۲</sup>، اشرف مظاهری تهرانی<sup>۳</sup>

نویسنده مسئول: تهران، ولنجک، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، دانشکده بهداشت، گروه بهداشت محیط [massoudi@sbmu.ac.ir](mailto:massoudi@sbmu.ac.ir)

پذیرش: ۹۱/۰۴/۱۱

دریافت: ۹۱/۰۱/۱۴

### چکیده

**زمینه و هدف:** حضور مواد رنگ‌زای شیمیایی در منابع آبی علاوه بر آلودگی آنها، با توقف تولید اکسیژن و جلوگیری از نفوذ نور خورشید موجب مرگ موجودات زنده و وارد آمدن صدمات جدی به محیط زیست می‌گردد. در این مطالعه کارایی فرایند الکترولیز در رنگ زدایی فنل فتالین و فنل رد از محیط آبی مورد بررسی قرار گرفت.

**روش بررسی:** برای انجام آزمایشات از یک راکتور الکتروشیمیایی با حجم مفید ۱ L که به ۲ الکتروده گرافیت مجهز شده بود، استفاده گردید. این مطالعه در مقیاس آزمایشگاهی انجام شد و نمونه های پساب از انحلال دو رنگ فنل فتالین و فنل رد در آب آشامیدنی تهیه گردید. سپس تاثیر پارامترهای عملیاتی مانند ولتاژ، فاصله بین الکترودها، غلظت نمک  $NaCl$  بر حذف کامل رنگ از نقطه نظر زمان ماند مناسب با استفاده از آنالیز واریانس فاکتوریال تعیین شد.

**یافته‌ها:** نتایج نشان داد که بهترین شرایط عملیاتی جهت حذف کامل رنگ برای فنل فتالین ولتاژ  $48 V$ ، زمان ماند  $9 min$ ، فاصله بین الکتروده  $5 cm$  و غلظت نمک  $1/5 g/L$  و برای فنل رد ولتاژ  $48 V$ ، زمان ماند  $8 min$ ، فاصله بین الکتروده  $5 cm$  و غلظت نمک  $2 g/L$  است. در این شرایط راندمان حذف  $COD$  برای فنل فتالین و فنل رد به ترتیب  $85\%$  و  $80\%$  به دست آمد.

**نتیجه‌گیری:** این مطالعه نشان داد که فرایند الکترولیز روش موثری جهت حذف رنگ‌های محلول نظیر فنل رد و فنل فتالین از پساب است و در مدت زمان کوتاهی قادر است رنگ را با راندمان بالایی حذف نماید.

**واژگان کلیدی:** الکترولیز، رنگ زدایی، فنل فتالین، فنل رد

- ۱- دکترای بهداشت محیط، دانشیار دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی
- ۲- دانشجوی کارشناسی ارشد بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی
- ۳- کارشناس ارشد بهداشت محیط، عضو هیات علمی دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی کاشان

## مقدمه

در چند دهه اخیر، اثرات زیست محیطی رنگ به شدت افزایش یافته است. حضور آن نه تنها کیفیت زیبایی شناختی آب‌های سطحی را مختل می‌کند، بلکه بر اکوسیستم آبی اثر می‌گذارد و آن را تغییر می‌دهد (۱). بخش بزرگی از ترکیبات آلی که باعث ایجاد آلودگی در آب طبیعی می‌گردند، مواد رنگ‌زای شیمیایی هستند که به صورت صنعتی و خانگی مورد استفاده قرار می‌گیرند (۲). تخلیه پساب‌های رنگی به محیط زیست، خطرناک است، زیرا رنگ‌ها به دلیل ماهیت رنگی‌شان از آلاینده‌های ظاهری بوده (۱)، از نفوذ نور به درون آب‌ها جلوگیری می‌کند و فرایندهای فتوسنتز و سایر فرایندهای بیولوژیکی مربوط به حیات آبریان را مختل می‌نمایند (۳ و ۲۴)، هم‌چنین می‌تواند برای ماهیان، فون و فلور موجود در منطقه تخلیه پساب سرطان‌زا، جهش‌زا و سمی باشد (۵). بنابراین حذف این آلاینده‌ها پیش از تخلیه به آب‌های پذیرنده ضروری به نظر می‌رسد.

تاکنون از فرایندهای متعدد فیزیکی، شیمیایی و فیزیکوشیمیایی مانند ترسیب، انعقاد شیمیایی، صافی شنی کند، تبادل یونی، جذب بر روی کربن فعال (جذب سطحی) (۶)، حذف شیمیایی با عوامل اکسیدکننده مانند کلر، ازن، پراکسید هیدروژن (۷)، فرایندهای غشایی مانند نانوفیلتراسیون و اسمز معکوس و فرایند تجزیه بیولوژیکی جهت حذف رنگ از پساب استفاده شده است (۸). اگرچه این روش‌ها موثر به نظر می‌رسد، اما اغلب ناکافی و پرهزینه هستند. روش‌های بیولوژیکی ارزان و ساده‌اند اما برای اغلب فاضلاب‌های رنگی غیرموثرند، زیرا رنگ‌ها علاوه بر قابلیت تجزیه بیولوژیکی پایین، برای ارگانسیم‌های مورد استفاده در فرایند، سمی هستند و منجر به حجیم شدن لجن می‌گردند (۹-۱۱). فرایندهای اکسیداسیون و فرایندهای غشایی مناسبند، اما فرایندهای غشایی لجن غلیظی تولید می‌کنند که دفع آن مشکل است و روش اکسیداسیون شیمیایی و اکسیداسیون پیشرفته اغلب هزینه‌های عملیاتی بالایی در بردارند (۱۲).

