



Available online: <http://ijhe.tums.ac.ir>

مقاله پژوهشی



## بهینه سازی فرایند $UV/H_2O_2/TiO_2$ در تصفیه تکمیلی پساب بیمارستانی

مهدی هادی<sup>۱\*</sup>، مه‌ری سلیمانی امین‌آباد<sup>۲</sup>، مهناز امیری<sup>۲</sup>، معصومه ارجی پور<sup>۲</sup>

۱- مرکز تحقیقات کیفیت آب، پژوهشکده محیط زیست، دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران، ایران  
۲- گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی کردستان، سنندج، ایران

### اطلاعات مقاله:

### چکیده

زمینه و هدف: تصفیه پساب‌های بیمارستانی نقش مهمی در کاهش تخلیه ترکیبات آلی و دارویی به محیط دارد. امروزه فرایندهای اکسیداسیون پیشرفته برای حذف ترکیبات آلی از پساب‌ها استفاده می‌شوند. در این مطالعه تصفیه مواد آلی باقیمانده در پساب واقعی تصفیه شده بیمارستانی با استفاده از فرایند  $UV/H_2O_2/TiO_2$  بررسی و شرایط بهینه تصفیه از نظر هزینه و راندمان با استفاده از روش‌های آماری تحلیل گردید.

روش بررسی: مشخصات اولیه پساب شامل COD، TOC و DOC تعیین و مقادیر متوسط آنها ثبت شد. از فرایند تلفیقی  $UV/H_2O_2/TiO_2$  به منظور تصفیه باقیمانده مواد آلی استفاده شد. تعداد آزمایش‌ها با استفاده از روش سطح پاسخ (RSM) تعیین و ارتباط متغیرهای pH، زمان ماند، غلظت  $H_2O_2$  و دی اکسیدتیتانیم با کاهش COD، DOC، TOC و هزینه تقریبی تصفیه با انجام آنالیز واریانس (ANOVA) بررسی گردید.

یافته‌ها: در شرایط بهینه حذف، مقادیر pH،  $H_2O_2$ ،  $TiO_2$  و زمان پرتودهی به ترتیب برابر با ۷/۲، ۵۰ mg/L، ۱۰۰ mg/L و ۱۹/۶۵ min تعیین گردید. بیشترین راندمان حذف ترکیبات آلی با کمترین هزینه، بر حسب COD و DOC، TOC به ترتیب ۶۳/۹، ۵۲/۹ و ۶۴/۷ درصد تعیین شد. مقدار هزینه تقریبی تصفیه برابر با ۰/۷۱ دلار به ازای تصفیه هر لیتر پساب برآورد گردید.

نتیجه‌گیری: زمان پرتودهی و غلظت  $H_2O_2$  بیشترین تاثیر را بر روی مقدار هزینه تصفیه دارند. با بهینه‌سازی فرایند به روش RSM بیشترین راندمان با کمترین هزینه تامین خواهد شد. علیرغم اثربخشی، فرایند مورد استفاده در مقیاس آزمایشگاهی یک فرایند نسبتاً گران برای تصفیه تکمیلی پساب است از این‌رو انجام مطالعات بیشتر به منظور بررسی هزینه- اثربخشی فرایند در مقیاس واقعی توصیه می‌شود.

تاریخ دریافت: ۹۷/۰۷/۰۳  
تاریخ ویرایش: ۹۷/۰۸/۱۹  
تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۸/۲۲  
تاریخ انتشار: ۹۷/۰۹/۲۸

واژگان کلیدی: بهینه‌سازی فرایند، باقیمانده آلی پساب بیمارستانی، فرایند اکسیداسیون پیشرفته، روش سطح پاسخ

پست الکترونیکی نویسنده مسئول:

hadi\_rfm@yahoo.com

## مقدمه

برای حفظ بهداشت و سلامتی افراد و نیز جلوگیری از آلودگی محیط جمع‌آوری و تصفیه فاضلاب‌های تولیدی در هر اجتماع ضروری و اجتناب ناپذیر است (۱). یکی از موارد مورد بحث در تصفیه فاضلاب‌ها حذف آلاینده‌های آلی مختلف از آنها است. بیشتر ترکیبات آلی موجود در فاضلاب‌ها منشأ طبیعی داشته و می‌توانند بوسیله باکتری‌های معمول در فرایندهای هوازی یا بی‌هوازی تجزیه شوند. با این وجود در حال حاضر بیش از ۷۰۰۰۰ ماده شیمیایی آلی صنعتی وجود دارد که اصطلاحاً ترکیبات ساختگی نامیده می‌شوند و متأسفانه بعضی از این ترکیبات آلی بدلیل عدم تجزیه بیولوژیکی مشکلات بسیاری ایجاد می‌کنند (۲).

از جمله مواد شیمیایی آلی مصنوعی می‌توان به آفت‌کش‌ها، دترجنت‌ها، حلال‌ها و ترکیبات دارویی خصوصاً آنتی‌بیوتیک‌های مختلف که به‌طور گسترده در بیمارستان‌ها استفاده می‌شوند اشاره کرد. در این میان ترکیبات دارویی به وفور در بیمارستان‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند که علاوه بر عدم تجزیه‌پذیری بیولوژیکی از نظر افزایش مقاومت دارویی باکتری‌ها در محیط‌های آبی حائز اهمیت هستند. طی دهه‌های اخیر ترکیبات دارویی آنتی‌بیوتیکی مختلف به‌طور گسترده‌ای در درمان بیماری‌ها در انسان و حیوانات و همچنین به عنوان تقویت‌کننده‌های رشد در کشاورزی مورد استفاده قرار گرفته‌اند (۳، ۴). افزایش درصد گونه‌های باکتریایی مقام در برابر آنتی‌بیوتیک‌ها در محیط‌های مختلف می‌تواند منجر به بروز مشکلاتی در درمان انتخابی عفونت‌های باکتریایی گردد (۵). مهم‌ترین علت بالارفتن میزان مقاومت باکتری‌ها نسبت به آنتی‌بیوتیک‌ها در ایران ناشی از تجویز و استفاده بی‌رویه از آنتی‌بیوتیک‌ها است (۶). بروز مقاومت باکتریایی در محیط‌های زیستی-آبی نیز در بسیاری از مطالعات مختلف گزارش گردیده است (۷، ۸). از این‌رو بسیاری از محققین، محیط‌های آبی به‌خصوص فاضلاب را به‌عنوان دریافت‌کننده اصلی باکتری‌های روده‌ای، جایگاهی مساعد برای مقاوم شدن بسیاری از باکتری‌ها در مقابل انواع گوناگون آنتی‌بیوتیک‌ها می‌دانند (۹) چرا که

