مقاله پژوهشی
مجله دانشگاه علوم پزشکی رفسنجان
دوره ۱۷، مرداد ۱۳۹۷، ۴۲۰-۴۰۷

بررسی کارایی فرآیند الکتروپرسولفات بهینه شده با پرکسیدهیدروژن در حذف COD فاضلاب بیمارستانی به کمک روش سطح پاسخ

بیژن بینا[۱]، یعقوب حاجی‌زاده[۲]، سارا کریمی[۳]، هاله احمدنیا[۴]، مریم مصرقانی[۵]

دریافت مقاله: ۹۶/۷/۴ ارسال مقاله به نویسنده جهت اصلاح: ۹۶/۱۰/۴ دریافت اصلاحیه از نویسنده: ۹۷/۲/۱۵ پذیرش مقاله: ۹۷/۳/۵

چکیده

زمینه و هدف: فاضلاب‌های بیمارستانی دارای ترکیبات مقاومی مثل عوامل میکروبی، دترژنت‌ها، ترکیبات آلی‌هالوژن دار، هورمون‌ها، آنتی بیوتیک‌ها، ایزوتوپ‌های رادیواکتیو است که از فعالیت‌های مختلف درمانی و تحقیقاتی تولید می‌گردد. هدف این مطالعه حذف اکسیژن مورد نیاز شیمیایی COD (Chemical Oxygen Demand) فاضلاب بیمارستانی توسط روش الکتروپرسولفات بهینه شده با استفاده از روش سطح پاسخ است.

مواد و روش‌ها: در این مطالعه آزمایشگاهی، از یک رآکتور الکتروشیمیایی مجهز به ۴ الکترود میله ای آهنی، متصل به یک منبع برق مستقیم به منظور حذف COD فاضلاب استفاده شد. متغیرهای مستقل (دانسیته جریان، غلظت پرسولفات، غلظت پرکسید هیدروژن و pH اولیه) در برابر حذف COD به عنوان متغیر پاسخ، توسط نرم‌افزار Design Expert 8.0.6 با روش سطح پاسخ، بررسی و مدل پیشنهادی توسط آنالیز واریانس ANOVA تحلیل شد.

یافته‌ها: کارآیی فرآیند حذف COD در شرایط بهینه در pH برابر با ۵/۲، غلظت پرسولفات ۳۱ میلی‌گرم در لیتر، دانسیته جریان ۴۰ میلی‌آمپر بر سانتی‌متر مربع و غلظت پرکسید هیدروژن ۴۵ میلی‌مول بر لیتر برابر با ۹۲/۶ درصد به‌دست آمد. میزان بالای ضریب تعیین برابر با ۹۲/۴ درصد و مقدار پایین ضریب تغییرات برابر با ۴/۵۸ درصد به‌دست آمد.

نتیجه‌گیری: روش سطح پاسخ نشان داد که بین مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل و نتایج حاصل از آزمایش‌ها تطابق وجود دارد. استفاده همزمان از دو واکنش‌گر (پرکسید هیدروژن و پرسولفات) راندمان حذف COD را افزایش می‌دهد. بنابراین به نظر می رسد، فرآیند الکتروپرسولفات با پرکسید هیدروژن یک روش کارآمد برای حذف COD فاضلاب باشد. طراحی آزمون به روش سطح پاسخ از طریق کاهش تعداد آزمون‌ها، بهترین شرایط حذف COD را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: الکتروپرسولفات، پرکسیدهیدروژن، COD ، فاضلاب بیمارستانی، روش سطح پاسخ

۱- استاد گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی اصفهان، اصفهان، ایران
۲- استادیار گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی اصفهان، اصفهان، ایران
۳- کارشناس مسئول گروه بهداشت محیط ، مرکز بهداشت غرب تهران، دانشگاه علوم پزشکی ایران ، تهران، ایران
۴- رئیس مرکز بهداشت غرب تهران، دانشگاه علوم پزشکی ایران ، تهران، ایران
۵- دانشجو دکترا بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی اصفهان، اصفهان، ایران
تلفن: ۶۶۰۲۳۰۴۱-۰۲۱، دورنگار: ۶۶۰۰۱۹۳۱-۰۲۱، پست الکترونیک: m_eserghany@yahoo.com

[Downloaded from journal.rums.ac.ir on 2026-10-15]

[DOR: 20.1001.1.17353165.1397.17.5.2.9]

مقدمه

فاضلاب بیمارستانی به دلیل فعالیت‌های بیمارستان در دو بخش درمان و غیر درمانی تولید می‌گردد. بنابراین به دو زیرمجموعه فاضلاب خانگی و فاضلاب ویژه تقسیم می‌گردد [۱]. فاضلاب خانگی شامل فاضلاب بخش‌های آشپزخانه، رختشوخانه و بخش‌های معمولی بیمارستان می‌باشد و فاضلاب ویژه، فاضلاب تولیدی در بخش‌های درمانی مانند اتاق عمل و بخش‌های تشخیصی مانند آزمایشگاه و واحدهای تحقیقی است [۲]. فاضلاب ویژه به‌دلیل دارا بودن خطرات بالقوه بهداشتی و زیست محیطی بایستی با روش‌های صحیح جمع‌آوری، تصفیه و پس از رسیدن به استاندارد تخلیه، دفع گردد [۴-۳].

کمیت و کیفیت فاضلاب تولیدی در بیمارستان‌ها به تعداد تخت فعال، قدمت بیمارستان، میزان دسترسی به آب، نوع خدمات و سرویس‌های موجود در بیمارستان تعداد و نوع بخش‌ها، شرایط آب و هوایی، وضعیت فرهنگی، قوانین و دستورالعمل‌های ملی و سیاست‌های مدیریتی بستگی دارد [۶-۵]. پارامترهای متداول ارزیابی کمی و کیفی فاضلاب بیمارستانی شامل سرانه مصرف آب به ازای هر تخت در روز، pH، دما ، میزان اکسیژن خواهی شیمیایی (COD)، میزان کسیژن خواهی بیوشیمایی (BOD) و کل جامدات معلق، میزان کلی فرم کل و کلی فرم مدفوعی است [۸-۷].