در سال‌های اخیر از روش‌های الکتروشیمیایی جهت تصفیه پساب رنگی استفاده شده است و هم‌زمان با افزایش محدودیت‌ها در تخلیه پساب به محیط، به استفاده از این روش‌ها توجه

بیشتری شده است (۱۳). دلیل این توجه مزایای متعدد آنها روش از جمله سازگاری با محیط زیست، امکان تصفیه مایعات، گازها و جامدات، سهولت راه‌اندازی، تجهیزات ساده، زمان ماند کوتاه (۱۴)، تولید لجنی با حجم کمتر و دانسیته بالاترست (۱۰). بنابراین تحقیقات بر روی تکنولوژی‌های الکتروشیمیایی برای تجزیه آلاینده‌های آلی افزایش یافته که بیشتر بر توسعه تکنولوژی‌های پیشرفته برای تصفیه فاضلاب و عوامل اکسیدکننده قوی (رادیکال‌های هیدروکسیل، هیپوکلریت، ازن) متمرکز شده است. این روش، الکترواکسیداسیون نامیده می‌شود که می‌تواند برای تجزیه یا کاهش آلاینده‌های سمی موجود در فاضلاب به کار رود، به طوری که این فرایند به طور گسترده در تصفیه فاضلاب نساجی (۱۰ و ۱۲)، دباغی (۱۵)، فاضلاب ماکیان (۱۶)، رختشوی‌خانه (۱۷)، کارخانه ذغال سنگ (۱۸) و هم‌چنین برای تصفیه شیرابه محل دفن (۱۹) به کار برده شد که در همه آنها این فرایند توانست مواد آلاینده را به مقدار قابل قبولی برساند، در این روش عامل اصلی تصفیه الکترون‌ها است که در آن از یک منبع جریان برق مستقیم بین الکترودهای فرو رفته در آب آلوده استفاده می‌شود. با برقراری جریان الکتریکی با یک اختلاف پتانسیل معین، الکترولیت‌های موجود در سیال به یون‌ها تجزیه شده و واکنش‌های اکسیداسیون در آند و احیا در کاتد رخ می‌دهد. راندمان فرایند به پارامترهای مختلفی از جمله نوع الکترودها، pH، اختلاف پتانسیل، هدایت الکتریکی و فاصله بین الکترودها بستگی دارد (۲۰). علاوه بر این، میزان حذف آلاینده‌ها به نوع الکتروود آند وابسته است (۱۴). تعدادی از محققین امکان‌پذیری تجزیه الکتروشیمیایی رنگ و یا COD را با ماهیت‌های متفاوت الکتروود آند مانند الکترودهای الماس (۲۱)، گرافیت (۲۲ و ۲۳)، ACF (فیبرکربن فعال (۲۰)، ACF، Ti/Pt و گرافیت (۲۳).  $Ti/TiRuO_2$  (۲۴) الماس برم‌اندود (BDD) و دی اکسید سرب ( $PbO_2$ ) (۲۵)،  $Ti/Pt$ ،  $Ti-Ru-$  و  $Sn-SbO_2$  و کربن (۹) برای تصفیه فاضلاب مطالعه نمودند و اظهار داشتند که نوع الکتروود از پارامترهای موثر و تاثیرگذار بر فرایند الکترواکسیداسیون است. در واقع این روش یک واکنش میانی است که به وسیله انتقال اتم‌های اکسیژن از آب در فاز محلول به مواد آلی رخ می‌دهد تا ماده اکسید شود. فرایند کلی

غیرمستقیم آلاینده‌هاست که تولید الکتریکی اکسیدان‌های قوی را در بر می‌گیرد و فرایند معتبرتری برای تجزیه مواد آلی سمی است. هم‌چنین نتایج بهتری را نسبت به الکترواکسیداسیون مستقیم فراهم می‌نماید (۲۶). روش‌های الکتروشیمیایی به طور موفقیت‌آمیزی در تصفیه فاضلاب‌های رنگی به کار گرفته شده‌اند، به عنوان مثال **Daneshvar** و همکاران در مطالعه خود توانستند در مدت زمان ۸ min با دانسیته جریان  $90 - 80 \text{ A/m}^2$  به میزان ۹۴٪ از شدت رنگ پساب شرکت پشم و پتوی نقش جهان تبریز را به وسیله روش الکتروشیمیایی با الکترودهای آهن حذف نمایند (۲۷). نکته قابل توجه در این مطالعه، زمان واکنش پایین و کارایی بالای حذف رنگ است که در مطالعه حاضر نیز هدف رسیدن به کارایی بالا در مدت زمان کم با الکترودهای گرافیت است. در مطالعه‌ای دیگر، **Jia** و همکاران با روش الکتروشیمیایی با الکترودهای فیبر کربن فعال (ACF) توانستند در مدت زمان ۶۰ min و با ولتاژ ۲۵ V، ۹۰٪ از رنگ و ۸۰٪ از COD را حذف نمایند (۲۰). گرچه کارایی فرایند مطلوب بود، اما زمان واکنش بسیار طولانی بود که می‌تواند هزینه‌های عملیاتی فرایند را افزایش دهد. **Radha** و همکاران در مطالعه‌ای که جهت کاهش الکتروشیمیایی مواد آلی فاضلاب نساجی با الکترودهای گرافیت به عنوان آند و الکترودهای فولاد ضد زنگ به عنوان کاتد انجام دادند، توانستند ۹۶٪ از رنگ و ۶۸٪ COD را در زمان واکنش ۶۰ min با جریان ۰/۶ A حذف نمایند (۱۲). بنابراین با توجه به عدم تجزیه‌پذیری بیولوژیکی رنگ‌ها در محیط زیست و عدم کارایی مناسب روش‌های متداول تصفیه در حذف رنگ از فاضلاب، لزوم استفاده از روشی مناسب جهت حذف رنگ از پساب‌های رنگی کاملاً مشهود است. با توجه به مزایای فرایندهای الکتروشیمیایی نسبت به سایر روش‌های حذف رنگ از فاضلاب، به نظر می‌رسد که این فرایند بتواند به عنوان روشی کارآمد، موثر و سازگار با محیط زیست مطرح گردد و مشکلات مربوط به سایر روش‌ها را برطرف نماید. بنابراین هدف از این مطالعه حذف رنگ‌های آلی از محیط‌های آبی با استفاده از روش الکترولیز با الکترودهای ۳ بعدی گرافیت بر اساس تولید در جای اسید هیپوکلرو و با در نظر گرفتن حذف کامل رنگ به منظور رسیدن به زمان مطلوب است که در آن از عامل رنگی

انتقال اکسیژن آندی به وسیله واکنش عمومی زیر رخ می‌دهد که در آن R واکنش‌کننده آلی و  $RO_x$  محصول اکسید شده است (معادله ۱) (۲۶).

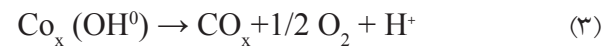


علاوه بر این R می‌تواند به وسیله معادله ۲ که به واکنش احتراق معروف است، معدنی شود (۲۶).