در چنین محیطی انتقال ژن‌های مقاوم در برابر آنتی‌بیوتیک‌ها به دلیل بالا بودن بار غذایی و بار میکروبی می‌تواند به خوبی بین گونه‌های مختلف باکتریایی صورت پذیرد (۱۰). دفع کنترل نشده فاضلاب‌های شهری و تا حدودی بیمارستانی در شهرهای مختلف ایران به آب‌های پذیرنده که به‌عنوان منابع آب آشامیدنی حیوانات و یا منابع آب کشاورزی مورد استفاده قرار می‌گیرند، عامل مهمی است که بر تداوم انتشار گونه‌های باکتریایی مقاوم در برابر آنتی‌بیوتیک‌ها در بین جمعیت‌های انسانی و حیوانات دامن می‌زند. لذا با توجه به این مهم ضروری است که از دفع کنترل‌نشده این قبیل فاضلاب‌ها و خصوصاً فاضلاب‌های بیمارستانی به آب‌های پذیرنده جلوگیری شود و با احداث سیستم‌های مناسب مورد تصفیه قرار گیرند تا از این طریق چرخه انتقال عوامل مقاوم‌ساز از گونه‌های مقاوم به گونه‌های باکتریایی حساس متوقف گردد. توسعه راهکارهای کنترلی از قبیل تصفیه مجزای فاضلاب‌های بیمارستانی و شهری، ضمن نظارت بر استفاده از این داروها، می‌تواند در کاهش گونه‌های باکتریایی مقاوم در برابر آنتی‌بیوتیک‌ها و به مراتب بروز مشکلات در درمان عفونت‌های باکتریایی موثر باشد. در واقع فقدان سیستم‌های مناسب برای تصفیه فاضلاب‌های بیمارستانی می‌تواند باعث افزایش گونه‌های باکتریایی مقاوم در برابر آنتی‌بیوتیک‌ها در محیط‌های آبی گردد. از این‌رو ضروری است که فاضلاب‌های بیمارستانی را با استفاده از راهکارهای موثر مورد تصفیه و ضد عفونی قرار داد. امروزه فرایندهای اکسیداسیون پیشرفته در حذف ترکیبات آلی مختلف از آب‌های آشامیدنی و فاضلاب مورد استفاده قرار گرفته است (۱۱-۱۳). از معمول‌ترین فرایندهای اکسیداسیون پیشرفته می‌توان به استفاده از ازن (O<sub>3</sub>)، ازن به همراه پراکسید هیدروژن (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/O<sub>3</sub>) و پراکسید هیدروژن به همراه پرتو فرابنفش (H<sub>2</sub>O/UV) اشاره کرد. در فرایند اکسیداسیون با پراکسید هیدروژن و پرتو فرابنفش در حضور کاتالیست TiO<sub>2</sub> (UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub>)، اکسیداسیون مواد در وهله اول توسط رادیکال OH<sup>•</sup> صورت می‌پذیرد. رادیکال OH<sup>•</sup> به‌صورت غیرانتخابی با بسیاری از آلاینده‌های آلی واکنش داده و آنها را

بسیاری از مطالعات به‌عنوان یک فرایند تصفیه پیشرفته برای حذف مواد آلی استفاده شده است، به‌طور تقریبی چقدر است.

### مواد و روش‌ها

در این مطالعه به‌عنوان یک مطالعه آزمایشگاهی - کاربردی، پساب بیمارستانی (بیمارستان بعثت شهر سنج در استان کردستان) در شرایط آزمایشگاهی در معرض فرایند تصفیه پیشرفته قرار داده شد. در ابتدا مشخصات اولیه فاضلاب تعیین گردید که برای این منظور و جهت کاهش خطاهای آماری در اندازه‌گیری، مشخصات فاضلاب طی ۱۰ بار نمونه‌برداری از پساب خروجی و آنالیز پارامترهای DOC، TOC، COD و pH تعیین شد و مقادیر متوسط هر پارامتر قبل از عملیات تصفیه ثبت گردید (جدول ۱). در ادامه از فرایند اکسیداسیون پیشرفته UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> به منظور حذف ترکیبات آلی در پساب استفاده شد. به منظور انجام آزمایش‌ها از یک سیستم کم فشار تامین کننده نور ماورای بنفش و با میزان دز پرتودهی ۵۰۰۰۰ μWs/cm<sup>2</sup> و طول موج ۲۵۴ nm استفاده شد. مدت زمان پرتودهی در محدوده بین ۱۰ تا ۴۵ min انتخاب و بنابراین میزان شدت نور ماورای بنفش در این مطالعه در دامنه ۱۶۷-۲۸ μW/cm<sup>2</sup> بررسی گردید. یک نمونه کافی از فاضلاب خروجی از تصفیه‌خانه به‌صورت مرکب ۲۴ ساعته برداشت و جهت انجام آزمایش‌ها به آزمایشگاه انتقال داده شد. آزمایش‌های مربوط به تصفیه پیشرفته (UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub>) بر روی فاضلاب انجام و مقدار پارامترهای شیمیایی (TOC، DOC و COD) فاضلاب بعد از هر آزمایش مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. پارامترهای اندازه‌گیری شده با مشخصات اولیه فاضلاب مقایسه و مقدار راندمان حذف تحت شرایط مختلف تعیین گردید. تعداد آزمایش‌ها در این مطالعه از طریق طراحی آزمایش به روش سطح پاسخ تعیین شد و طی آن تاثیر پارامترهای pH، زمان پرتودهی، غلظت H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> و دی اکسید تیتانیوم به عنوان فاکتورهای مستقل بر کاهش پارامترهای DOC، TOC و COD بررسی گردید. اندازه‌گیری مقدار پارامترهای TOC و DOC با استفاده از آنالایزر Skalar FormacsHT

اکسید می‌کند (۱۴). افزودن H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> از طریق فتولیز شدن آن در مجاورت نور فرابنفش منجر به تولید رادیکال OH<sup>\*</sup> می‌شود. دی‌اکسیدتیتانیوم (TiO<sub>2</sub>) نیز در حضور نور فرابنفش به عنوان کاتالیزور منجر به افزایش تولید رادیکال OH<sup>\*</sup> شده و سرعت اکسید شدن مواد آلی را افزایش می‌دهد.

در مطالعه انجام شده توسط Khan و همکاران (۱۵) از فرایند UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> به منظور تصفیه پساب واقعی صنایع دارویی استفاده شد. در این مطالعه مقدار حداکثر تجزیه فتوکاتالیتیک که بر حسب کاهش COD برآورد گردید برابر با ۴۵/۱۱ درصد تعیین شد. همچنین در این مطالعه بر کارایی بیشتر تلفیق H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> با TiO<sub>2</sub> به جای استفاده از TiO<sub>2</sub> به تنهایی تاکید شد. در مطالعه دیگری توسط Elmolla و همکاران (۱۶) از فرایند فتوکاتالیز با استفاده از TiO<sub>2</sub> در حضور H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> برای تجزیه ترکیبات آنتی بیوتیکی شامل آموکسی‌سیلین، آمپی‌سیلین و کلوساسیلین در محلول‌های آبی استفاده شد. نتایج حاکی از تاثیر قابل توجه pH بر عملکرد فرایند داشت. استفاده از H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> در pH حدود ۵ و دزی معادل ۱/۰ g/L از TiO<sub>2</sub> تجزیه کامل ترکیبات آنتی بیوتیکی را به همراه داشت. در این مطالعه بر موثر بودن فرایند UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> در تجزیه ترکیبات آنتی بیوتیکی تاکید شده است.

در این مطالعه کارایی فرایند UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> با استفاده از لامپ فرابنفش با فشار پایین تحت دزهای متفاوت از پراکسید هیدروژن، زمان‌های متفاوت تماس، غلظت‌های متفاوت از TiO<sub>2</sub> و pH‌های مختلف در حذف ترکیبات آلی از پساب فاضلاب بیمارستانی مورد بررسی قرار گرفت. بهینه‌ترین شرایط از نظر زمان پرتودهی، pH، دز پراکسید هیدروژن و TiO<sub>2</sub> با استفاده از روش‌های آماری مناسب تعیین شد. بعلاوه هر چند این مطالعه در مقیاس آزمایشگاهی انجام شد اما سعی شد مقدار هزینه تصفیه هر واحد حجمی فاضلاب براساس مقدار هزینه مواد مصرفی و انرژی الکتریکی مصرفی به‌صورت تقریبی برآورد گردد و شرایط عملیاتی فرایند تصفیه از نظر هزینه نیز بهینه‌سازی شود. بدین ترتیب مشخص شد که هزینه تصفیه هر واحد حجمی فاضلاب برای چنین فرایندی با توجه به اینکه در

