

Water Disinfection Using Photocatalytic Process with Titanium Dioxide Nanoparticles

Mohammad Ali Zazouli¹,
Mohammad Ahanjan²,
Yousef Kor³,
Masoumeh Eslamifar⁴,
Mahboobeh Hosseini⁵,
Maryam Yousefi⁶

¹ Associate Professor, Department of Environmental Health Engineering, Health Sciences Research Center, Faculty of Health, Mazandaran University of Medical Sciences, Sari, Iran

² Assistant Professor, Department of Microbiology, Faculty of Medicine, Mazandaran University of Medical Sciences, Sari, Iran

³ MSc in Water and Wastewater Engineering, Gomishan Health Center, Golestan University of Medical Sciences, Gorgan, Iran

⁴ MSc in Microbiology, Faculty of Health, Mazandaran University of Medical Sciences, Sari, Iran

⁵ MSc in Statistics, Faculty of Health, Mazandaran University of Medical Sciences, Sari, Iran

⁶ MSc Student in Environmental Health Engineering, Student Research Committee, Faculty of Health, Mazandaran University of Medical Science, Sari, Iran

(Received December 14, 2014 ; Accepted March 7, 2015)

Abstract

Background and purpose: Disinfection is one of the most important stages in water treatment. So far, various chemical disinfection methods such as chlorination have been widely used. However, these methods have serious disadvantages, like producing DBPs. The purpose of this research was to study the efficacy of nTiO₂ photocatalyst process on removing *E.Coli* as a water microbial pollution index and effects of some parameters on its efficiency.

Materials and methods: Water was artificially contaminated with *E.Coli*. Culture method and counting were performed according to standard methods for water and wastewater and was reported as CFU/ml. The size of nTiO₂ was 20 nm that was used in the presence or absence of UV for disinfection. The Kolmogorov-Smirnov Test was used to check the normality of the data. The ANOVA and T-Test were used for analyzing the data.

Results: The results indicated that the inactivation of *Escherichia coli* increased with increase of nTiO₂ catalyst dose and contact time. However, the efficiency decreased when the number of colonies increased. Minimum, average and maximum percentage removal of nTiO₂+UV process were 75.1, 88.9±12.7, and 100%, respectively, in 40 min contact time and 0.8 g/L catalyst dose.

Conclusion: The bacteria mortality rate in the presence of UV alone was more than that of the nTiO₂ alone process. However, the efficiency of the photocatalytic process (UV+nTiO₂) was more than that of the UV alone or nTiO₂ alone.

Keywords: *Escherichia coli*, water disinfection, photocatalyst, nTiO₂

گندزدایی آب با استفاده از فرآیند فتوکاتالستی با نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم

محمدعلی ززولی^۱محمد آهنجان^۲یوسف کر^۳معصومه اسلامی فر^۴سیده محبوبه حسینی^۵مریم یوسفی^۶

چکیده

سابقه و هدف: گندزدایی آب از مهم‌ترین مراحل تصفیه‌ی آب بوده و تاکنون از روش‌های شیمیایی مختلفی از جمله کلرزنی برای گندزدایی استفاده شده است. اما این روش‌ها، مشکلات جدی همچون تولید DBPs را در پی دارند. لذا هدف از این تحقیق، مطالعه کارایی فرآیند فتوکاتالستی با نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم ($nTiO_2$) در حذف اشرشیاکلی به عنوان شاخص آلودگی میکروبی از آب و بررسی تاثیر بعضی از پارامترها بر کارایی آن می‌باشد.

مواد و روش‌ها: آب به صورت مصنوعی با اشرشیاکلی آلوده گردید. روش کشت و شمارش مطابق روش استاندارد کتاب روش‌های استاندارد آب و فاضلاب انجام و برحسب CFU/mL گزارش شد. نانوذرات TiO_2 با اندازه‌ی ۲۰ نانومتر در حضور یا عدم حضور نور فرابنفش جهت گندزدایی استفاده شد. برای بررسی نرمال بودن داده‌ها از آزمون اسمینرف-کولموگرف و جهت تحلیل داده‌ها از آزمون‌های پارامتری T-Test و ANOVA استفاده گردید.