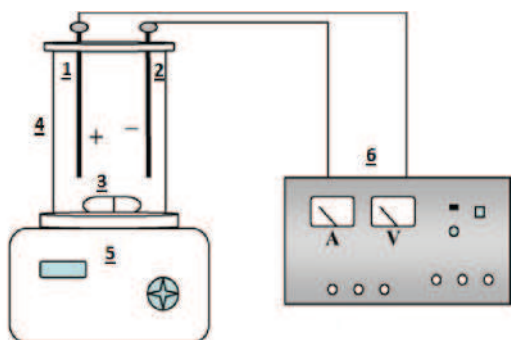


اگر الکترودهای مورد استفاده از نوع گرافیت باشند، در روی آند که فعالیت الکتروکاتالیتیک بالایی دارد، اکسیداسیون در سطح الکتروده اتفاق می‌افتد. در مرحله اول واکنش اکسیداسیون آندی،  $H_2O$  در آند تخلیه الکتریکی می‌شود تا رادیکال‌های هیدروکسیل را تولید نماید. به دنبال آن در مرحله دوم، رادیکال‌های هیدروکسیل با اکسیژنی که قبلاً در اکسید آند وجود دارد، واکنش می‌دهد. با امکان انتقال اکسیژن از رادیکال هیدروکسیل به اکسید آند، اکسید بالاتر  $CO_{x+1}$  شکل می‌گیرد. در سطح آند اکسیژن فعال می‌تواند در ۲ حالت ایجاد شود: ۱- به صورت جذب فیزیکی (رادیکال‌های هیدروکسیل جذب شده  $OH^\ominus$ )، ۲- به صورت جذب شیمیایی (اکسیژن در شبکه  $MO_{x+1}$ ) (۱۰).

در حضور مواد آلی قابل اکسایش، مطابق با واکنش‌های ۳-۶ جذب فیزیکی اکسیژن فعال ( $OH^\ominus$ ) باعث مصرف کامل مواد آلی می‌شود و جذب شیمیایی در تشکیل محصولات اکسیداسیون انتخابی مشارکت می‌کند (۱۰).



مسیر جذب فیزیکی اکسیداسیون، یک روش قابل اجرا برای تصفیه فاضلاب است، زیرا شکل پر اکسیدهای هیدروژن آلی، نسبتاً ناپایدار است که تجزیه چنین مداخله‌کننده‌هایی منجر به شکست مولکولی و تشکیل مداخله‌کننده‌های بعدی با تعداد کربن کمتر می‌شود و این واکنش‌های متوالی ادامه می‌یابند تا این که دی اکسید کربن و آب تشکیل شوند (۱۰). الکترولیز اغلب انرژی زیادی را مصرف می‌کند، به همین دلیل روش‌های موثر الکتروشیمیایی برای تصفیه آب بر اساس الکترواکسیداسیون



شکل ۱: نمای راکتور الکتروشیمیایی مورد استفاده در مطالعه (۱- آند، ۲- کاتد، ۳- میله مگنت، ۴- راکتور، ۵- همزن مغناطیسی، ۶- منبع برق مستقیم)

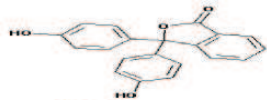
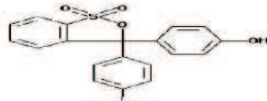
و فنل رد از دسته شناساگرهای سولفون فتالئین بوده که در محیط اسیدی و قلیایی به ترتیب زرد و قرمز است. تمامی ترکیبات شیمیایی مورد استفاده ساخته شرکت مرک آلمان بود. مشخصات مواد رنگزای مورد استفاده در جدول ۱ آمده است. تجهیزات مربوط به واحد الکترولیز شامل یک محفظه شیشه‌ای به شکل مکعب مستطیل در اندازه  $14 \times 11/5 \times 11/5$  cm با حجم موثر ۱ L بود که در آن ۲ عدد الکتروود آند و کاتد از جنس گرافیت به ابعاد  $1 \times 13/5 \times 1$  cm قرار گرفتند و به منظور تامین انرژی به یک ترانس مبدل برق متناوب به مستقیم متصل گردیدند. سپس کل راکتور به منظور ایجاد اختلاط بر روی یک همزن مغناطیسی قرار گرفت (شکل ۱). pH مربوط به پساب حاوی رنگ فنل فتالئین با استفاده از محلول NaOH یک نرمال در محدوده ۹ و فنل رد در محدوده ۶/۵ تنظیم شد. در هر مرحله از آزمایش مخزن با ۹۰۰ mL از پساب رنگی پر گردید و تاثیر پارامترهای ولتاژ (۱۲، ۲۴V و ۴۸)، فاصله بین الکتروود (۷، ۵، ۳cm و ۹) و غلظت الکتروولیت (۰/۹۹) NaCl ( $0, 1/5, 1$  g/L) بر حذف کامل رنگ از نقطه

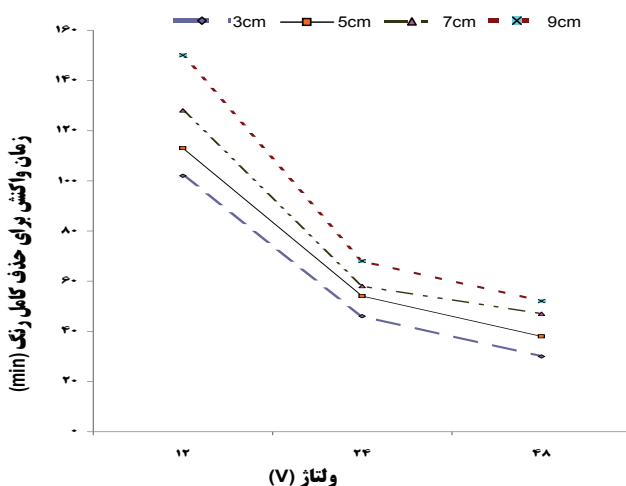
فنل فتالئین و فنل رد به عنوان شاخص‌های رنگ آلی استفاده شده است.