در معادله فوق  $\beta_0, \beta_j, \beta_{ij}, \beta_{ij}$  ضرایب رگرسیونی و  $k$  تعداد فاکتورها یا پارامترهای مورد بررسی هستند.  $X$  نماینده متغیرهای مستقل شامل زمان پرتودهی، pH، دز TiO<sub>2</sub> و دز H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> و  $Y$  بیانگر متغیر پاسخ است که می‌تواند یکی از متغیرهای DOC، TOC و COD باشد. کیفیت مدل برازش داده شده بر راندمان حذف رنگ را با استفاده از شاخص‌های ضریب تعیین  $R^2$  و ضریب  $R^2$  اصلاح شده مطابق با معادلات ۲ و ۳ تعیین گردید:

$$R^2 = 1 - \frac{SS_r}{SS_m + SS_r} \quad (2)$$

$$R^2_{adj} = 1 - \frac{SS_r/DF_r}{(SS_m + SS_r)/(DF_m + DF_r)} \quad (3)$$

در معادله فوق  $SS_m$  و  $SS_r$  به ترتیب نشان دهنده مجموع مربعات باقیمانده‌ها و مدل هستند.  $DF_m$  و  $DF_r$  نیز به ترتیب بیانگر درجه آزادی باقیمانده‌ها و مدل هستند. بررسی ارتباط بین متغیرهای مستقل و وابسته از طریق آنالیز واریانس انجام شد. همچنین به منظور بررسی انطباق مدل‌های استخراج شده بر نتایج آزمایشگاهی از ضریب تعیین و برای بررسی مناسب بودن مدل‌ها از آزمون فیشر (F-test) استفاده شد. نتایج پیش‌بینی در قالب معادلات درجه دوم و یا خطی ارائه گردید. همچنین نتایج به صورت گراف‌های دو بعدی و سه بعدی و گراف‌های هم‌پوشان جهت نشان دادن نقاط بهینه ارائه شد.

انجام شد. مقدار پارامتر COD به روش رفلکس بسته مطابق روش استاندارد ۵۲۲۰ اندازه‌گیری شد. با توجه به مشخصات نمونه‌های برداشت شده قبل و بعد از قرار گرفتن در معرض روش حذف در سیستم مورد مطالعه، تجزیه و تحلیل اطلاعات به دست آمده با استفاده از روش آنالیز واریانس در نرم افزار Design Expert 8.0.1 انجام شد.

جدول ۱- مقادیر متوسط مشخصات فاضلاب مورد تصفیه

پارامتر	واحد	مقدار متوسط
pH	-	۷/۵
COD	mg/L	۲۵۰/۵
TOC	mg/L	۱۹/۰۱
DOC	mg/L	۱۱/۴۲

تیمارهای تصفیه به روش کاملاً تصادفی در قالب طرح بهینه  $D$  ( $D$ -optimal<sup>Design</sup>) برای چهار متغیر و در سه سطح طراحی شدند. در جدول ۲ متغیرهای مستقل فرایند تصفیه و سطوح آنها مشخص شده‌اند. تعداد آزمایش‌های مورد نیاز براساس طرح آزمایش برابر با ۳۰ تیمار تعیین شد و نتایج تیمارهای انجام شده در جدول ۳ آورده شده‌اند. با توجه به مشخصات نمونه‌های برداشت شده قبل و بعد از قرار گرفتن در معرض روش حذف در سیستم مورد مطالعه، از معادله درجه دوم (Quadratic) به منظور پیش‌بینی مقدار متغیرهای پاسخ استفاده شد (معادله ۱):

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

جدول ۲- متغیرهای مستقل در فرایند تصفیه و سطوح آنها

متغیر مستقل	سیمبل	واحد	حد +1 واقعی	حد -1 واقعی	انحراف معیار	میانگین	حداکثر	حداقل
pH	A	-	۱۰	۴	۲/۵۶	۶/۹۶	۱۰	۴
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	B	mg/L	۱۵۰	۵۰	۴۳/۸۳	۹۸/۲۱	۱۵۰	۵۰
TiO <sub>2</sub>	C	mg/L	۵۰۰	۱۰۰	۱۷۱/۰۹	۳۰۸/۵۲	۵۰۰	۱۰۰
time	D	min	۴۵	۱۰	۱۵/۰۰	۲۷/۵۴	۴۵	۱۰

جدول ۳- نتایج اندازه گیری متغیرهای پاسخ متناسب با شرایط طراحی آزمایش‌ها

Cost	TOC	DOC	COD	A:pH	B:H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	C:TiO <sub>2</sub>	D:time	تیمار
۱/۵۴	۵/۱	۴/۴۳	۶۴/۳	۴/۰	۵۰	۵۰۰	۴۵	۱
۱/۷۱	۷/۳۶	۶/۱۵	۱۰۰/۶۸	۱۰/۰	۱۵۰	۵۰۰	۴۵	۲
۰/۵۸	۸/۷	۶/۲۱	۹۹/۱	۴/۰	۱۵۰	۱۰۰	۱۰	۳
۱/۶۱	۶/۷۱	۵/۴۴	۷۶/۲۳	۴/۰	۹۲	۱۰۰	۴۵	۴
۱/۰۳	۷/۵۸	۵/۶۳	۸۰/۵۴	۷/۱	۵۰	۳۲۰	۲۹	۵
۱/۵۴	۴/۷۷	۴/۲۳	۵۶/۰۱	۴/۰	۵۰	۵۰۰	۴۵	۶
۱/۱۱	۱۰/۷	۹/۰۲	۱۴۹/۱	۱۰/۰	۹۸	۳۲۰	۲۹	۷
۰/۴۱	۷/۸۴	۶/۵۱	۱۰۲/۹۲	۱۰/۰	۵۰	۱۰۰	۱۰	۸
۱/۷۱	۶/۴۳	۵/۴۳	۹۵/۵۹	۷/۵	۱۵۰	۱۰۰	۴۵	۹
۰/۵۸	۷/۹۸	۶/۲۵	۱۰۳/۷۴	۷/۵	۱۵۰	۵۰۰	۱۰	۱۰
۰/۴۱	۹/۱	۶/۵	۱۱۹/۳	۴/۰	۵۰	۳۱۲	۱۰	۱۱
۱/۱۹	۵/۳۳	۴/۷۴	۶۳/۲۹	۴/۰	۱۵۰	۵۰۰	۲۹	۱۲
۰/۴۱	۱۰/۹۱	۷/۸۶	۱۳۹/۸۳	۱۰/۰	۵۰	۵۰۰	۱۰	۱۳
۱/۱۸	۸/۵۸	۷/۱۷	۱۰۳/۵۴	۱۰/۰	۱۵۰	۱۰۰	۲۹	۱۴
۱/۶۰	۹/۶۵	۸/۲	۱۴۳/۴۵	۵/۷	۹۰	۳۳۲	۴۵	۱۵
۱/۰۰	۵/۸	۴/۲۷	۷۷/۴	۴/۰	۵۰	۱۰۰	۲۸	۱۶
۰/۴۸	۹/۸۶	۷/۱۲	۱۲۳/۱۸	۴/۰	۹۳	۵۰۰	۱۰	۱۷
۱/۵۴	۱۱/۸	۸/۲	۱۳۸/۴	۱۰/۰	۵۰	۵۰۰	۴۵	۱۸
۱/۷۱	۹/۴۷	۷	۱۰۷/۱۱	۴/۰	۱۵۰۰	۳۱۲	۴۵	۱۹
۰/۶۲	۱۲/۲	۱۰/۱	۱۶۱/۶	۶/۵	۱۳۹	۲۷۲	۱۲	۲۰
۱/۱۷	۵/۵۳	۵/۳۶	۸۸/۸۹	۵/۲	۱۳۰	۱۵۲	۲۹	۲۱
۰/۷۳	۵/۱۳	۴/۳۶	۷۱/۶۹	۵/۷	۵۰	۵۰۰	۲۰	۲۲
۱/۵۴	۹/۷۵	۸	۱۴۵/۷۵	۱۰/۰	۵۰	۱۰۰	۴۵	۲۳
۰/۴۹	۹/۶۶	۷/۲۳	۱۱۱/۵۸	۷/۲	۹۷	۱۰۰	۱۰	۲۴
۰/۵۸	۱۲/۱۳	۹/۴۴	۱۴۱/۶۹	۱۰/۰	۱۵۰	۳۱۲	۱۰	۲۵
۱/۰۲	۱/۰۸	۶/۲۲	۹۹/۰۴	۶/۶	۱۰۹	۴۲۴	۲۶	۲۶
۰/۴۱	۱۰/۶۲	۷/۹۵	۱۵۵/۰۶	۱۰/۰	۵۰	۵۰۰	۱۰	۲۷
۰/۵۸	۸/۷۸	۶/۱۷	۴۰۶/۱۴	۴/۰	۱۵۰	۱۰۰	۱۰	۲۸
۱/۷۱	۸/۱۵	۶/۱۷	۹۰/۹۵	۱۰/۰	۱۵۰	۵۰۰	۴۵	۲۹
۱/۵۴	۹/۷۴	۸/۴۳	۱۴۴/۶۲	۱۰/۰	۵۰	۱۰۰	۴۵	۳۰