اخیراً مطالعات فراوانی جهت تصفیه فاضلاب بیمارستانی با کمک روش‌های فیزیکوشیمیایی، بیولوژیکی انجام شده است [۱۰-۹]. در مطالعه‌ای Snyder و همکاران از کربن فعال پودری (Powder *activated carbon*) (PAC) جهت حذف COD و ۶۶ ترکیبات دارویی، بهره جست و نشان داد که با ۵ mg/l کربن فعال با زمان تماس ۵ ساعت تنها ۹ ترکیب دارویی به راندمان حذف ۵۰ درصد می رسند و مشکل تصفیه و دفع لجن دفعی هم‌چنان باقی می‌ماند [۱۱].

در مطالعات مختلفی از فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته (AOPs) جهت تصفیه فاضلاب بیمارستانی استفاده شده است [۱۳-۱۲]. Liu و همکاران با استفاده از فرآیند الکترواکتیوپرسولفات در تجزیه هیدروکلراید تتراسایکلین نشان داد که در ۲۴۰ دقیقه زمان تماس و میزان pH اولیه ۴/۲ و غلظت پرسولفات ۱۲/۶ میلی‌مول ۸۱ درصد تتراسایکلین حذف شد [۱۴].

به طور کلی فرآیندهای اکسیداسیون یکی از پیشرفته ترین، مؤثرترین و کارآمدترین فن‌آوری برای تجزیه و حذف آلاینده‌های آلی خطرناک، مقاوم و غیرقابل تجزیه بیولوژیکی در محیط‌های آبی می‌باشند و از جمله فرآیندهای AOP فرآیندهای فتوکاتالیستی، الکتروکواگولاسیون، ازن/پراکسید هیدروژن، واکنش‌های فنتون و فوتوفنتون برای حذف آلاینده‌ها از محیط آبی مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۱۶-۱۵]. مکانیسم اصلی این فرآیندها بر اساس تولید رادیکال‌های هیدروکسیل ($OH^{\bullet}$) می‌باشد. این رادیکال‌ها تقریباً قادرند اکثر ترکیبات آلی را با سرعت و غیر گزینشی اکسید نمایند. اخیراً فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته مبتنی بر تولید رادیکال سولفات ($SO4^{-\bullet}$) در حذف آلاینده‌های آلی مقاوم از محیط‌های آبی به طور چشمگیری مورد توجه قرار گرفته است [۱۷].

[Downloaded from journal.rums.ac.ir on 2026-10-15]

[DOR: 20.1001.1.17353165.1397.17.5.2.9]

رادیکال‌های سولفات معمولاً از طریق فعال‌سازی اکسیدان‌هایی از قبیل [پروکسی منو سولفات (PMS, HSO_5^-) یا اوکسون (HSO_5^- ,Oxone)] و [پروکسی دی سولفات (PDS, $S_2O_8^{2-}$) یا پرسولفات ($S_2O_8^{2-}$,PS)] با استفاده از حرارت، اشعه ماورا بنفش، امواج اولتراسونیک، یون‌های فلزی واسطه مثل Co^{2+} , Fe^{2+} را تولید کنند [۱۸]. پراکسیدهای H_2O_2، PS و PMS دارای ساختار مشابهی بوده و همگی دارای پیوند O-O می‌باشند. یک اتم هیدرژون در H_2O_2 بوسیله SO_3 برای تولید HSO_5^- و دو اتم هیدرژون در H_2O_2 بوسیله SO_3 برای تشکیل $S_2O_8^{2-}$ جایگزین شده است [۱۴]. هر سه این پروکسیدها توانایی محدودی برای اکسیداسیون ترکیبات آلی به صورت تنها و مستقل را دارند، اما با استفاده از یک فعال کننده می‌توانند رادیکال‌های سولفات و هیدروکسیل را با پتانسیل اکسیداسیون و احیاء به ترتیب (۲/۵-۳/۱۷ V) و(۱/۸ -۲/۷۷ V) تولید نمایند که توانایی اکسید نمودن اکثر آلاینده‌های آلی را درتصفیه آب و فاضلاب دارند [۲۰-۱۹].

به طور کلی مزایای فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته بر اساس رادیکال سولفات) (SR-AOPs نسبت به فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته بر اساس رادیکال هیدروکسیل (HR-AOPs) عبارتند از: ۱) رادیکال‌های سولفات (E_o = 2.5-3.1 V) اکسید کننده بسیار کارآمد، مؤثرتر و قوی‌تر از رادیکال‌های هیدروکسیل (E_o = 1.89-2.72 V) می‌باشند. ۲) رادیکال‌های سولفات (half-life =30-40 µs) نسبت به رادیکال‌های هیدروکسیل (half-life =10^{-3} µs) دارای نیمه عمر طولانی‌تر می‌باشند. ۳) رادیکال‌های سولفات نسبت به رادیکال‌های هیدروکسیل قابلیت انتخابی (گزینشی) بیشتری برای اکسیداسیون ترکیبات آلی مورد هدف دارد. ۴) رادیکال‌های سولفات پس از اکسیداسیون به سولفات غیر سمی‌تبدیل می‌شوند؛ بنابراین به هیچ گونه تصفیه بعدی نیاز ندارند [۲۲-۲۱]. بنابراین پرسولفات سدیم ($Na_2S_2O_8$) که در این تحقیق به عنوان منبع پراکسید استفاده می‌شود، یک عامل اکسید کننده پایدار و قوی می‌باشد (E^o = 2.01 V) که با قابلیت حلالیت بالا می‌تواند به طور کامل‌تری بوسیله SO_4^- تجزیه و اکسید شوند [۲۴-۲۳].

هدف این مطالعه بهینه‌سازی فرآیند الکتروپرسولفات با استفاده همزمان واکنش‌گر پرکسید هیدروژن در کاهش بارآلی فاضلاب بیمارستانی با کمک آنالیز روش سطح پاسخ می‌باشد.