### مواد و روش‌ها

این مطالعه در تابستان ۱۳۸۸ به صورت تجربی و در مقیاس آزمایشگاهی در آزمایشگاه آب و فاضلاب دانشکده بهداشت دانشگاه شهید بهشتی و درون راکتور الکتروشیمیایی به صورت ناپیوسته انجام گردید. پساب مورد استفاده در این مطالعه به طور سنتتیک از انحلال  $0/25$  mL محلول فنل فتالئین (Phenolphthalein)،  $0/5$  g فنل فتالئین خالص در  $100$  mL الکل اتیلیک (۹۷٪) با فرمول شیمیایی  $C_{20}H_{14}O_4$  و انحلال  $5$  g فنل رد خالص (Phenol red) با فرمول شیمیایی  $C_{19}H_{14}O_5S$  در یک لیتر آب آشامیدنی تهیه گردید. این رنگ‌ها از ترکیبات آلی هستند که به عنوان شناساگر استفاده می‌شوند. فنل فتالئین از معرف‌های مهم است که در محیط‌های اسیدی، بازی و بازی شدید به ترتیب بی‌رنگ، ارغوانی و بی‌رنگ است

جدول ۱: مشخصات مواد رنگزای مصرفی

ماده رنگزا	ساختمان شیمیایی	گروه شیمیایی	ماکزیم طول موج (nm)	وزن مولکولی (g/mol)
فنل فتالئین		هیدروکسیل تری آریل متان	۵۵۲	۳۱۸/۳۲
فنل رد		تری آریل متان	۴۳۱	۳۵۴/۳۹

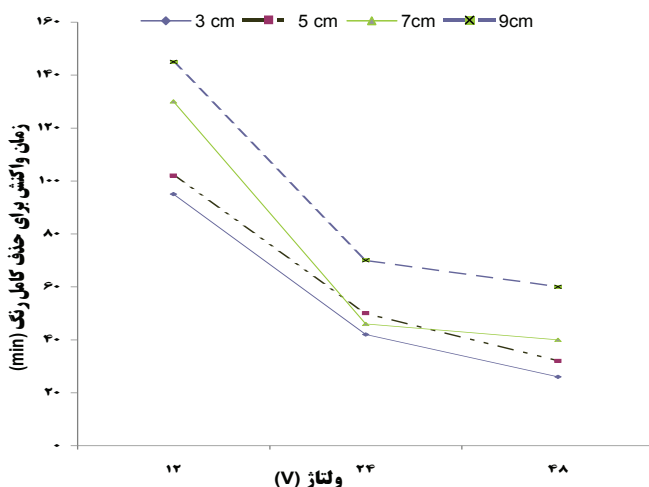


شکل ۲: تاثیر ولتاژ بر حذف رنگ فنل فتالئین براساس زمان واکنش در فواصل مختلف ۳، ۵، ۷ و ۹ (بدون افزودن نمک)

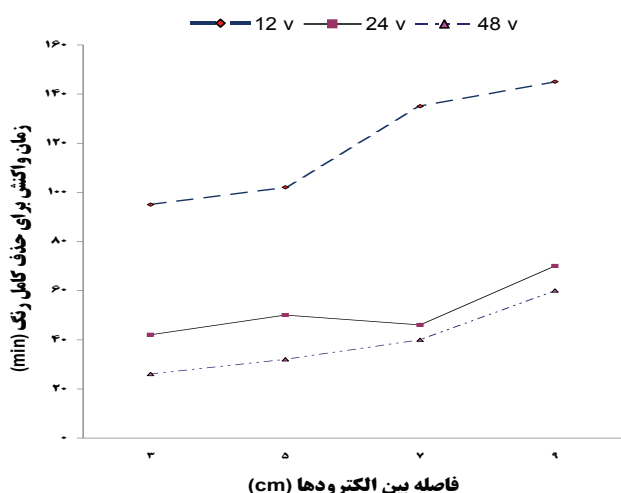
### یافته‌ها

در مطالعه انجام شده، فرایند الکترولیز با استفاده از الکترودهای گرافیت برای رنگ زدایی فنل فتالئین و فنل رد استفاده گردید. تاثیر متغیرهای ولتاژ، غلظت نمک NaCl و فاصله بین الکترودها بر راندمان حذف بر اساس زمان مورد نیاز جهت حذف کامل رنگ مورد بررسی قرار گرفت که نتایج در شکل‌های ۲-۷ نمایش داده شده است. به منظور بررسی اثر ولتاژ، آزمایشات در ۳ محدوده ولتاژ ۱۲، ۲۴V و ۴۸ مورد بررسی قرار گرفت. شکل‌های ۲ و ۳ تاثیر ولتاژ بر زمان مورد نیاز برای حذف کامل رنگ را نشان می‌دهد. همان طور که از شکل‌ها مشاهده می‌شود، با افزایش ولتاژ اعمال شده در دو سر الکترودها از ۱۲ - ۴۸ V در هر فاصله از الکترودها حذف هر دو نوع رنگ فنل فتالئین و فنل رد، زمان کمتری را به خود

نظر زمان ماند مناسب بررسی گردید. در طی آزمایشات از درون راکتور تا زمان رسیدن به حذف کامل رنگ، در زمان‌های مختلف نمونه برداری به عمل آمد. پارامترهای مورد نظر مطابق با روش‌های استاندارد برای آزمایشات آب و فاضلاب (pH با استفاده از دستگاه pH متر Corning 120، COD با روش Open Reflux-Colorimetric-5220B و رنگ فنل فتالئین و فنل رد به ترتیب در طول موج‌های ۵۵۲ و ۴۳۱ nm با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر DR5000 با حد تشخیص ۰/۰۰۱) اندازه‌گیری شد (۲۸). هر کدام از آزمایشات ۳ بار تکرار گردید و تاثیر متغیرها بر زمان حذف کامل رنگ فنل فتالئین و فنل رد با استفاده از نرم‌افزار SPSS (Version 18) تعیین و نمودارهای مربوط با استفاده از نرم‌افزار Excel ترسیم شد.