واریانس پرکاربردترین تکنیک به منظور تفسیر نتایج آماری است (۱۷، ۱۸). با انجام آنالیز رگرسیونی، مدل چند جمله‌ای درجه دوم برای پیش‌بینی مقدار هر یک از متغیرهای وابسته به‌دست آمد. برازش داده‌های به‌دست آمده برای تعیین مقدار هر یک از متغیرهای پاسخ براساس مدل چندجمله‌ای درجه دوم صورت گرفت و سپس با استفاده از جدول آنالیز واریانس (ANOVA) معنی‌دار بودن اثرات خطی، درجه دوم و مضرپی متغیرهای مستقل بر هر متغیر پاسخ در سطح خطای ۰/۰۵ بررسی گردید. مطابق جداول ۵ تا ۸، مدل‌های پیشنهادی می‌توانند برای پیش‌بینی مقدار پارامترهای TOC، DOC، COD و هزینه (Cost) استفاده شوند.

جدول ۴- قیمت تجاری اقلام مصرفی

اقلام	واحد	قیمت (دلار)
پراکسید هیدروژن	L	۰/۵۶
هیدروکسید سدیم	kg	۰/۲۲
اسید کلریدریک	L	۰/۳۴
دی اکسید تیتانیوم	kg	۲/۲
برق مصرفی*	kW·h	۰/۰۲

\* نرخ تقریبی هر کیلووات برق در ساعت اوج بار

در این مطالعه بهینه‌سازی فرایند تصفیه از نظر هزینه نیز با در نظر گرفتن هزینه مواد مصرفی مطابق جدول ۴ که براساس قیمت‌های تجاری اقلام مصرفی در سال‌های اخیر است انجام شد. برآورد هزینه تصفیه فاضلاب مورد مطالعه با در نظر گرفتن مقدار هر یک از مواد مصرفی و هزینه تقریبی آنها و همچنین هزینه برق مصرفی برای تامین نور فرابنفش برای هر یک از تیمارها انجام شد. مقدار کیلووات ساعت برق مصرفی در این مطالعه با احتساب مساحت  $0.074 \text{ m}^2$  برای لامپ مورد استفاده و میزان دز پرتودهی  $50000 \mu\text{Ws/cm}^2$  برابر با  $133/5 \text{ kW}\cdot\text{h}$  برآورد گردید. مقدار حجم اسید و باز مصرفی نیز با انجام تیتراسیون و ثبت مقدار تغییرات pH در مقابل حجم اسید یا باز مصرفی و سپس درون‌یابی مقدار حجم اسید یا باز با توجه به مقدار pH تعیین گردید. بدین ترتیب متغیر دیگری تحت عنوان هزینه تصفیه نیز علاوه بر متغیرهای TOC، DOC و COD به‌عنوان متغیر پاسخ در نظر گرفته شد.

## یافته‌ها

آنالیز واریانس (ANOVA) برای ارزیابی اثرات معنی‌دار متغیرهای مستقل بر روی متغیرهای پاسخ انجام شد. آنالیز

جدول ۵- ضرایب مدل رگرسیون و نتایج آنالیز واریانس برای متغیر پاسخ TOC

Source	SS	df	MS	p
Model	۱۱/۵۴	۹	۱۰۳/۶۱	<۰/۰۰۰۱
A-pH	۴۶/۱۸	۱	۴۶/۱۸	<۰/۰۰۰۱
B-H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	۰/۲۵	۱	۰/۲۵	۰/۴۵۳۹
C-TiO <sub>2</sub>	۰/۲۰	۱	۰/۲۰	۰/۵۰۴۰
D-time	۱۰/۹۴	۱	۱۰/۹۴	<۰/۰۰۰۱
AB	۲/۱۴	۱	۲/۱۴	۰/۰۴۱۲
BD	۵/۵۷	۱	۵/۵۷	۰/۰۰۲۶
B <sup>2</sup>	۴/۶۱	۱	۴/۶۱	۰/۰۰۵۱
C <sup>2</sup>	۱۵/۸۴	۱	۱۵/۸۴	<۰/۰۰۰۱
D <sup>2</sup>	۱۸/۱۱	۱	۱۸/۱۱	<۰/۰۰۰۱

جدول ۶- ضرایب مدل رگرسیون و نتایج آنالیز واریانس برای متغیر پاسخ DOC

p	MS	df	SS	Source
<0/0001	۶/۴۲	۹	۵۷/۸۵	Model
<0/0001	۲۸/۹۸	۱	۲۸/۹۸	A-pH
0/۲۰۵۸	0/۴۲	۱	0/۴۲	B-H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>
0/۲۴۹۳	0/۳۵	۱	0/۳۵	C-TiO <sub>2</sub>
0/0۱۲۹	0/۹۵	۱	0/۹۵	D-time
0/0۵۰۶	۱/۱۰	۱	۱/۱۰	AB
0/000۷	۴/۴۲	۱	۴/۴۲	BD
0/00۱۲	۳/۹۱	۱	۳/۹۱	B <sup>2</sup>
<0/0001	۱۰/۳۱	۱	۱۰/۳۱	C <sup>2</sup>
<0/0001	۶/۹۹	۱	۶/۹۹	D <sup>2</sup>

جدول ۷- ضرایب مدل رگرسیون و نتایج آنالیز واریانس برای متغیر پاسخ COD

p	MS	df	SS	Source
<0/0001	۲۰۰۴/۲۹	۹	۱۸۰۳۸/۶۳	Model
<0/0001	۸۴۲۴/۰۳	۱	۸۴۲۴/۰۳	A-pH
0/۶۳۳۳	۴۸/۷۴	۱	۴۸/۷۴	B-H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>
0/۲۴۲۴	۳۰۴/۵۳	۱	۳۰۴/۵۳	C-TiO <sub>2</sub>
0/0۳۶۷	۱۰۸۰/۹۳	۱	۱۰۸۰/۹۳	D-time
0/0۵۳۶	۹۰۱/۵۸	۱	۹۰۱/۵۸	BD
0/0۷۰۸	۷۷۷/۲۴	۱	۷۷۷/۲۴	CD
0/0۵۲۰	۹۱۵/۶۶	۱	۹۱۵/۶۶	B <sup>2</sup>
0/00۲۷	۲۶۳۶/۷۹	۱	۲۶۳۶/۷۹	C <sup>2</sup>
0/00۱۰	۳۴۴۶/۳۳	۱	۳۴۴۶/۳۳	D <sup>2</sup>