مواد و روش‌ها

این مطالعه آزمایشگاهی به صورت طرح پایلوت در سیستم ناپیوسته انجام شد. نمونه فاضلاب مورد آزمایش از پساب حاصل از سیستم لجن فعال یک بیمارستان واقع در مناطق جنوبی شهر تهران در سه نوبت در اواسط هر ماه طی فصل زمستان ۹۴ برداشت گردید. نمونه در شرایط استاندارد به آزمایشگاه معتمد محیط زیست منتقل و مورد آزمایش قرار گرفت. پارامتر (pH - دما – هدایت الکتریکی) در محل توسط دستگاه پورتابل pH متر Hack(HQ-USA)، EC متر مدل Lovibond آلمان قرائت گردید. به منظور تعیین دیگر پارامترها نظیر (کل جامدات معلق – میزان اکسیژن خواهی شیمیایی (COD) – میزان

[Downloaded from journal.rums.ac.ir on 2026-10-15]
[DOR: 20.1001.1.17353165.1397.17.5.2.9]

اکسیژن خواهی بیولوژیکی (BOD) - تعداد کل کلی فرم و کلی فرم مدفوعی) مطابق کتاب روش‌های استاندارد آب و فاضلاب مورد آزمایش و تعیین گردید [۲۵] و تجهیزات مربوط به واحد الکتروشیمیایی شامل یک مخزن به ابعادcm ۱۰×۱۰×۱۱ از جنس پلکسی گلاس و با حجم مؤثر ۸۸۷ میلی‌لیتر بود. ۴ عدد الکترود آهنی میله‌ای به ابعاد (۱۰×۱cm) و سطح مؤثر cm^2 ۱۱۳/۰۴ با فاصله cm ۱/۳در داخل مخزن قرار گرفته‌اند. الکترودها با آرایش تک قطبی و به صورت موازی به یک منبع تغذیه جهت تبدیل برق شهری به جریان مستقیم متصل شدند. جهت سنجش مشخصات جریان از یک مولتی‌متر دیجیتال استفاده شد. جهت اندازه‌گیری میزان اکسیژن خواهی شیمیایی (COD) از دستگاه اسپکتوفتومتر (Hack USA--DR5000 استفاده گردید.

در هر بار آزمایش راکتور با ۸۸۰ میلی‌لیتر فاضلاب پر شد. به منظور بررسی تأثیر پارامترهای مستقل بر میزان کارایی فرآیند، آزمایش در مقادیر مختلف pH، دانسیته جریان، غلظت $Na_2S_2O_8$ و غلظت پرکسیدهیدروژن انجام گرفت. نمونه‌ها پس از ۶۰ دقیقه از میانه راکتور برداشت شدند و از یک فیلتر ۴۵/ میکرونی عبور و میزان COD قرائت گردید. درطی واکنش از یک همزن مغناطیسی با دور rpm ۲۰۰ استفاده شد. کلیه آزمایشات در دمای محیط انجام گرفت. مواد مورد استفاده در این مطالعه عبارتند از محلول پرکسید هیدروژن (۳۵ درصد)، پرسولفات سدیم ($Na_2S_2O_8$) (۹۸ درصد)، اسید سولفوریک و هیدروکسید سدیم از شرکت مرک آلمان تهیه شده بود.

در این مطالعه از روش سطح پاسخ بر مبنای طراحی باکس بنکن جهت ارزیابی اثر متغیرهای مستقل بر متغیر پاسخ و پیشگویی بهترین مقدار پاسخ استفاده شد. در این روش با تعیین حدود بیشینه و کمینه برای هر متغیر، ماتریس آزمایش طراحی گردید [۲۷] به این ترتیب تعداد آزمون‌ها و سطوح هر متغیر مشخص شد به ویژه زمانی که تعداد متغیرها زیاد باشد [۲۸] این روش در مقایسه با روش‌های پرحجمی‌مانند فاکتوریل کامل بدلیل ۱) کاهش تعداد آزمون‌ها، ۲) نتایج آماری قابل اعتماد، ۳) تسهیل و ساده‌سازی روند تحقیق، ۴)کاهش زمان و هزینه‌ها، ۵) مشخص کردن حساسیت پاسخ در برابر هر فاکتور و ۶) بررسی متغیرهای پیوسته مزیت دارد [۲۹] در مطالعه حاضر، غلظت پرسولفات ($Na_2S_2O_8$)، میزان دانسیته جریان، غلظت پرکسیدهیدروژن، pH اولیه واکنش متغیرهای مستقل واکنش بودند و میزان حذف COD به عنوان متغیر پاسخ مورد مطالعه قرار گرفت. جهت طراحی آزمایشات و شرایط بهینه از طرح مرکب مرکزی (CCD) از روش سطح پاسخ (RSM) توسط نرم‌افزار 8.0.6 Design Expert برای تجزیه و تحلیل داده‌ها استفاده شد. با توجه به وجود ۴ متغیر در انجام آزمایش با استفاده از دستگاه آزمون‌گر، تعداد کل آزمایش‌های لازم ۳۰ آزمایش (۶ نقطه مرکزی، ۸ نقطه ستاره، ۱۶ نقطه محوری) محاسبه گردید. مقادیر کدگذاری شده متغیرهای مستقل مطابق جدول ۱ در پنج سطح (۲+، ۱+، ۰، ۱-، ۲-) طراحی شد. برای پیش‌بینی شرایط بهینه از معادله زیر استفاده گردید [۳۰].

[Downloaded from journal.rums.ac.ir on 2026-10-15]

[DOR: 20.1001.1.17353165.1397.17.5.2.9]

$$\eta = \beta_0 + \sum_{j=1}^{k} \beta_j x_j + \sum_{j=1}^{k} \beta_{jj} x_j^2 + \sum_{i} \sum_{<j=2}^{k} \beta_{ij} x_i x_j + e_i$$

که در آن η پاسخ پیش بینی شده، Xi و Xj متغیرها، β ضریب ثابت، βj، βjj و βij به ترتیب ضرایب متقابل خطی، مربعی و درجه دوم، و ei خطا است. در نهایت با تحلیل نتایج بدست آمده و مقایسه با نتایج پیش‌بینی شده مدل روش سطح پاسخ میزان تطابق این دو با سطح اطمینان بالاتر از ۹۵ درصد بررسی گردید. آنالیز واریانس (ANOVA) برای ارزیابی اثرات معنی‌دار متغیرهای مستقل بر روی متغییر پاسخ یعنی راندمان حذف COD انجام پذیرفت. کیفیت برازش مدل چند جمله‌ای با ضریب R^2 بیان شد. به منظور انتخاب مدل‌های تجربی برای پیش‌بینی پاسخ، رابطه خطی (Linear)، چند جمله‌ای درجه دوم (Quadratic) و سوم (Cubic) بر داده‌های بدست آمده از آزمایش‌ها برازش شدند. از نظر آماری مدلی مناسب است که آزمون برازش آن معنی‌دار نباشد و بالاترین مقدار R^2، $R^2_{adjusted}$ (تعدیل شده)، R^2 predicted (پیش‌بینی شده) بالاتری داشته و مجموع مربعات باقی مانده (خطای پیش‌بینی press) پایینی را داشته باشند [۲۶].