شکل ۳: تاثیر ولتاژ بر حذف رنگ فنل رد بر اساس زمان واکنش در فواصل مختلف ۳، ۵، ۷ و ۹ (بدون افزودن نمک)



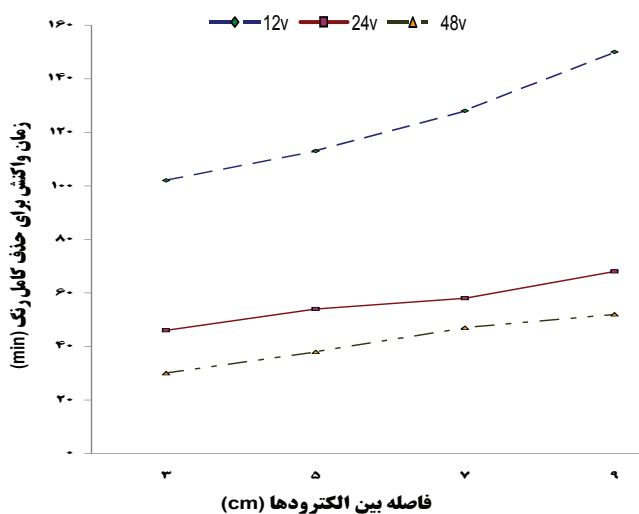
شکل ۴: تاثیر فاصله بین الکترودها بر حذف رنگ فنل فتالئین بر اساس زمان واکنش در ولتاژهای مختلف ۱۲ V، ۲۴ و ۴۸

بر زمان مورد نیاز برای حذف کامل رنگ فنل فتالئین معنی دارست. شکل‌های ۴ و ۵ تاثیر فاصله بین الکترودها بر حذف کامل رنگ در ولتاژهای مختلف را نشان می‌دهد، همان‌گونه که مشاهده می‌شود، هنگامی که فاصله بین الکترودها از ۳ cm تا ۹ افزایش می‌یابد، با توجه به ولتاژ، زمان واکنش نیز افزایش و راندمان حذف رنگ کاهش می‌یابد، به طوری که با افزایش فاصله بین الکترودها از ۳ cm تا ۹ در ولتاژ ۲۴ V زمان واکنش از ۴۲ به ۶۸ برای ۷۰ min برای رنگ فنل فتالئین و از ۴۶ min به ۶۸ برای فنل رد افزایش یافت.

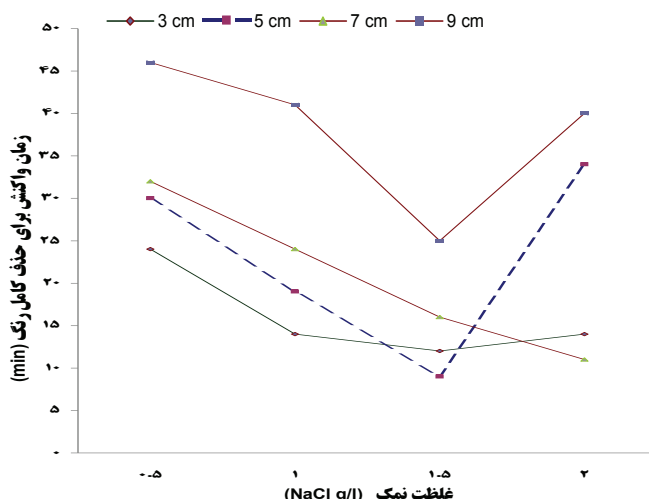
اثر غلظت نمک NaCl بر زمان واکنش برای حذف کامل رنگ در شکل‌های ۶ و ۷ در فواصل مختلف نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل‌ها مشاهده می‌شود، افزایش مواد محلول

اختصاص می‌دهد. به طوری که برای رنگ فنل فتالئین، در فاصله ۳ cm با ولتاژ ۴۸ V، زمان واکنش ۲۶ min و در همین فاصله با ولتاژ ۱۲ V، زمان واکنش به ۹۵ min افزایش یافته است.

هم‌چنین به طور مشابه برای رنگ فنل رد، در فاصله ۳ cm با ولتاژ ۴۸ V، زمان واکنش ۳۰ min و در همین فاصله با ولتاژ ۱۲ V، زمان واکنش به ۱۰۲ min افزایش یافته است. به عبارت دیگر در ولتاژ ۴۸ V و در فاصله ۳ cm راندمان حذف رنگ‌های فنل فتالئین و فنل رد نسبت به ولتاژ ۱۲ V به ترتیب ۷۲٪ و ۷۰٪ افزایش یافته است، با استفاده از آنالیز واریانس فاکتوریل اثر ولتاژ و فاصله الکترودها بر زمان مورد نیاز برای حذف کامل رنگ فنل فتالئین و فنل رد در سطح ۰/۰۵ معنی دارست. هم‌چنین اثر متقابل ولتاژ ۲۴ V و فاصله ۷-۵ cm



شکل ۵: تاثیر فاصله بین الکترودها بر حذف رنگ فنل رد بر اساس زمان واکنش در ولتاژهای مختلف ۱۲، ۲۴ و ۴۸



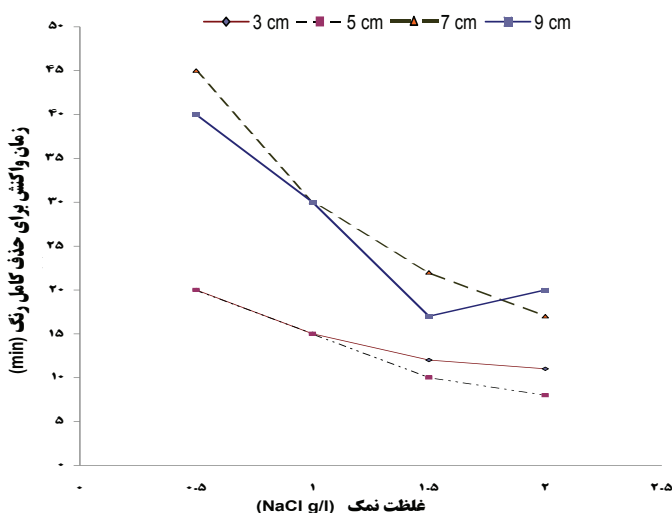
شکل ۶: تاثیر غلظت نمک NaCl بر حذف رنگ فنل فتالئین بر اساس زمان واکنش در فواصل مختلف ۳، ۵، ۷ و ۹ با ولتاژ ثابت ۷۸ v

بهتری را نشان داد. با استفاده از آنالیز واریانس فاکتوریل، اثر غلظت نمک و فاصله الکترودها بر زمان مورد نیاز برای حذف کامل رنگ فنل فتالئین و فنل رد در سطح ۰/۰۵ معنی دارست. هم چنین اثر متقابل غلظت نمک ۱/۵ g/L در فاصله ۳ cm تا ۵ و نیز غلظت نمک ۲ g/L در فاصله ۳ cm تا ۷ بر زمان مورد نیاز برای حذف کامل رنگ فنل فتالئین و غلظت نمک ۲ g/L در فاصله ۷ cm تا ۹ بر زمان مورد نیاز برای حذف کامل رنگ فنل رد در سطح ۰/۰۵ معنی دارست.