جدول ۸- ضرایب مدل رگرسیون و نتایج آنالیز واریانس برای متغیر هزینه (cost)

p	MS	df	SS	Source
<0/0001	۱/۶۴۹۹۷۸	۴	۱/۵۹۹۹۱۳	Model
<0/0001	۱/۰۴e-10	۱	۱/۰۴e-10	A-pH
<0/0001	۱/۱۶۲۶۵۸	۱	۱/۱۶۲۶۵۸	B-H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>
<0/0001	۳/۹۸e-06	۱	۳/۹۸e-06	C-TiO <sub>2</sub>
<0/0001	۶/۴۸۸۲۲۸	۱	۶/۴۸۸۲۲۸	D-time

جدول ۹- روابط پیشنهادی برای پیش بینی مقدار متغیرهای پاسخ

متغیر پاسخ	رابطه رگرسیونی
کل کربن آلی (TOC)	$TOC = -1.96 + (0.80 \times pH) + (0.13 \times H_2O_2) + (0.030 \times TiO_2) - (0.31 \times time) - (2.40E-003 \times pH \times H_2O_2) - (2.83E-005 \times H_2O_2 \times TiO_2) - (6.61E-004 \times H_2O_2 \times time) - (4.35E-004 \times H_2O_2^2) - (4.76E-005 \times TiO_2^2) + (6.19E-003 \times time^2)$
کربن آلی محلول (DOC)	$DOC = -2.32 + (0.61 \times pH) + (0.11 \times H_2O_2) + (0.02 \times TiO_2) - (0.17 \times time) - (1.80E-003 \times pH \times H_2O_2) - (6.11E-004 \times H_2O_2 \times time) - (3.91E-004 \times H_2O_2^2) - (3.81E-005 \times TiO_2^2) + (3.88E-003 \times time^2)$
تقاضای شیمیایی اکسیژن (COD)	$COD = -3.31 + (7.38 \times pH) + (1.41 \times H_2O_2) + (0.40 \times TiO_2) - (3.65 \times time) - (8.73E-003 \times H_2O_2 \times time) - (2.03E-003 \times TiO_2 \times time) - (6.03E-003 \times H_2O_2^2) - (6.08697E-004 \times TiO_2^2) + (0.085921 \times time^2)$
هزینه تصفیه هر لیتر فاضلاب	$Cost = +8.210E-006 - (7.89E-007 \times pH) + (1.70E-003 \times H_2O_2) + (2.20E-006 \times TiO_2) + (0.032 \times time)$

بین مقادیر حداقل و حداکثر برای به حداقل رساندن مقدار هر یک از متغیرهای پاسخ انجام شد. به عبارت دیگر در این مرحله سعی شد با استفاده از مدل‌های به دست آمده بهترین شرایط عملیاتی فرایند تصفیه به نحوی که مقدار هر یک از پارامترهای COD، TOC، DOC تا حداقل ممکن کاهش یابند شبیه‌سازی شود و در عین حال هزینه تصفیه هر واحد حجمی فاضلاب به حداقل ممکن برسد. در جدول ۱۱ نتایج مرحله شبیه‌سازی شرایط بهینه تصفیه از نظر اقتصادی و عملیاتی آورده شده است.

در جدول ۹ روابط رگرسیونی استخراج شده برای محاسبه مقدار هر یک از متغیرهای پاسخ آورده شده است. با آگاهی از مقدار متغیرهای مستقل می‌توان به کمک این روابط خطی، مقدار هر یک از متغیرهای پاسخ را پیش‌بینی نمود. بعد از استخراج مدل‌های پیش‌بینی کننده برای هر یک از متغیرهای پاسخ، از طریق شبیه‌سازی شرایط عملیاتی از نظر مقدار متغیرهای مستقل، می‌توان بهینه‌ترین شرایط فرایندی از نقطه نظر هزینه با بیشترین عملکرد تصفیه را پیش‌بینی کرد. در این مطالعه مطابق جدول ۱۰ شبیه‌سازی شرایط عملیاتی تصفیه با تغییر هر یک از متغیرهای مستقل در محدوده

جدول ۱۰- تعریف دامنه متغیرهای مستقل و وابسته برای پیدا کردن نقطه بهینه تصفیه

متغیر	واحد	حد بالا	حد پایین	هدف بهینه
A:pH	-	۱۰	۴	بین دامنه باشد
B:H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	mg/L	۱۵۰	۵۰	بین دامنه باشد
C:TiO <sub>2</sub>	mg/L	۵۰۰	۱۰۰	بین دامنه باشد
D:time	min	۴۵	۱۰	بین دامنه باشد
TOC	mg/L	۱۲/۲	۴/۷۷	حداقل شود
DOC	mg/L	۱۰/۱	۴/۲۳	حداقل شود
COD	mg/L	۱۶۱/۶	۵۶/۰۱	حداقل شود
Cost	\$/L	۱/۷۰۶	۰/۴۰۷	حداقل شود



مستقل بر روی تغییرات متغیرهای پاسخ را به خوبی بررسی کرد. بررسی تاثیر غلظت پراکسید هیدروژن بر روی مقدار TOC، DOC و COD در شرایطی که زمان پرتودهی در نقطه مرکزی  $27/5 \text{ min}$ ، غلظت  $\text{TiO}_2$  در نقطه مرکزی  $308 \text{ mg/L}$  و pH در نقطه مرکزی 7 ثابت نگهداشته شد، نشان داد که بیشترین میزان حذف TOC، DOC و COD در مقدار غلظت  $50 \text{ mg/L}$   $\text{H}_2\text{O}_2$  است. همچنین بررسی تاثیر  $\text{TiO}_2$  بر روی مقدار TOC، DOC و COD در شرایطی که زمان پرتودهی در نقطه مرکزی ( $27/5 \text{ min}$ ) و غلظت  $\text{H}_2\text{O}_2$  در نقطه مرکزی  $100 \text{ mg/L}$  و pH برابر مقدار ثابت 7 نگهداشته شد، نشان داد که در مقادیر کمتر از 100 و بالاتر از  $500 \text{ mg/L}$   $\text{TiO}_2$ ، مقدار پارامترهای TOC، DOC و COD کاهش می‌یابد که البته این اثر در مقادیر پایین‌تر از  $100 \text{ mg/L}$  مشهودتر بود. در این مطالعه مقدار  $100 \text{ mg/L}$   $\text{TiO}_2$  بیشترین راندمان حذف TOC، DOC و COD را تامین نمود. همچنین بررسی تاثیر pH نشان داد که با کاهش مقدار pH، مقادیر راندمان حذف TOC، DOC و COD به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. با افزایش زمان پرتودهی مقادیر راندمان حذف پارامترهای TOC، DOC و COD به‌طور قابل توجهی افزایش یافته تا جایی که در زمان پرتودهی در حدود  $30 \text{ min}$  بیشترین راندمان حذف تامین شد. لذا در این مطالعه بهترین زمان پرتودهی (بدون لحاظ کردن بررسی اقتصادی) در حدود  $30 \text{ min}$  تعیین گردید.