یافته‌ها: نتایج حاکی از آن است که درصد نابودی اشرشیاکلی با افزایش دوز کاتالست $nTiO_2$ و زمان تماس افزایش می‌یابد، اما کارایی فرایند با افزایش تعداد کلنی کاهش می‌یابد. حداقل، میانگین و حداکثر درصد حذف $nTiO_2+UV$ با غلظت ۰/۸ گرم در لیتر و زمان تماس ۴۰ دقیقه به ترتیب ۷۵/۱، ۱۲/۷ ± ۸۸/۹ و ۱۰۰ درصد می‌باشد.

استنتاج: میزان مرگ و میر باکتری در حضور نور فرابنفش (UV) تنها بیش از راندمان فرآیند با $nTiO_2$ تنها است، لیکن کارایی فرآیند فتوکاتالستی ($nTiO_2+UV$) بیش از UV تنها و $nTiO_2$ تنهاست.

واژه‌های کلیدی: اشرشیاکلی، گندزدایی آب، فتوکاتالستی، نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم

مقدمه

گزارش می‌شود (۱-۲). لذا انجام گندزدایی یکی از مهم‌ترین مراحل تصفیه‌ی آب جهت اطمینان از عاری بودن آب از باکتری‌های بیماری‌زا است. در حال حاضر هدف

هرچند امروزه پیشرفت‌های زیادی در زمینه بهسازی و تصفیه آب انجام شده است اما همچنان آلودگی آب به میکروارگانیزم‌ها در آب‌های شرب

این مقاله حاصل طرح تحقیقاتی شماره ۱-۹۲ است که توسط معاونت تحقیقات و فناوری دانشگاه علوم پزشکی مازندران تامین شده است.

E-mail: maryam_u3fi7@yahoo.com

مؤلف مسئول: مریم یوسفی - ساری: کیلومتر ۱۸ جاده خزرآباد، مجتمع دانشگاهی پیامبر اعظم، دانشکده بهداشت

۱. دانشیار، گروه مهندسی بهداشت محیط، مرکز تحقیقات علوم بهداشتی، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی مازندران، ساری، ایران

۲. استادیار، گروه میکروبی‌شناسی و ویروس‌شناسی پزشکی، دانشکده پزشکی، دانشگاه علوم پزشکی مازندران، ساری، ایران

۳. کارشناس ارشد مهندسی آب و فاضلاب، مرکز بهداشت گمیسان، دانشگاه علوم پزشکی گلستان، گرگان، ایران

۴. کارشناس ارشد میکروبیولوژی، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی مازندران، ساری، ایران

۵. کارشناس ارشد آمار، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی مازندران، ساری، ایران

۶. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی بهداشت محیط، کمیته تحقیقات دانشجویی، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی مازندران، ساری، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۹/۲۳ تاریخ ارجاع جهت اصلاحات: ۱۳۹۳/۱۱/۵ تاریخ تصویب: ۱۳۹۳/۱۲/۱۶