### بحث

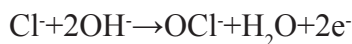
افزایش راندمان فرایند با افزایش ولتاژ می تواند به تخریب آلاینده های آلی در پساب در اثر اکسیداسیون الکتروشیمیایی

در آب، زمان واکنش را در فواصل مختلف کاهش می دهد، به طوری که با افزایش غلظت نمک NaCl از ۰/۵ تا ۲، زمان واکنش برای حذف کامل رنگ فنل رد در فاصله ۳ cm بین الکترودها، ۴۵٪ و به طور مشابه برای حذف کامل رنگ فنل فتالئین، ۴۲٪ کاهش می یابد و بنابراین راندمان حذف رنگ افزایش می یابد. بهترین شرایط برای حذف کامل رنگ فنل رد در فاصله ۵ cm و با غلظت نمک ۲ g/L حاصل شد که زمان واکنش در آن ۸ min بود و نسبت به غلظت نمک ۱/۵ g/L، ۶۰٪ راندمان بهتری را نشان داد. شرایط بهینه برای حذف کامل رنگ فنل فتالئین در شرایط غلظت نمک ۱/۵ g/L و فاصله ۵ cm حاصل شد که در آن زمان واکنش ۹ min بود و نسبت به شرایط مشابه با غلظت نمک ۰/۵ g/L، ۷۰٪ راندمان



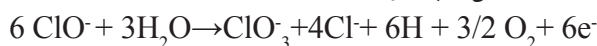
شکل ۷: تاثیر غلظت نمک NaCl بر حذف رنگ فنل رد بر اساس زمان واکنش در فواصل مختلف ۳، ۵، ۷ و ۹ با ولتاژ ثابت ۷۸ v

می‌گذارد. افزایش جریان الکترولیت می‌تواند تجزیه مواد آلی و هم‌چنین بعضی واکنش‌های جانبی مانند تولید  $H_2$  در کاتد را بهبود بخشد (۲۰). به طور کلی از نمک  $NaCl$  برای تامین هدایت الکتريکی در فرایندهای الکتروشیمیایی استفاده می‌شود (۲۴). هنگامی که غلظت نمک  $NaCl$  در محلول افزایش می‌یابد، هدایت الکتريکی و دانسیته جریان نیز افزایش یافته و در نتیجه از ولتاژ لازم برای تامین دانسیته جریان معین و زمان واکنش کاسته می‌شود؛ بنابراین انرژی الکتريکی مصرفی را کاهش می‌دهد (۲۴). واکنش‌های اصلی که در طی اکسیداسیون آندیک با ترکیبات آلی در حضور  $NaCl$  رخ می‌دهد عبارت است از:

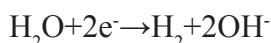


۱- در آند

۱-۱- تشکیل هیپوکلریت



۱-۲- تشکیل کلرات

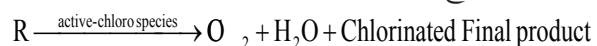


۱-۳- تکامل اکسیژن

۲- در کاتد

- تکامل هیدروژن

۳- در محلول یا نزدیک سطح آند اکسیداسیون غیر مستقیم ترکیبات آلی رخ می‌دهد.



علاوه بر این، حضور یون کلرور در الکترولیت منجر به اکسیداسیون غیر مستقیم آلاینده‌ها می‌شود، زیرا در طی الکترولیز یک محلول نمکی محصولاتی مانند:



تولید می‌شود.

رادیکال‌های  $OH^0, O^0, ClOH^0$  عمر خیلی کوتاهی دارند و به دلیل داشتن پتانسیل بالای اکسیداسیون خود می‌توانند اکسیدان‌های دیگر ( $Cl_2, ClO_2, O_3, H_2O_2, O_2, H_2$ ) را تجزیه کنند و یا ترکیبات آلی را اکسید نمایند. اکسیدان‌های اولیه ( $Cl_2$  و  $O_2$ ) و ثانویه ( $ClO_2, O_3, H_2O_2$ ) که از تخریب رادیکال‌ها تولید می‌شوند عمر طولانی دارند و درون محیط دور از الکترودها پخش می‌شوند و فرایند اکسیداسیون را انجام می‌دهند (۲۵). مطالعات نشان داده است که گرافیت به عنوان آند به طور موفقیت‌آمیزی

به دلیل تشکیل یک میدان الکتريکی قوی و تولید رادیکال‌های آزاد مانند  $H_2O_2, OH^0, O^0, H^+$  در ولتاژهای بالاتر نسبت داده شود، زیرا این امر زمان انجام فرایند را کاهش می‌دهد (۲۰). افزایش ولتاژ سلول، پتانسیل آند را افزایش داده، در نتیجه اکسیداسیون آند و سرعت واکنش را افزایش می‌دهد (۲۱). **Daneshvar** و همکاران نیز در مطالعه‌ای که جهت حذف رنگ نارنجی ۲ با روش انعقاد الکتريکی انجام دادند به این نتیجه رسیدند که حذف رنگ از فاضلاب با افزایش ولتاژ رابطه مستقیم دارد (۴). گزارش **Dalvand** و همکاران نیز حاکی از آن است که استفاده از روش الکتروشیمیایی با ایجاد عوامل اکسید کننده در ولتاژ  $40 V$  پس از  $30 \text{ min}$  به طور موثری منجر به حذف  $99.04\%$  از رنگ ری اکتیو قرمز ۱۹۸ گردید (۲۲).