یکی از کاربردهای اصلی روش سطح پاسخ، بهینه‌سازی متغیرهای فرایندی است. بهینه‌سازی متغیرها به گونه‌ای صورت می‌گیرد که متغیر پاسخ در ایده‌آل‌ترین وضعیت ممکن قرار گیرد. در این تحقیق یافتن pH بهینه (در دامنه 4 تا 10)، غلظت بهینه  $\text{H}_2\text{O}_2$  (در دامنه 50 تا  $150 \text{ mg/L}$ )، غلظت بهینه  $\text{TiO}_2$  (در دامنه 100 تا  $500 \text{ mg/L}$ ) و زمان بهینه پرتودهی (در دامنه 10 تا  $45 \text{ min}$ ) به گونه‌ای که بیشترین حذف ممکن برای پارامترهای TOC، DOC و COD تامین شود، مدنظر بود. متغیر پاسخ مهم دیگر که در این مطالعه لحاظ گردید متغیر هزینه بود که مقدار حداقل هزینه به‌عنوان هدف منظور شد.

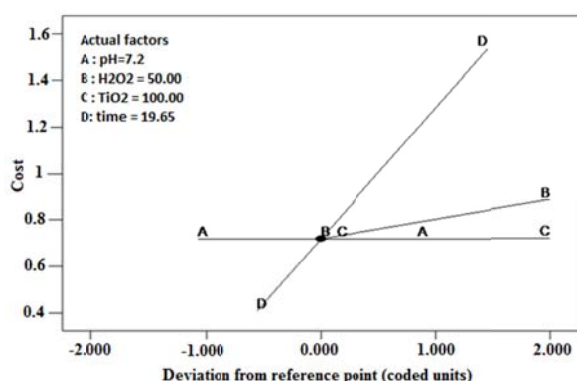
جدول 11- مقادیر متغیرهای مستقل و پاسخ در نقطه بهینه تصفیه

از نظر اقتصادی و عملیاتی

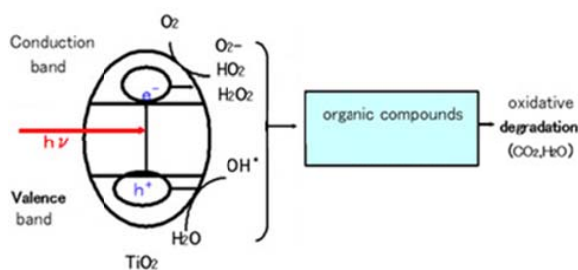
نوع متغیر	نام متغیر	مقدار
مستقل	pH	7/2
	$\text{H}_2\text{O}_2$	50
	$\text{TiO}_2$	100
	time	19/65
وابسته	TOC	6/85
	DOC	5/38
	COD	88/43
	Cost	0/71

### بحث

در جداول 5 تا 8 نتایج آنالیز واریانس برای هر یک از متغیرهای پاسخ آورده شده است. برای بررسی خوب بودن انطباق مدل‌ها بر نتایج آزمایشگاهی از ضریب تبیین ( $R^2$ ) استفاده گردید. ضریب تبیین عبارت است از نسبت مجموع مربعات تشریح شده به مجموع مربعات کل و مقدار عددی آن بین صفر و یک تغییر می‌کند.  $R^2$  مساوی یک به مفهوم تبیین تمامی واریانس متغیر پاسخ توسط متغیرهای پیشگو و  $R^2$  مساوی صفر به مفهوم برآورد کاملاً اشتباه مدل است. برای آنکه یک مدل توانایی خوبی برای تبیین واریانس متغیر پاسخ داشته باشد لازم است که  $R^2$  مدل بالای 0/8 باشد. در این تحقیق مقادیر ضریب تبیین برای مدل‌های پیش‌بینی کننده TOC، DOC، COD و Cost (هزینه) به ترتیب برابر با 0/95، 0/94، 0/85 و 0/97 تعیین گردید. این مقادیر حاکی از توانایی خوب مدل‌های ارائه شده برای پیش‌بینی متغیرهای پاسخ هستند. نتایج جدول 5 نشان می‌دهد که اثر خطی پراکسید هیدروژن و  $\text{TiO}_2$  بر روی مقدار TOC در سطح 0/05 معنی‌دار نیست. اما اثر درجه دوم آنها بر روی مقدار TOC معنی‌دار است ( $p < 0/001$ ). همچنین نتایج حاکی از معنی‌دار بودن اثر متقابل pH و  $\text{H}_2\text{O}_2$  و اثر متقابل  $\text{H}_2\text{O}_2$  و  $\text{TiO}_2$  بر مقدار TOC است ( $p < 0/05$ ). به کمک مدل‌های ایجاد شده می‌توان تاثیر هر یک از متغیرهای



نمودار ۱- نمودار انحراف برای ۴ متغیر مستقل در نقطه بهینه از نظر هزینه



شکل ۱- مکانیزم کاتالیزوری TiO<sub>2</sub> در حضور نور UV

تاثیر افزودن مواد اکسیدکننده قوی مانند پراکسید هیدروژن به سوسپانسیون TiO<sub>2</sub> به خوبی شناخته شده است و در بسیاری از مطالعات مختلف در افزایش سرعت تجزیه فتوکاتالیزوری مواد مورد مطالعه موثر بوده است (۱۹، ۲۰). مطابق شکل ۱ در فرایند اکسیداسیون پیشرفته در حضور دی اکسید تیتانیوم معدنی سازی طیف وسیعی از مواد آلی صورت می گیرد (۲۱). مطابق شکل ۱ زمانی که فوتون نور فرابنفش به سطح کاتالیزور (TiO<sub>2</sub>) برخورد کند در این حالت یک الکترون از باند والانس به باند انتقالی حرکت کرده که حاصل آن ایجاد یک حفره الکترونی (h<sup>+</sup><sub>vb</sub>) است (۲۲). h<sup>+</sup><sub>vb</sub> می تواند به طور مستقیم طیف وسیعی از آلاینده های جذب شده بر روی سطح کاتالیزور را اکسید کند و یا منجر به تولید رادیکال های هیدروکسیل (OH<sup>\*</sup>) شود که قادر خواهند بود به طور غیرانتخابی مواد آلی را اکسید نمایند. الکترون برانگیخته شده بر روی سطح

بر اساس جدول ۱۰ که نشان دهنده شرایط بهینه سازی فرایند است، ایده آل ترین نقاط بهینه برای متغیرهای مستقل به منظور حذف ترکیبات آلی از فاضلاب بیمارستانی در این مطالعه، مقدار pH برابر با ۷/۲، H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> برابر با ۵۰ mg/L، TiO<sub>2</sub> برابر با ۱۰۰ mg/L و زمان پرتو دهی برابر با ۱۹/۶۵ min تعیین گردید. چنانچه شرایط مذکور در فرایند لحاظ شود بیشترین راندمان حذف ترکیبات آلی با کمترین هزینه ممکن فراهم خواهد شد. در این حالت مطابق جدول ۱۱ باقیمانده مواد آلی در پساب بر حسب TOC، DOC و COD به ترتیب از مقادیر اولیه ۵/۳۸، ۱۹/۰۱، ۴۲/۱۱ و ۲۵۰/۵ mg/L به مقادیر ۶/۸۵، ۳۸/۵ و ۸۸/۴ mg/L کاهش یافت. به عبارتی در نقطه بهینه، میزان راندمان حذف مواد آلی بر حسب سه پارامتر مذکور به ترتیب ۶۳/۹، ۵۲/۹ و ۶۴/۷ درصد تعیین گردید. در نقطه بهینه تصفیه که هدف از آن رسیدن به حداکثر حذف مواد آلی و در عین حال انجام عملیات تصفیه با کمترین هزینه است، مقدار هزینه تصفیه به ازای هر لیتر از فاضلاب برابر با ۰/۷۱ دلار برآورد شد. به عبارت دیگر هزینه تصفیه هر متر مکعب از فاضلاب مورد مطالعه برابر با ۷۱۰ دلار خواهد بود که هزینه بالایی است. در شکل ۱ نمودار انحراف برای ۴ متغیر مستقل در نقطه بهینه از نظر هزینه نشان داده شده است. با توجه به بالا بودن ضریب متغیر زمان در مدل پیشنهادی برای هزینه در جدول ۹ و همچنین نمودار ۱ به خوبی مشخص است که هزینه تصفیه تکمیلی با استفاده از این فرایند، بیش از هر متغیر دیگری متاثر از زمان پرتو دهی و به تبع آن انرژی الکتریکی مصرفی است که توجیه پذیر بودن این فرایند را تحت تاثیر قرار خواهد داد. بعد از متغیر زمان پرتو دهی، متغیر دیگری که می تواند در نوسانات هزینه تصفیه نقش مهمی داشته باشد مقدار پراکسید هیدروژن مصرفی است. تاثیر متغیرهای pH و غلظت TiO<sub>2</sub> بر هزینه تصفیه پساب مورد مطالعه در مقایسه با زمان پرتو دهی و غلظت پراکسید هیدروژن، کمتر قابل توجه است. مطلوبیت مدل های ارائه شده در پیش بینی نقطه بهینه تصفیه برابر با ۰/۷۷ (۷۷ درصد) برآورد گردید که مقدار قابل قبولی است.