گندزدایی آب صرفاً غیر فعال سازی ارگانسیم‌های پاتوژن نبوده بلکه اهدافی اصلی نظیر: حذف یا تقلیل تشکیل (DBPs) Disinfection by-products؛ تامین یک باقیمانده جهت کنترل آلودگی‌های ثانویه؛ مراقبت در تامین میزان باقیمانده گندزدا در نقطه مصرف برای سلامت مصرف کنندگان مدنظر می‌باشد (۳). تاکنون روش‌های گوناگونی جهت گندزدایی آب به کار گرفته شده است که کلرنی به دلیل ارزانی و قابل دسترس بودن و اثر ابقایی مناسب متداولترین ماده و روش گندزدایی است (۴) ولی مخاطرات جانی و مالی ناشی از نشت گاز کلر در محل بهره‌برداری و محیط زیست از یک طرف و عوارض سوء کیفیت محصولات فرعی گندزدایی، توجیه فنی کاربرد آن را به چالش‌های روزافزون سوق می‌دهد. لذا دانش جدید به دنبال پیدایش مواد، ابزار و تکنیک‌های سازگار با محیط زیست است که ضمن ارتقاء کیفیت و راندمان گندزدایی آب و فاضلاب و صرف انرژی و هزینه‌ی کم‌تر، منجر به حداقل تولید محصولات فرعی مضر و حداکثر پایداری در آب و فاضلاب گردد (۵). در این شرایط کشف مواد و تکنیک‌های موثرتر در گندزدایی مانند اشعه ماورای بنفش، گاز ازن، نمک طعام و ... به دلایلی از قبیل راندمان بیشتر، عوارض کم‌تر، سهولت در دستیابی، راحتی کاربرد، امنیت بیشتر، بهره‌برداری آسان‌تر و کنترل دقیق‌تر در حال گسترش روزافزون است (۶). در سال‌های اخیر نانوذرات فتوکاتالیستی در طیف گسترده‌ای از زمینه‌های تحقیقاتی، از جمله زمینه‌های زیست محیطی مرکز توجه بوده‌اند (۷). در میان نانو مواد مختلف، دی‌اکسید تیتانیوم (TiO_2) فتوکاتالیست نیمه رسانایی است که بیش‌تر از همه مورد مطالعه و استفاده قرار گرفته است. خواص فتوکاتالیستی آن در برنامه‌های مختلف زیست محیطی برای حذف آلاینده‌ها از آب و هوا استفاده شده است (۸). نیمه‌رساناها بر خلاف فلزات که دارای سطوح الکترونی پیوسته‌ای هستند، دارای دو سطح انرژی می‌باشند. لایه ظرفیت در

سطح انرژی پایین قرار گرفته و لایه‌ی هدایت که در سطح بالاتر است. فاصله‌ی انرژی بین لایه ظرفیت و لایه‌ی هدایت یک خاصیت ذاتی در نیمه‌رساناها بوده و عامل تعیین کننده‌ی جمعیت لایه‌ی هدایت همراه با افزایش حرارت می‌باشد و هدایت حرارتی نیمه رساناها را کنترل می‌نماید. وقتی این دو لایه بیشتر از ۳ الکترون ولت تفکیک شده باشند، غلظت الکترون آزاد کاهش بیش‌تری پیدا می‌کند و در نتیجه چنین ماده‌ای نارسانا می‌شود. گاف انرژی TiO_2 ، ۳/۲ الکترون ولت می‌باشد. برانگیختن نوری یک نیمه‌رسانا، منجر به بالا رفتن الکترون‌ها از لایه ظرفیت به لایه‌ی هدایت می‌شود. در فلزات چون سطوح پیوسته‌ای از انرژی وجود دارد، نیمه عمر زوج الکترون/حفره چنان کوتاه است که الکترون حاصل از برانگیختن نوری قابل بهره‌برداری نیست. اما وجود گاف انرژی در نیمه‌رساناها از غیر فعال شدن سریع زوج‌های برانگیخته‌ی الکترون/حفره، که فقط با بازترکیب، غیر فعال می‌شود، جلوگیری می‌کند. این امر، طولانی بودن نیمه عمر زوج الکترون/حفره را برای شرکت در واکنش‌های انتقال الکترون در روی سطح ذره مهیا می‌کند (۹).