جدول ۱ - نقاط آزمایشی متغیرهای مستقل و سطوح مقادیر تجربی آنها

متغیرهای مستقل	واحد	مقادیر کد گذاری شده				
		α +	۱+	۰	۱ -	α -
		مقادیر حقیقی				
pH (A)	-	۸/۵	۷	۵/۵	۴	۲/۵
میزان پرسولفات (B)	میلی‌گرم در لیتر	۴۰	۳۵	۳۰	۲۵	۲۰
میزان دانسیته جریان (C)	میلی‌آمپر بر سانتی‌متر مربع	۵۰	۴۰	۳۰	۲۰	۱۰
میزان پرکسید هیدروژن(D)	میلی‌مول بر لیتر	۵۵	۵۰	۴۵	۴۰	۳۵

نتایج

در زمان این پژوهش، بیمارستان مورد مطالعه دارای ۲۰۰ تخت ثابت و ۱۲۰ تخت فعال بود. از سیستم لجن فعال با هوادهی سطحی با ظرفیت ۲۱ m^3/d به عنوان واحد تصفیه استفاده و نهایتاً پساب سیستم وارد چاه جاذب می‌گشت. میزان مصرف آب ۵۶ m^3/d بود. نتایج بدست آمده از آزمایش‌های انجام شده بر روی COD, BOD, TSS ، کلی فرم کل و کلی فرم مدفوعی از پساب خروجی از واحد تصفیه لجن فعال در جدول ۲ آمده است. با توجه به اینکه میزان COD فاضلاب برابر با mg/L ۳۴۸±۲۵ بدست آمد. در طی این مطالعه میزان COD آزمایش برابر mg/L ۴۰۰ به عنوان میزان COD ورودی به راکتور الکتروشیمیایی تنظیم شد.

[Downloaded from journal.rums.ac.ir on 2026-10-15]

[DOR: 20.1001.1.17353165.1397.17.5.2.9]

جدول ۲- ویژگی میکروبی و شیمیایی پساب خروجی از واحد تصفیه لجن فعال متعارف

نوع آزمایش	pH	BOD (mg/l)	COD mg/l	TSS (mg/l)	TDS (mg/l)	TC (MPN/100ml)	FC (MPN/100ml)
مقدار	۷/۵	۱۵۸	۳۴۸	۱۲۳	۳۸۰	≥ ۲۴۰۰	≥ ۲۴۰۰
استاندارد خروجی دفع پساب به چاه جاذب (۳۱)	۵-۹	۵۰	۶۰	-	-	۱۰۰۰	۴۰۰

امروزه استفاده از روش سطح پاسخ (RSM) جهت طراحی آزمایش به صورت گسترده ای مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲۹-۲۸]. در این مطالعه نتایج برازش مدل‌های مختلف بر داده‌های بدست آمده در حذف COD مدل مرتبه دوم (Quadratic) برازش بالاتری داشت. میزان ضریب تعیین R^2 برابر با ۹۲/۴ درصد، $R^2_{adjusted}$ برابر ۸۹/۶ درصد بدست آمد. شایان ذکر است هر چه قدر مقادیر R به ۱ نزدیک باشد بیانگر مطابقت بالای نتایج حاصل از مدل با نتایج واقعی یا آزمایشگاهی است و بایستی ۰/۸ و بالاتر از آن باشد [۳۲] بدین ترتیب مدل پیشنهادی برای براورد مقدار راندمان حذف COD مطابق رابطه ۱ تعیین گردید. نتایج آنالیز واریانس عوامل مدل مرتبه دوم پاسخ سطح در حذف COD در جدول ۳ نشان داده شده است.

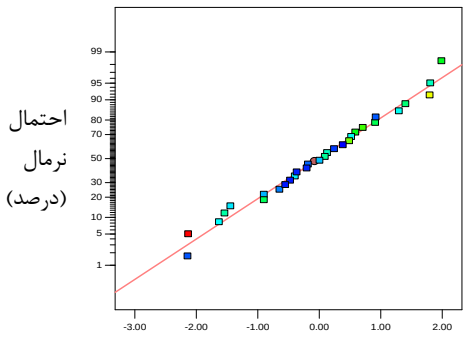
$$Y= ۴۲/۴۸ + (pH)\ ۳۲۵/۰۵ + (PS\ dose)\ ۳/۱۹ + (current\ density)\ ۱۱/۲۳ + (H_2O_2\ dose)\ ۰/۰۹ + (PS\ dose)(H_2O_2\ dose)\ ۰/۱۷ - pH(PS\ dose)\ ۴/۱ - (H_2O_2\ dose)^2\ ۰/۱۵ - (PS\ dose)^2\ ۰/۱۱$$ رابطه ۱:

جدول ۳- نتایج آنالیز ANOVA و اثرات متقابل بین آن

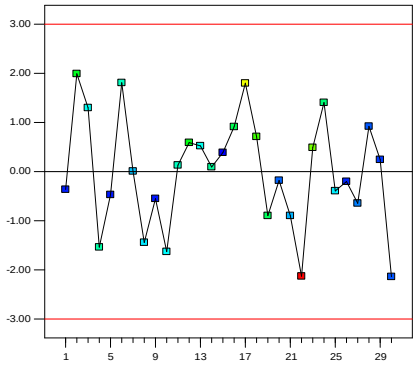
منبع	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	مقدار F	مقدار P
مدل	۳۲۵۹/۵۱	۸	۴۰۷/۴۴	۳۲/۲۸	< ۰/۰۰۰۱
A	۳۸۴	۱	۳۸۴	۳۰/۴۲	< ۰/۰۰۰۱
B	۳۹/۰۱	۱	۳۹/۰۱	۳/۰۹	۰/۰۹۳
C	۶۹/۳۶	۱	۶۹/۳۶	۵/۵	۰/۰۲۹
D	۱۷/۳۴	۱	۱۷/۳۴	۱/۳۷	۰/۲۵۴۳
BD	۸۱/۹	۱	۸۱/۹	۶/۴۹	۰/۰۱۸۸
A^2	۲۳۸۸/۳۶	۱	۲۳۸۸/۳۶	۱۸۹/۲۳	< ۰/۰۰۰۱
B^2	۲۳۹/۲۷	۱	۲۳۹/۲۷	۱۸/۹۶	۰/۰۰۳
D^2	۴۳۰/۹۷	۱	۴۳۰/۹۷	۳۴/۱۴	< ۰/۰۰۰۱
باقی مانده	۲۶۵/۰۶	۲۱	۱۲/۶۲	-	-
نقص برازش	۲۴۵/۳۶	۱۶	۱۵/۳۴	۳/۸۹	۰/۰۶۹۹
خطای خالص	۱۹/۶۹	۵	۳/۹۴	-	-
کل	۳۵۲۴/۵۷	۲۹	-	-	-