با کاهش مقدار pH، میزان راندمان حذف ترکیبات آلی افزایش یافت به نحوی که در pH ۴ بیشترین میزان حذف ترکیبات آلی حاصل شد. در این خصوص بایستی توجه داشت که تامین pHهای پایین از نظر عملیاتی به دلیل تاثیر خوردگی آن (بر تاسیسات) مقدور نیست لذا ضروری است تا فرایند تصفیه در محدوده pHهای بالاتر و نزدیک به خنثی بهینه‌سازی شود.

### نتیجه‌گیری

نتایج این تحقیق نشان داد که زمان پرتودهی بیشترین تاثیر را بر روی مقدار هزینه تصفیه تکمیلی فاضلاب بیمارستانی دارد. با این وجود می‌توان با کنترل شرایط تصفیه و بهینه‌سازی فرایند به روش RSM به شرایطی دست یافت که بیشترین راندمان حذف مواد آلی با کمترین هزینه ممکن تامین شود. در این مطالعه نقطه بهینه نقطه‌ای بود که بیشترین راندمان برای حذف مواد آلی با کمترین هزینه ممکن تامین شود. مقدار pH برابر با ۷/۲،  $H_2O_2$  برابر با ۵۰ mg/L  $TiO_2$  برابر با ۱۰۰ mg/L و زمان پرتودهی برابر با ۱۹/۶۵ min به‌عنوان شرایط بهینه عملیاتی برآورد شد. با تامین شرایط بهینه عملیاتی مقدار هزینه تصفیه هر متر مکعب از پساب مورد مطالعه برابر با ۷۱۰ دلار تخمین زده شد که این هزینه علی‌رغم تاثیر قابل توجه فرایند در حذف باقیمانده مواد آلی در پساب بیمارستانی، بیانگر گران بودن هزینه تصفیه تکمیلی پساب با فرایند  $UV/H_2O_2/TiO_2$  است. از این رو به نظر می‌رسد استفاده از چنین فرایندهایی بایستی با احتیاط بیشتر و با تاکید بر انجام مطالعات هزینه-اثر بخشی دقیق صورت پذیرد. در این مطالعه همچنین با استفاده از روش آماری RSM بهینه‌سازی فرایند از نظر عملیاتی و اقتصادی به نحو قابل قبولی امکان پذیر گردید. بدیهی است چنانچه از فرایند  $UV/H_2O_2/TiO_2$  صرف‌نظر از گران بودن آن، استفاده شود، بهینه‌سازی فرایند با استفاده از متدولوژی ارائه شده در این مطالعه می‌تواند از اتلاف هزینه در استفاده از مواد شیمیایی و همچنین انرژی جلوگیری کند.

کاتالیزور ( $e^-_{cb}$ ) توسط مولکول اکسیژن جذب شده و منجر به تولید یون‌های سوپر اکسید ( $O_2^-$ ) می‌شود. بنابراین از این طریق مانع برگشت الکترون به حفره الکترونی و از بین رفتن حفره الکترونی می‌شود و باعث تسریع واکنش تجزیه مواد آلی می‌گردد (۲۳).

افزودن  $H_2O_2$  به سیستم فتوکاتالیتیک باعث افزایش میزان تجزیه مواد آلی می‌گردد چرا که  $H_2O_2$  منجر به تشکیل رادیکال‌های  $OH^\bullet$  از دو طریق جذب مستقیم پرتوی نوری و جذب الکترون از باند انتقالی می‌شود (۲۴). روابط زیر واکنش‌های مختلفی را که می‌توانند طی فرایند فتوکاتالیستی تجزیه آلاینده‌های آلی رخ دهند نشان می‌دهند. طبق این روابط محصول نهایی این واکنش‌ها رادیکال هیدروکسیل ( $OH^\bullet$ ) است که نقش اصلی را در اکسید کردن ماده آلی ایفا می‌کند. در استفاده از  $H_2O_2$  به عنوان یک اسکاونجر (Scavenger) الکترونی بایستی توجه داشت که چنانچه این ماده بیشتر از حد بهینه یا مورد نیاز در سیستم وجود داشته باشد می‌تواند با محصولات بینابینی (Intermediants) فرایند فتوکاتالیزوری وارد واکنش شده و باعث کاهش سرعت و میزان تجزیه مواد آلی گردد. در صورتی که  $H_2O_2$  اضافی در سیستم وجود داشته باشد این ماده به‌عنوان یک اسکاونجر برای رادیکال‌های هیدروکسیل عمل می‌کند و یا اینکه می‌تواند مستقیماً با  $TiO_2$  وارد واکنش شده و تولید ترکیبات پراکسی نماید که در هر دو حالت منجر به کاهش کارایی فرایند می‌گردد. علاوه بر این  $H_2O_2$  اضافی می‌تواند با مواد آلی بر سر واکنش دادن با حفرات الکترونی روی سطح  $TiO_2$  رقابت کند (۲۵، ۲۶). بنابراین برای جلوگیری از اثرات منفی پراکسید هیدروژن بر فرایند، همواره بایستی مقدار این ماده در سیستم در حد بهینه خود حفظ شود تا حداکثر اثر را بر تصفیه مواد آلی داشته باشد. در این مطالعه افزایش مقدار پراکسید هیدروژن از ۵۰ تا نزدیک به ۱۰۰ mg/L باعث افزایش میزان راندمان حذف ترکیبات آلی گردید اما از محدوده ۱۰۰ mg/L به بالا راندمان حذف کاهش یافت. این مسئله می‌تواند به دلیل نقش اسکاونجری پراکسید هیدروژن باشد.

## ملاحظات اخلاقی

نویسندگان کلیه نکات اخلاقی شامل عدم سرقت ادبی، انتشار دوگانه، تحریف داده‌ها و داده‌سازی را در این مقاله رعایت کرده‌اند.

## تشکر و قدردانی

این مقاله از طرح تحقیقاتی مصوب که با حمایت مالی دانشگاه علوم پزشکی کردستان به انجام رسیده است، استخراج شد. از این دانشگاه به دلیل فراهم نمودن تسهیلات لازم برای انجام این پژوهش تشکر می‌گردد.