در فرایند الکترولیز، بین ولتاژ سلول، دانسیته جریان و فاصله بین الکترودها رابطه نزدیکی وجود دارد. با افزایش فاصله بین الکترودها، جریان الکتريکی افزایش می‌یابد. بنابراین برای دستیابی به یک دانسیته جریان معین، ولتاژ باید افزایش یابد (۴). این افزایش ولتاژ به علت افزایش مقاومت محلول است که در اثر ثابت ماندن مقدار الکترولیت و افزایش فاصله الکترودها، راندمان حذف کاهش می‌یابد (۲۳). این کاهش راندمان و یا افزایش زمان واکنش می‌تواند به دلیل کاهش جذب داخلی رادیکال‌های هیدروکسیل و کاهش جذب الکترواستاتیک باشد (۴). با کم شدن فاصله، مکان‌های برهم‌کنش و واکنش به موجب افزایش موضعی غلظت، افزایش یافته و راندمان حذف افزایش می‌یابد (۲۳). همان‌طور که در شکل‌های ۴ و ۵ مشاهده می‌شود با کاهش فاصله، زمان لازم برای حذف کامل هر دو نوع رنگ کاهش می‌یابد که این پدیده به دلیل تسریع تخلیه آنیون‌ها بر روی الکتروود آند در فاصله کمتر است (۲۱). **Dalvand** و همکاران نیز در مطالعه خود جهت حذف رنگ راکتیو ۱۹۸ از پساب نشان دادند، زمانی که فاصله بین الکترودها از  $1 \text{ cm}$  به  $3 \text{ min}$  در زمان تماس  $30 \text{ min}$  افزایش یافت، بازده حذف رنگ از  $99\%$  به  $74\%$  کاهش یافت (۲۲).

مطالعات مختلف نشان داد که غلظت نمک موجود در محلول برای انجام فرایند الکترولیز اهمیت خاصی دارد، زیرا جریان الکترولیت را تعیین می‌کند و بر کارایی حذف آلاینده‌ها تاثیر



## تشکر و قدردانی

این مقاله حاصل بخشی از طرح پژوهشی با عنوان "طراحی، ساخت و ارزیابی دستگاه گندزدایی آب به روش الکترولیز" پیرو مصوبه جلسه ۱۸۳ مورخ ۱۳۸۶/۷/۱ مصوب دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی و درمانی شهید بهشتی بوده که با حمایت دانشگاه مذکور اجرا شده است و در کلیه مراحل آزمایشگاهی آن از امکانات آزمایشگاه آب و فاضلاب دانشکده بهداشت دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی استفاده گردیده، بدین وسیله از معاونت محترم پژوهشی دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی و پرسنل محترم آزمایشگاه دانشکده بهداشت تشکر و قدردانی می‌نماییم.

می‌تواند اکسیدانت‌های میانی را برای حذف آلاینده‌ها تولید نماید (۲۶)؛ پس در این مطالعه، کارایی بالای حذف رنگ از پساب به تولید عوامل اکسید کننده فوق نسبت داده می‌شود. علاوه بر اندازه‌گیری حذف رنگ، COD مربوط به رنگ‌های فنل فتالین و فنل رد قبل از انجام آزمایشات و در شرایط بهینه ولتاژ ۴۸ V، فاصله بین الکترود ۵ cm در غلظت‌های نمک ۲ g/L برای فنل رد و ۱/۵ g/L برای فنل فتالین مطابق با روش‌های استاندارد، اندازه‌گیری شد، همان‌طور که در شکل ۷ نشان داده شده است، میزان کاهش COD برای فنل رد ۵۵٪ و برای فنل فتالین ۶۸٪ حاصل شد.

نتایج حاصل از این مطالعه و پژوهش‌های مشابه نشان می‌دهد که امکان استفاده از روش‌های الکتروشیمیایی برای حذف رنگ وجود دارد، اما در اغلب موارد بررسی‌های اقتصادی هم زمان با بررسی‌های تکنیکی صورت پذیرفته است؛ بنابراین پیشنهاد می‌گردد که مطالعات بیشتری جهت برآورد هزینه‌های مربوط به این روش انجام گردد.

## نتیجه‌گیری

فرایند الکترولیز جهت رنگ‌زدایی فنل رد و فنل فتالین از محلول‌های آبی انجام گردید و طی آن اثر پارامترهای عملیاتی مختلف از جمله ولتاژ، فاصله بین الکترود و غلظت نمک NaCl، بر کارایی حذف رنگ از نقطه نظر زمان مورد نیاز مطالعه شد. نتایج نشان داد که زمان واکنش جهت حذف کامل رنگ از پساب با پارامتر ولتاژ و غلظت نمک NaCl رابطه معکوس و با فاصله بین الکترودها رابطه مستقیم دارد.

بهترین شرایط عملیاتی در حذف کامل رنگ فنل فتالین از پساب ولتاژ ۴۸ V، زمان ماند ۹ min، فاصله بین الکترود ۵ cm و غلظت نمک ۱/۵ g/L و برای فنل رد ولتاژ ۴۸ V، زمان ماند ۸ min، فاصله بین الکترود ۵ cm و با غلظت نمک ۲ g/L به دست آمد. تحت این شرایط راندمان حذف COD برای فنل فتالین و فنل رد به ترتیب ۸۵٪ و ۸۰٪ به دست آمد.