[Downloaded from journal.rums.ac.ir on 2026-10-15]

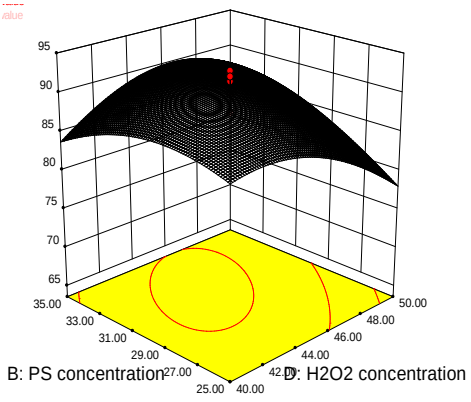
[DOR: 20.1001.1.17353165.1397.17.5.2.9]

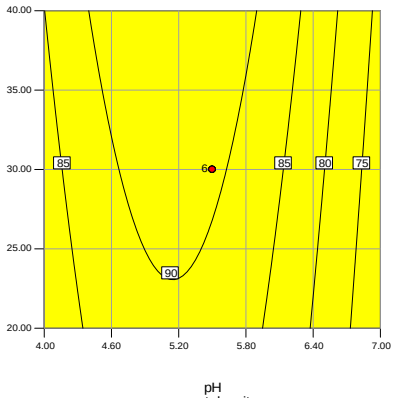


شکل ۱- احتمال نرمال برای باقی مانده های مدل

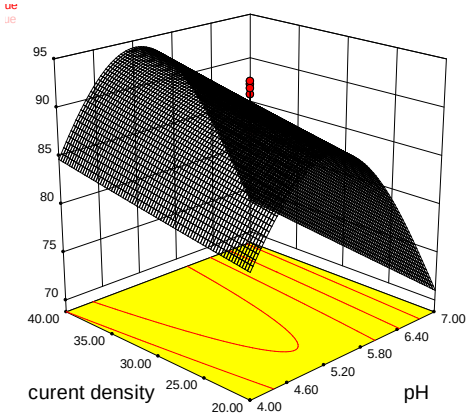


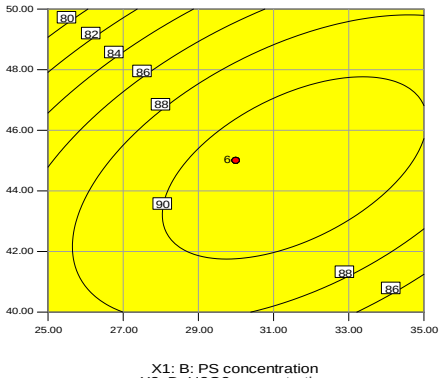
شکل ۲- مقادیر باقی مانده در برابر مقادیر پیش بینی شده با مدل





شکل ۳- تأثیر همزمان pH و میزان جریان بر راندمان حذف COD





شکل ۴- تأثیر همزمان میزان پرکسید هیدروژن و پرسولفات بر راندمان حذف COD

بحث

بر اساس نتایج بدست آمده در این مطالعه و با توجه به ورود پساب تصفیه خانه به چاه جاذب رسیدن به استاندارد تخلیه ضروری است. مقایسه نتایج خروجی پساب تصفیه خانه با استاندارد تخلیه پساب به چاه جاذب سازمان حفاظت محیط زیست [۳۱] بیانگر این است مقادیر

[Downloaded from journal.rums.ac.ir on 2026-10-15]
[DOR: 20.1001.1.17353165.1397.17.5.2.9]

پارامترهای COD و BOD با استاندارد تخلیه فاصله دارد و بایستی از فرآیند جایگزین یا تکمیلی‌برای تصفیه فاضلاب استفاده نمود. با توجه به نسبت BOD_5/COD برابر ۰/۴ و میزان پایین تجزیه‌پذیری زیستی روش الکتروپرسولفات همراه با پرکسیدهیدروژن جهت تجزیه COD استفاده شد. پس از ۶۰ min زمان تماس راندمان حذف COD برابر ۹۲/۶ درصد {در pH برابر با ۵/۲ در غلظت پرسولفات (mg/L) ۳۱، دانسیته جریان mA/cm^2 ۴۰ و غلظت پرکسید هیدروژن (mmol/L) ۴۵} بدست آمد. میزان COD خروجی برابر (mg/L) ۳۲ حاصل گردید که توانست استاندارد پساب دفع در چاه جاذب را رعایت نماید. در مطالعه Arsalan با استفاده همزمان ($UV/H_2O_2/O_3$) بر روی COD فاضلاب بیمارستانی و با COD اولیه (mg/L) ۸۰۷ راندمان حذف ۷۷/۹ درصد گزارش شد [۱۲].