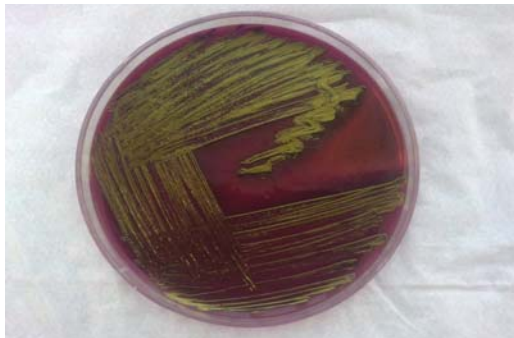
مطالعات متعدد نشان دادند که فرآیند فتوکاتالیستی در حذف میکروارگانسیم‌ها کارآمد می‌باشند (۱۴-۱۰). اما هنوز سوالاتی در خصوص کارایی آن‌ها در نابودی پاتوژن‌ها، شرایط دقیق دوز مصرفی، زمان تماس و بار میکروبی و امکان کاربرد آن‌ها برای گندزدایی آب وجود دارد. لذا هدف از این تحقیق، مطالعه کارایی فرآیند فتوکاتالیستی با نانوذرات TiO_2 در حذف اشرشیاکلی به عنوان شاخص آلودگی میکروبی از آب و بررسی تاثیر بعضی از پارامترها بر کارایی آن می‌باشد.

مواد و روش‌ها

- تهیه و کشت باکتری

از آن‌جایی که شاخص آلودگی قطعی آب باکتری اشرشیاکلی است لذا برای تهیه آب آلوده به میکرو-

باکتری در میلی لیتر بوده، استفاده گردید. میزان جذب استاندارد مک فارلند در دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۶۲۰ نانومتر خوانده شد. تعدادی کلنی در ۱۰ میلی لیتر آب مقطر استریل مخلوط گردید و میزان جذب آن نیز قرائت گردید. میزان جذب برابر، نشان دهنده تعداد باکتری برابر در نمونه و استاندارد مک فارلند می باشد. غلظت های مورد نیاز ۱۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۰۰۰۰ CFU بوده که با رقیق سازی نمونه مقایسه شده با استاندارد مک فارلند به دست آمد. روش کشت و شمارش مطابق روش استاندارد کتاب روش های استاندارد آب و فاضلاب انجام شد (۱۶).



تصویر شماره ۱: کشت خطی باکتری E.Coli در محیط کشت EMB

تهیه استاندارد نیم مک فارلند

جهت استاندارد کردن غلظت تلقیح باید از استاندارد سولفات باریم، برابر با استاندارد نیم مک فارلند استفاده شود (۱۷). در جدول شماره ۱ نسبت استاندارد مک فارلند با تعداد تقریبی باکتری آمده است.

جدول شماره ۱: نسبت استاندارد مک فارلند با تعداد تقریبی باکتری

استاندارد مک فارلند	تعداد تقریبی باکتری ($\times 10^8$) در میلی لیتر
۰/۵	۱/۵
۱	۳
۲	۶
۳	۹
۴	۱۲

روش انجام فرآیند گندزدایی

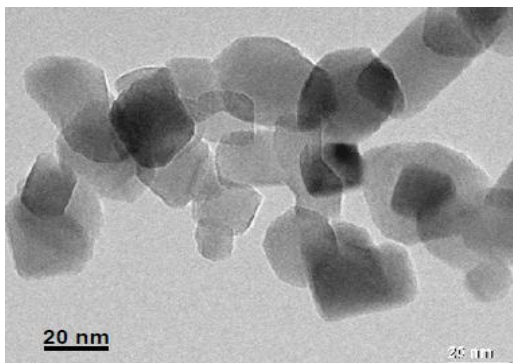
فرآیند فتو کاتالیستی با نانو ذره دی اکسید تیتانیوم تهیه شده از UsNano، با اندازه آن ۲۰ نانومتر در حضور