## منابع

- 1- Zin, NSB. Decolorization of dye solution containing azo acid orange 7 by electricity [dissertation]. Malaysia: Faculty of Civil Engineering University Technology Malaysia; 2005:7-10.
- 2- Daneshvar N, Vatanpour V, Khataee AR, Rasoulifard MH, Rastegar M. Decolorization of mixture of dyes containing malachite green and orange II by fenton-like reagent. Journal of Color Science and Technology. 2008;1:83-89.
- 3- Chen X, Chen G, Yue PL. Investigation on the electrolysis voltage of electrocoagulation. Journal of Chemical Engineering Science. 2002;57:2449-2455.
- 4- Daneshvar N, Ashassi-Sorkhabi H, Tizpar A. Decolorization of orange II by electrocoagulation method. Journal of Separation and Purification Technology. 2003;31:153-62.
- 5- Dalvand A, Jonidi jafari A, Gholami M, Ameri A, Mahmoodi NM. Treatment of Synthetic Wastewater Containing Reactive Red 198 by Electrocoagulation Process. Iranian Journal of Health and Environment. 2011;4(1):11-22 (in Persian).
- 6- Diez MC, Mora ML, Videla S. Adsorption of phenolic compounds and color from bleached Kraft mill effluent allophonic compounds. Journal of Water Research. 1999;33(1):125-30.
- 7- Clark T, Bruce M, Anderson S. Decolorization of extraction stage bleach plant effluent by combined hypochlorite oxidation and anaerobic treatment. Journal of Water Science Technology. 1994;29(5-6):421-32.
- 8- Kobya M, Can OT, Bayramoglu M. Treatment of textile wastewaters by electrocoagulation using iron and aluminum electrodes. Journal of Hazardous materials. 2003;100:163-78.
- 9- Naddafi K, Nabizadeh Nodehi R, Jahangiri rad M. Removal of Reactive Blue 29 Dye from Water by Single-Wall Carbon Nanotubes. Iranian Journal of Health and Environment. 2011;3(4):359-68 (in Persian).
- 10- Panizza M, Bocca C, Giacomo C. Electrochemical treatment of wastewater containing polyaromatic organic pollutants. Journal of Water Research. 2000;34(9):2601-605.
- 11- Radha KV, Sridevi V, Kalaivani K. Electrochemical oxidation for the treatment of textile industry wastewater. Journal of Bioresource Technology. 2009;100:987-90.
- 12- Vlysside AG, Papaioannou D, Loizidou M, Karlis PK, Zorpas AA. Testing an electrochemical method for treatment of textile dye wastewater. Journal of Waste Management. 2000;20:569-57.
- 13- Zaroual Z, Azzi M, Saib N, Chaint E. Contribution to the study of electrocoagulation mechanism in basic textile effluent. Journal of Hazardous materials. 2005;131:73-78.
- 14- Rajeshwar K, Ibanez J G, Swain G M. Electrochemistry and environment. Journal of applied electrochemistry. 1994;24:1077-91.
- 15- Jia J, Yang J, Liao J, Wang W, Wang Z. Treatment of dyeing wastewater with ACF electrodes. Journal of Water Research. 1999;33(3):881-84.
- 16- Chandra mouli P, Venkata Mohn S, Jayarama Reedy S. Electrochemical processes for remediation of wastewater and contaminated soil: emerging technology. Journal of Scientific & Industrial research. 2004;63:11-19.
- 17- Daneshvar N, jafarzadeh N. Treatment of textile wastewater containing basic dyes by electrocoagulation process. Journal of Water and wastewater. 2009;57:22-29. (in Persian).
- 18- Ahmadi Moghadam M, Amiri H. Investigation of TOC Removal from Industrial Wastewaters using Electrocoagulation Process. Iranian Journal of Health and Environment. 2010;3(2):185-94 (in Persian).
- 19- Eaton, AD, Clesceri L.S, Greenberg A.E. Standard Methods for the Examination of water and wastewater. 20th ed. American public Health Association; 1998.
- 20- Ugurlu M, Karaoglu M H, Kula I. Experimental investigation of chemical oxygen demand, lignin and phenol removal from paper mill effluents using three-phase three-dimensional electrode reactor. Journal of Environ.Stud. 2006;15(4):647-54.

- 21- Li Xu , Wei Wang, Mingyu Wang, Yongyi Cai. Electrochemical degradation of tridecane dicarboxylic acid wastewater with tantalum-based diamond film electrode. *Journal of Desalination*. 2008;222:388–93.
- 22- Dalvand A, Gholami M, Joneidi A, Mahmoodi NM. Investigation of electrochemical coagulation process efficiency for removal of reactive red 198 from colored wastewater. *Journal of Color science and technology*. 2009; 3:97-105.(in Persian)
- 23- Malekotian M, Mansourian H J, Mousazadeh M. Performance evaluation of electrocoagulation process using rod iron electrodes for removal of hardness from drinking water. *Proceeding of the 12th national Environmental Health Conference;2009 Nov; Iran, Kerman*. (in Persian)
- 24- Sengil I A, Ozacar M. The Decolorization of C.I reactive black 5 in aqueous solution by electrocoagulation using sacrificial iron electrodes. *Journal of Hazardous Materials*. 2009 ; 161: 1369-76.
- 25- Vlyssides A G, Papaioannou D, Loizidou M, Karlis P, Zorpas A A. Testing an electrochemical method for treatment of textile dye wastewater. *Journal of Waste Management*. 2000; 20: 569-74.
- 26- Mohana N, Balasubramanian N, Basha C A. Electrochemical oxidation of textile wastewater and its reuse. *Journal of Hazardous Materials*. 2007;147:644–51.

# **Investigation the Efficiency of Electrolysis Process using 3 Dimensional Graphite Electrodes for Decolonization of Phenolphthalein and Phenol red from Aqueous Environments**

**\*Mohammad Reza Massoudinejad<sup>1</sup>, Hajar Sharifi<sup>1</sup>, Ashraf Mazaheri Tehrani<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Department of Environmental Health Engineering, Faculty of Health, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran

<sup>2</sup>Department of Environmental Health Engineering, Faculty of Health, Kashan University of Medical Sciences, Isfahan, Iran

Received; 02 April 2012 Accepted; 01 July 2012

## **ABSTRACT**

**Background and Objectives:** The presence of chemical dyes in the water resources not only pollutes them, but also brings about death of organisms and serious indemnities to the environment through stopping oxygen production and preventing penetration of the sunlight. In this study, we investigated the efficiency of the electrolysis process for decolonization of phenolphthalein and phenol red from aqueous environment.

**Materials and Methods:** The experiments were conducted in an electrochemical reactor having a working volume of 1 liter equipped with 2 graphite electrodes. This study was conducted at laboratory scale. Samples were prepared by dissolving two phenol red and phenolphthalein dyes in drinking water. Then, the effect of operating parameters such as voltage, inter-electrode distance, and NaCl concentration on the complete dye removal was determined considering optimum retention time using Factorial variance analyses and the graphs were plotted using MS Excel software.

**Results:** the results showed that the optimum conditions for completely removal of phenolphthalein was achieved applying a voltage of 48 V, the retention time of 9 minutes, 5 cm inter-electrode distance, and the salt concentration of 1.5 g/l, whereas, complete removal of phenol red was achieved applying a voltage of 48 V, the retention time of 8 minutes, 5 cm inter-electrode distance, and the salt concentration of 2 g/l. Under these conditions, COD removal efficiency for phenol red and phenolphthalein was 85 and 80 percent respectively.

**Conclusion:** This study revealed that electrolysis process is an effective method to remove both phenolphthalein and phenol red dyes from effluent, because it can completely remove the dyes in a short time.

**Keywords:** Electrolysis, Decolonization, Phenolphthalein, Phenol red

---

\*Corresponding Author: [massoudi@sbmu.ac.ir](mailto:massoudi@sbmu.ac.ir)

Tel: +98 21 22332040, Fax: +98 21 22432037