شکل ۱ نمودار مقادیر پراکنش باقی مانده‌ها نسبت به مقادیر برازش شده، روندی که نشاندهنده زیاد یا کم شدن واریانس باشد نمایان نبود. بنابراین توزیع نرمال باقی مانده‌ها پذیرفته شد. در شکل ۲ نمودار پراکنش باقی مانده‌ها نسبت به ترتیب انجام آزمایش‌ها که برای بررسی استقلال بین داده‌هاست به کار می‌رود هیچ گونه تغییرات سینوسی مشاهده نشد و فرض استقلال داده‌های بدست آمده پذیرفته می‌شود. در ادامه جهت بیان اثرات منفرد و بر هم‌کنش متغییرها از پلات‌های دو (2D) و سه بعدی (3D) استفاده شد. شکل ۳ و ۴ که نمای دو و سه بعدی از سطح حذف COD با تأثیر متغیرهای مستقل است را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج آنالیز آماری در مواردی که آزمون فقدان برازش معنی‌دار نباشد تناسب مدل در برازش داده‌ها را ثابت می‌کند [۳۲-۲۶]. در این مطالعه ۰/۰۶۹ بود (p-value > ۰/۰۵) و باعث گردید نسبت معنی‌داری بین فقدان برازش و مقدار خطای خالص وجود نداشته باشد. میزان F نشان دهنده نسبت مربعات مدل به نسبت مربعات خطاهاست، که مقدار بالای F نشانگر مقدار کم خطا و تطابق بالای مدل را نشان می‌دهد. ازطرفی هرچقدر میزان P کمتر باشد ضریب مرتبط با آن فاکتور (متغیر مستقل) تأثیرگذارتر بوده و اهمیت بیشتری دارد. فاکتور pH با (p<۰/۰۰۰۱) نشان داد pH یکی از تأثیرگذارترین پارامترهاست. مقادیر کفایت دقت (Adeq Precision) بیانگر اختلاف مقدار پاسخ پیش‌بینی شده مدل با مقدار متوسط خطای پیش‌بینی می‌باشد و مقادیر بیش از ۴ بیانگر کفایت مدل است و مدل‌های پیش‌بینی کننده بدست آمده از طرح مرکب مرکزی تبعیت می‌کند در این مطالعه میزان ۲۴/۸۴۲ بدست آمد.

بر اساس نتایج حاصل از شکل ۳، بالاترین راندمان حذف COD در pH برابر با ۵/۲ بدست آمد. با توجه به نتایج آزمون ANOVA مقدار P برابر ۰/۰۰۰۱ و مقدار F برابر ۳۰/۴۲ بدست آمد و نشان داد پارامتر pH بر راندمان حذف COD تأثیر بسزایی دارد. در زمان برقراری جریان الکتریسیته با انحلال آند قربانی، یون‌های آهن به اشکال دو و سه ظرفیتی تبدیل می‌شوند. در pHهای پایین نوع غالب آهن Fe^{+2} است. از آنجایی‌که در pH قلیایی فرم آهن به اشکال کلوئیدی $Fe(OH)_3$ تبدیل می شود، این موضوع باعث رسوب فعال کننده (یون آهن) از محیط می‌گردد. بنابراین در pH اسیدی راندمان واکنش بیش از pH قلیایی است [۳۳].

[Downloaded from journal.rums.ac.ir on 2026-10-15]

[DOR: 20.1001.1.17353165.1397.17.5.2.9]

بر اساس نتایج حاصل از شکل ۴، بالاترین راندمان حذف در غلظت پرسولفات (mg/L) ۳۱ و غلظت پرکسیدهیدروژن (mmol/L) ۴۵ رخ داد. در رابطه با تأثیر غلظت پرسولفات و پرکسید هیدروژن بر راندمان حذف COD مشاهده شد با افزایش غلظت ماده اکسید کننده بیش از مقدار بهینه به عنوان رباینده رادیکال عمل کرده و باعث مصرف رادیکال‌ها شده و درنتیجه کارآیی فرآیند کاهش می‌یابد. نتایج مطالعه انجام شده Hills و همکاران بر روی حذف COD شیرابه در حضور همزمان پرسولفات سدیم و پرکسیدهیدروژن نشان داد که پرکسید هیدروژن باعث بهبود راندمان در مقایسه کاربرد پرسولفات به تنهایی است که با نتایج بدست آمده این مطالعه هم‌خوانی دارد [۳۴].

دانسیته جریان از عوامل تأثیرگذار بر سرعت واکنش در فرآیندهای الکتروشیمیایی است و تابعی از غلظت عامل کاتالیست شرکت کننده در واکنش می‌باشد [۳۵]. در این فرآیند تنها منبع تولیدی یون آهن تجزیه الکترود در سطح آند قربانی بوده بنابراین میزان دانسیته جریان ارتباط مستقیم با تولید عامل کاتالیست در محیط داشته و با افزایش دانسیته جریان میزان تولید یون‌های آهن افزوده شده و باعث افزایش راندمان واکنش می‌شود. در مطالعه Cai و همکاران بر روی تجزیه COD با کمک فرآیند الکترو پرسوافات نشان داد بین دانسیته جریان و راندمان حذف ارتباط مستقیم وجود دارد که با نتایج بدست آمده در این مطالعه نیز هم‌خوانی دارد. [۳۶]

نتایج تجربی با استفاده از تابع تقریبی حذف COD در رابطه (۱) بهینه‌سازی گردید، شرایط بهینه با ۳۷ راه حل توسط نرم‌افزار Design Expert ارائه گردید. بهترین راه حل در میزان پرکسید هیدروژن (۴۴/۷ mmol/L)، میزان پرسولفات سدیم (۳۱ mg/L)، pH برابر با (۵/۲) و دانسیته جریان ($۴۰ mA/cm^2$) بازده حذف COD برابر با ۹۸/۴ درصد پیش‌بینی شد و انجام واکنش در شرایط مذکور، میزان راندمان حذف COD برابر ۹۶/۶ درصد بدست آمد. پیشنهاد می‌گردد که اثر زمان بر روی راندمان حذف COD به عنوان یک فاکتور تأثیرگذار مورد بررسی و تحقیق قرار گیرد. علاوه بر این با توجه به پتانسیل ایجاد محصولات جانبی بایستی شناسایی و مورد بررسی قرار گیرد.

نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر تصفیه فاضلاب بیمارستانی با استفاده از فرآیند الکتروپرسولفات با استفاده همزمان واکنش گر پرکسیدهیدروژن با کمک الکترودهای آهنی مدادی شکل انجام گرفت.

با توجه به طرح مرکب مرکزی و روش سطح پاسخ برای پیش‌بینی شرایط بهینه، بر اساس داده‌های آزمایش‌ها قابل استفاده است و بین مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل با نتایج حاصل از آزمایش‌ها تطابق خوبی وجود دارد. طبق نتایج بدست آمده روش الکتروپرسولفات با استفاده همزمان از واکنش گر پرکسیدهیدروژن و تولید الکتریکی آهن می‌تواند برای تصفیه فاضلاب‌های قوی مورد استفاده قرار گیرد.

[Downloaded from journal.rums.ac.ir on 2026-10-15]

[DOR: 20.1001.1.17353165.1397.17.5.2.9]

اگرچه بررسی‌های لازم در خصوص صرفه اقتصادی فرآیند الکتروسولفات بایستی مدنظر قرار گرفته شود.