## References

- Gomez M, De la Rua A, Garralon G, Plaza F, Hontoria E, Gómez M. Urban wastewater disinfection by filtration technologies. *Desalination*. 2006;190(1):16-28.
- Liao C-H, Lu M-C, Su S-H. Role of cupric ions in the H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/UV oxidation of humic acids. *Chemosphere*. 2001;44(5):913-19.
- Khachatourians GG. Agricultural use of antibiotics and the evolution and transfer of antibiotic-resistant bacteria. *Canadian Medical Association Journal*. 1998;159(9):1129-36.
- Kruse H, Sørum H. Transfer of multiple drug resistance plasmids between bacteria of diverse origins in natural microenvironments. *Applied and Environmental Microbiology*. 1994;60(11):4015-21.
- Macauley JJ, Qiang Z, Adams CD, Surampalli R, Mormile MR. Disinfection of swine wastewater using chlorine, ultraviolet light and ozone. *Water Research*. 2006;40(10):2017-26.
- Nikkhah J, Mehr-Movahed A. Antibiotic resistance of *Shigella* species in Iran. *Iranian Journal of Public Health*. 1987;16(1-4):111-16.
- Talebi M, Rahimi F, Katouli M, Kühn I, Möllby R, Eshraghi S, et al. Prevalence and antimicrobial resistance of enterococcal species in sewage treatment plants in Iran. *Water, Air, and Soil Pollution*. 2007;185(1-4):111-19.
- Watkinson A, Micalizzi G, Graham G, Bates J, Costanzo S. Antibiotic-resistant *Escherichia coli* in wastewaters, surface waters, and oysters from an urban riverine system. *Applied and Environmental Microbiology*. 2007;73(17):5667-70.
- Selvaratnam S, Kunberger JD. Increased frequency of drug-resistant bacteria and fecal coliforms in an Indiana Creek adjacent to farmland amended with treated sludge. *Canadian Journal of Microbiology*. 2004;50(8):653-56.
- Vilanova X, Manero A, Cerdà-Cuellar M, Blanch A. The composition and persistence of faecal coliforms and enterococcal populations in sewage treatment plants. *Journal of Applied Microbiology*. 2004;96(2):279-88.
- Huber MM, Canonica S, Park G-Y, Von Gunten U. Oxidation of pharmaceuticals during ozonation and advanced oxidation processes. *Environmental Science & Technology*. 2003;37(5):1016-24.
- Snyder SA, Wert EC, Rexing DJ, Zegers RE, Drury DD. Ozone oxidation of endocrine disruptors and pharmaceuticals in surface water and wastewater. *Ozone: Science and Engineering*. 2006;28(6):445-60.
- Hashemi H, Sadeghi M, Amin M. Evaluating the performance of clarification and ultraviolet units in disinfection of Isfahan North waste water treatment plant (WWTP) effluent in pilot plant. *Journal of Shahrekord University of Medical Sciences*. 2010;12(3):77-84 (in Persian).
- Buxton GV, Greenstock CL, Helman WP, Ross AB. Critical review of rate constants for reactions of hydrated electrons, hydrogen atoms and hydroxyl radicals (. OH/. O<sup>-</sup> in aqueous solution. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*. 1988;17(2):513-886.
- Khan WZ, Najeeb I, Ishtiaque S, Jabeen S. Photodegradation of real pharmaceutical wastewater with titanium dioxide, zinc oxide, and hydrogen peroxide during UV. *IOSR Journal of Engineering*. 2016;6(7):36-46.
- Elmolla ES, Chaudhuri M. Photocatalytic degradation of amoxicillin, ampicillin and cloxacil-

- lin antibiotics in aqueous solution using UV/TiO<sub>2</sub> and UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> photocatalysis. *Desalination*. 2010;252(1):46-52.
17. Montgomery DC. *Design and Analysis of Experiments*. New York: Wiley; 2008.
18. Behnajady MA, Modirshahla N, Hamzavi R. Kinetic study on photocatalytic degradation of C.I. Acid Yellow 23 by ZnO photocatalyst. *Journal of Hazardous Materials*. 2006;133(1–3):226-32.
19. Sioi M, Bolosis A, Kostopoulou E, Poulis I. Photocatalytic treatment of colored wastewater from medical laboratories: photocatalytic oxidation of hematoxylin. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*. 2006;184(1):18-25.
20. Wolfrum E, Ollis D. Hydrogen peroxide in heterogeneous photocatalysis. In: Helz GR, Crosby DG, editors. *Aquatic and surface photochemistry*. Boca Raton: CRC-Press; 1994.
21. Ahmed S, Rasul M, Martens WN, Brown R, Hashib M. Heterogeneous photocatalytic degradation of phenols in wastewater: a review on current status and developments. *Desalination*. 2010;261(1):3-18.
22. Kansal S, Singh M, Sud D. Effluent quality at kraft/soda agro-based paper mills and its treatment using a heterogeneous photocatalytic system. *Desalination*. 2008;228(1):183-90.
23. Al-Rasheed RA. Water treatment by heterogeneous photocatalysis an overview. 4th SWCC acquired Experience Symposium; 2005; Jeddah, Saudi Arabia.
24. Rodrigues AC, Boroski M, Shimada NS, Garcia JC, Nozaki J, Hioka N. Treatment of paper pulp and paper mill wastewater by coagulation–flocculation followed by heterogeneous photocatalysis. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*. 2008;194(1):1-10.
25. Dionysiou DD, Suidan MT, Baudin I, Laîné J-M. Effect of hydrogen peroxide on the destruction of organic contaminants-synergism and inhibition in a continuous-mode photocatalytic reactor. *Applied Catalysis B: Environmental*. 2004;50(4):259-69.
26. Toor AP, Verma A, Jotshi C, Bajpai P, Singh V. Photocatalytic degradation of Direct Yellow 12 dye using UV/TiO<sub>2</sub> in a shallow pond slurry reactor. *Dyes and Pigments*. 2006;68(1):53-60.



Available online: <http://ijhe.tums.ac.ir>

Original Article



## Optimization of UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> process for the treatment of hospital effluent

M Hadi<sup>1,\*</sup>, M Solaimany Aminabad<sup>2</sup>, M Amiri<sup>2</sup>, M Arjipour<sup>2</sup>

1- Center for Water Quality Research (CWQR), Institute for Environmental Research (IER), Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran

2- Department of Environmental Health Engineering, Faculty of Health, Kurdistan University of Medical Sciences, Sanandaj, Iran

### ARTICLE INFORMATION:

**Received:** 25 September 2018

**Revised:** 10 November 2018

**Accepted:** 13 November 2018

**Published:** 19 December 2018

### ABSTRACT

**Background and Objective:** Treatment of hospital wastewaters has an important role in reducing the discharge of organics and pharmaceutical compounds into aquatic environments. Nowadays, advanced oxidation processes were extensively used for the removal of organic compounds from treated effluents. The study aimed to examine organic compounds removal from real treated effluent of a hospital treatment plant using a lab scale UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> process by optimizing the process.

**Materials and Methods:** The effluent characteristics including COD, TOC and DOC were measured and recorded. A hybrid advanced oxidation process (UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub>) was used for the removal of organic compounds. The experiments were designed using surface response methodology (RSM). The effects of the independent factors including pH, duration of UV irradiation, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and TiO<sub>2</sub> concentrations on COD, TOC, DOC and the approximate cost of treatment were assessed by analysis of variance (ANOVA).

**Results:** The optimal condition was 7.2 for pH, 50 mg/L for H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, 100 mg/L for TiO<sub>2</sub> and 19.65 min for irradiation time. This condition provided the maximum removal percentage for organic compounds with a minimum cost. The removal efficiency for TOC, DOC and COD were 63.9, 52.9, and 64.7%, respectively. The treatment cost was approximated to be \$ 0.71 per one liter of the effluent.

**Conclusion:** Irradiation and H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> concentration had the greatest impact on the cost of the treatment. UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> process seems to be an expensive process for tertiary treatment of wastewater. However, further investigations are required to evaluate the cost effectiveness of the process for a full scale operation.

**Keywords:** Process optimization, Organic residue of hospital wastewater, Advance oxidation process, Response surface methodology

### Corresponding Author:

hadi\_rfm@yahoo.com