تشکر و قدردانی

از کمیته تحقیقات مرکز بهداشت غرب تهران دانشگاه علوم پزشکی ایران که با تصویب این طرح راه را برای انجام آن هموار ساخته‌اند تشکر و قدردانی می‌شود.

References

[1] Carraro E, Bonetta S, Bertino C, Lorenzi E, Bonetta S, Gilli G. Hospital effluents management: Chemical, physical, microbiological risks and legislation in different countries. *Environ Manage* 2016; 168: 185-99.

[2] Suarez S, Lema JM, Omil F. Pre-treatment of hospital wastewater by coagulation–flocculation and flotation. *Bioresour Tech* 2009; 100(7): 2138-46.

[3] Tahiri E, Benaabidate L, Nejjari C, Benbrahim KF. Assessment of physicochemical and biological parameters of Al Ghassani hospital wastewaters, Fez—Morocco. *Mater Environ Sci* 2012; 3(1): 115-20.

[4] Prayitno ZK, Yanuwiadi B, Laksmono RW. Study of hospital wastewater characteristic in Malang City. *Int J Eng Sci* 2013; 2: 13-6.

[5] Zhang CM, Wang XC, Li X, ZhaoL F, Zeng S. Quantification and distribution of Salmonella spp. and Salmonella typhi in wastewater treatment plants. *Pure Apply Microbial* 2013; 7: 409-15.

[6] El-Gawad HA, Aly A. Assessment of Aquatic Environmental for Wastewater Management Quality in the Hospitals: a Case Study. *Aust J Basic Appl. Sci* 2011; 5(7).474-82.

[7] Al Aukidy M, Verlicchi P, Voulvoulis N. A framework for the assessment of the environmental risk posed by pharmaceuticals originating from hospital effluents. *Sci. Total Environ* 2014; 493: 54-64.

[Downloaded from journal.rums.ac.ir on 2026-10-15]

[DOR: 20.1001.1.17353165.1397.17.5.2.9]

[8] Verlicchi P, Galletti A, Petrovic M, Barceló D. Hospital effluents as a source of emerging pollutants: an overview of micropollutants and sustainable treatment options. *Hydrology* 2010; 389(3): 416-28.

[9] Escher BI, Baumgartner R, Koller M, Treyer K, Lienert J, McArdell CS. Environmental toxicology and risk assessment of pharmaceuticals from hospital wastewater. *Water res* 2011; 45(1): 75-92.

[10] Nguyen T-T, Bui X-T, Nguyen D-D, Nguyen P-D, Ngo H-H, Guo W. Performance and membrane fouling of two types of laboratory-scale submerged membrane bioreactors for hospital wastewater treatment at low flux condition. *Sep. Purif. Technol* 2016; 165: 123-9.

[11] Snyder SA, Adham S, Redding AM, Cannon FS, DeCarolis J, Oppenheimer J, et al. Role of membranes and activated carbon in the removal of endocrine disruptors and pharmaceuticals. *Desalination* 2007; 202(1): 156-81.

[12] Arslan A, Veli S, Bingöl D. Use of response surface methodology for pretreatment of hospital wastewater by O 3/UV and O 3/UV/H 2 O 2 processes. *Sep. Purif. Technol* 2014; 132: 561-7.

[13] Ahmed MM, Barbati S, Doumenq P, Chiron S. Sulfate radical anion oxidation of diclofenac and sulfamethoxazole for water decontamination. *Chem. eng* 2012;197:440-7.

[14] Liu J, Zhong Sh, Song Y, Wang B, Zhang F. Degradiation of tetracycline hydrochloride by electro-activated persulfate oxidation.*Electroanal. Chem 2018; 809:74-79.*

[15] Lee M, Oh J. Sonolysis of trichloroethylene and carbon tetrachloride in aqueous solution. *Ultrason. sonochem* 2010; 17(1): 207-12.

[16] Teel AL, Warberg CR, Atkinson DA, Watts RJ. Comparison of mineral and soluble iron Fenton's catalysts for the treatment of trichloroethylene. *Water res* 2001; 35(4): 977-84.

[17] Devi P, Das U, Dalai AK. In-situ chemical oxidation: Principle and applications of peroxide and persulfate treatments in wastewater systems. *Sci. Total Environ* 2016; 571: 643-57.

[Downloaded from journal.rums.ac.ir on 2026-10-15]

[DOR: 20.1001.1.17353165.1397.17.5.2.9]

[18] Yang S, Wang P, Yang X, Shan L, Zhang W, Shao X, et al. Degradation efficiencies of azo dye Acid Orange 7 by the interaction of heat, UV and anions with common oxidants: persulfate, peroxymonos-ulfate and hydrogen peroxid. *Hazard Mater* 2010; 179(1): 552-8.

[19] Gao Y-q, Gao N-y, Deng Y, Yang Y-q, Ma Y. Ultraviolet (UV) light-activated persulfate oxidation of sulfamethazine in water. *Chem. Eng* 2012; 195: 248-53.

[20] Hou L, Zhang H, Xue X. Ultrasound enhanced heterogeneous activation of peroxydisulfate by magnetite catalyst for the degradation of tetracycline in water. *Sep. Purif. Technol* 2012; 84: 147-52.

[21] Olmez-Hanci T, Arslan-Alaton I. Comparison of sulfate and hydroxyl radical based advanced oxidation of phenol. *Chem. Eng* 2013; 224: 10-6.

[22] Su S, Guo W, Yi C, Leng Y, Ma Z. Degradation of amoxicillin in aqueous solution using sulphate radicals under ultrasound irradiation. *Ultrason. sonochem* 2012; 19(3): 469-74.

[23] Lin Y-T, Liang C, Chen J-H. Feasibility study of ultraviolet activated persulfate oxidation of phenol. *Chemosphere* 2011; 82(8): 1168-72.

[24] Rivas F, Gimeno O, Borallho T. Aqueous pharmaceutical compounds removal by potassium monopersulfate. Uncatalyzed and catalyzed semicontinuous experiments. *Chem. Eng* 2012; 192: 326-33.

[25] APHA. AWWA. WEF. Standard methods for the examination of water and waste water. Washington D.C2005.

[26] Eslami A, Asadi A, Meserghani M, H B. Optimization of sonochemical degradation of amoxicillin by sulfate radicals in aqueous solution using response surface methodology(RSM). *J Mol Liq* 2016; 222: 739-44.

[27] Srivastava V, Sharma Y, Sillanpää M. Application of response surface methodology for optimization of Co (II) removal from synthetic wastewater by adsorption on NiO nanoparticles. *J Mol Liq* 2015; 211: 613-20.

[28] Yang Q, Zhong Y, Zhong H, Li X, Du W, Li X, et al. A novel pretreatment process of

[Downloaded from journal.rums.ac.ir on 2026-10-15]

[DOR: 20.1001.1.17353165.1397.17.5.2.9]

mature landfill leachate with ultrasonic activated persulfate: Optimization using integrated Taguchi method and response surface methodology. *Process Saf Environ Prot* 2015; 98: 268-75.

[29] Agarwal S, Tyagi I, Gupta VK, Dastkhoon M, Ghaedi M, Yousefi F, et al. Ultrasound-assisted adsorption of Sunset Yellow CFC dye onto Cu doped ZnS nanoparticles loaded on activated carbon using response surface methodology based on central composite design. *J Mol Liq* 2016; 219: 332-40.

[30] Arslan A, Veli S, Bingöl D. Use of response surface methodology for pretreatment of hospital wastewater by O3/UV and O3/UV/H2O2 processes. *Sep. Purif. Technol* 2014; 132: 561-7.

[31] Environmental regulation and standards of Iran. Iranian Environment Conservation Organization. 2003; 234-39 [Farsi].

[32] Xu X-R, Li X-Z. Degradation of azo dye Orange G in aqueous solutions by persulfate with ferrous ion. *Sep Purif Technol* 2010; 72(1): 105-11.

[33] Romero A, Santos A, Vicente F, González C. Diuron abatement using activated persulphate: effect of pH, Fe (II) and oxidant dosage. *Chem Eng* 2010; 162(1): 257-65.

[34] Hilles AH, Amr SSA, Hussein RA, El-Sebaie OD, Arafa AI. Performance of combined sodium persulfate/H 2 O 2 based advanced oxidation process in stabilized landfill leachate treatment. *Environ Manage* 2016; 166: 493-8.

[35] da Silva-Rackov CK, Lawal WA, Nfodzo PA, Vianna MM, do Nascimento CA, Choi H. Degradation of PFOA by hydrogen peroxide and persulfate activated by iron-modified diatomite. *Appl Catal B* 2016; 192: 253-9.

[36] Cai C, Zhang Z, Zhang H. Electro-assisted heterogeneous activation of persulfate by Fe/SBA-15 for the degradation of Orange II. *Hazard Mater* 2016; 313: 209-18.

[Downloaded from journal.rums.ac.ir on 2026-10-15]

[DOR: 20.1001.1.17353165.1397.17.5.2.9]

Efficiency of Electro-Persulfate Process Optimized with Hydrogen Peroxide in Removal of Hospital Wastewater COD by Response Surface Methodology

B. Bina[1], Y. Hajizadeh[2], S. Karimi[3], H. Ahmadnia[4], M. Meserghani[5]

Received: 26/09/2017 Sent for Revision: 25/12/2017 Received Revised Manuscript: 05/05/2018 Accepted: 26/05/2018

Background and Objectives: Hospital wastewaters contain persistent substances such as microbial factors, deterjents, halogenated organic compounds, hormones, antibiotics, and radioactive isotopes that are produced by a variety of research and treatment activities. This study aimed to remove COD (Chemical Oxygen Demand) of hospital wastewater by optimized electro-persulfate process using response surface methodology

Materials and Methods: In this laboratory study, an electrochemichal batch reactor equipped with four iron electrodes connected to a DC power supply was used for eliminating COD of wastewater. The independent variables (current density, initial pH, H_2O_2 dosage, persulfate dosage) against COD removal as the dependent variable were investigated using 8.0.6 Design Expert software by the response surface method, and the proposed model was analyzed using ANOVA.

Results: The optimal operational condition for COD removal with current density of 40 mA/cm2, initial pH of 5.2, persulfate dosage of 31 mg/L, and hydrogen peroxide dosage of 45 mM was 92.6%. High value of coefficient of determination was 92.4 % and low value of coefficient of variation 4.58%.

Conclusion: The response surface method showed that there was an agreement between the predicted values by the model and the results obtained from the experiments. Simultaneous use of two reactives (persulfate/H2O2) increaces the COD removal efficiency. Therefore, it seems that electro-persulfate oxidation with hydrogen peroxide is an effective method for the the removal of hospital wastewater COD. Designing experiment using response surface methodology can show the best conditions for COD removal through reducing the number of experimental tests.

Key words: Electro-persulfate, Hydrogen peroxide, COD, Hospital wastewater, Response surface methodology

Funding: This research was funded by Iran University of Medical Sciences.

Conflict of interest: None declared.

How to cite this article: Bina B, Hajizadeh Y, Karimi S, Ahmadnia H, Meserghani M. Efficiency of Electro-Persulfate Process Optimized with Hydrogen Peroxide in Removal of Hospital Wastewater COD by Response Surface Methodology. *J Rafsanjan Univ Med Sci* 2018; 17 (5): 407-20. [Farsi]

1- Prof., Dept. of Environmental Health Engineering, School of Health, Isfahan University of Medical Sciences, Isfahan, Iran, ORCID: 0000-0002-1718-6089
2- Assistant Prof., Dept. of Environmental Health Engineering, School of Health, Isfahan University of Medical Sciences, Isfahan, Iran, ORCID: 0000-0002-1901-4475
3- Expert in Charge of Dept. of Environmental Health , West of Tehran Health Center, Iran University of Medical Sciences, Tehran, Iran, ORCID: 0000-0001-6521-143X
4- Head of West of Tehran Health Center, Iran University of Medical Sciences, Tehran, Iran, ORCID: 0000-0002-9258-2612
5- PhD Student of Environmental Health Engineering, School of Health, Isfahan University of Medical Sciences, Isfahan, Iran, ORCID: 0000-0002-5619-986X
(Corresponding Author) Tel: (021) 66023041, Fax: (021) 66001931, E-mail: m_eserghany@yahoo.com

[Downloaded from journal.rums.ac.ir on 2026-10-15]

[DOR: 20.1001.1.17353165.1397.17.5.2.9]