ارگانسیم از اشرشیا کلی (ATCC 25922) (PTCC: 1399) تهیه شده از مرکز منطقه ای کلکسیون قارچ ها و باکتری های صنعتی ایران (PTCC)، به شکل آمپول لیوفیلیزه استفاده شد. میکروارگانسیم مطابق دستورالعمل مرکز مذکور تکثیر شد (۱۵). از آن جایی که میکروارگانسیم به شکل آمپول لیوفیلیزه خریداری شد. برای باز کردن آمپول لیوفیلیزه به روش زیر عمل گردید: محیط کشت های TSB (که در وسایت مرکز منطقه ای قارچ ها و باکتری های صنعتی ایران برای E.Coli خریداری شده، توصیه گردیده بود) و EMB agar خریداری و بر حسب دستورالعمل ساخته شد. مواد و لوازم مورد نیاز به مدت ۱۵ دقیقه در اتوکلاو استریل گردید. آمپول لیوفیلیزه در زیر هود لامینار بر روی تنظیف قرار داده شد. آمپول را با پنبه آغشته به الکل ضد عفونی نموده و با قلم در قسمتی که پنبه در داخل آمپول قرار داشت، خراش ایجاد کرده و شکانده شد. با پنس استریل پنبه را خارج نموده، سپس ۰/۴ میلی لیتر از محلول استریل (سرم فیزیولوژی) را به ماده خشک درون آمپول اضافه کرده و به دقت مخلوط شد تا سوسپانسیون یکنواختی ایجاد گردید. کل سوسپانسیون را روی یک لوله حاوی ۲۰ میلی لیتر محیط کشت Tryptic Soy Broth (TSB) منتقل نموده، در داخل انکوباتور با دمای ۳۷ درجه سانتی گراد به مدت ۲۴ ساعت قرار داده شد. قطرات آخر سوسپانسیون روی پلیت حاوی محیط کشت EMB agar (جهت اطمینان از خلوص کشت) منتقل و کشت خطی داده شد. بقایای آمپول و لوازم مصرفی در اتوکلاو به مدت ۲۰ دقیقه در دمای ۱۲۱ درجه سانتیگراد و فشار ۱۵ Psi قرار داده شد (۱۵). سوسپانسیون انتقال داده شده به محیط کشت TSB، پس از ۲۴ ساعت از انکوباتور خارج شد و به محیط کشت EMB agar در پلیت انتقال و کشت خطی داده شد (تصویر شماره ۱). پس از ۲۴ ساعت که پلیت در انکوباتور قرار گرفت، باکتری آماده گردید. برای رسیدن به غلظت های مورد نیاز از استاندارد ۰/۵ مک فارلند که معادل با $10^8 \times 1/5$

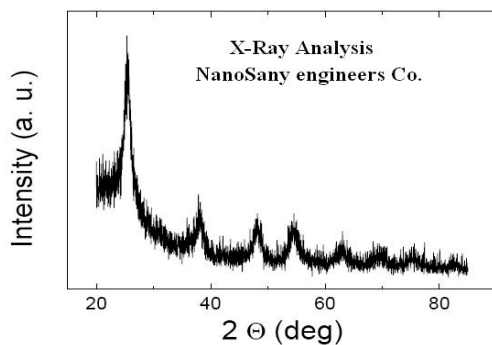
شده آمده است. همانطوریکه در این جدول دیده می‌شود اندازه نانو ذره در حدود ۲۰ نانومتر می‌باشند. تصویر TEM و XRD نانو ذره در تصاویر شماره ۲ و نمودار شماره ۱ آمده است.

جدول شماره ۲: مشخصات نانو ذره دی‌اکسید تیتانیوم انازاز و نقره

مشخصات	دی‌اکسید تیتانیوم انازاز
خلوص درصد	>۹۹
اندازه (نانومتر)	۱۰-۲۵
مساحت سطح (مترمربع به ازای گرم)	۲۰۰-۲۴۰
رنگ	سفید
دانسیته (گرم بر سانتی متر مکعب)	۳/۹
pH	۶-۶/۵
کاهش وزن ناشی از خشک شدن٪	۴/۱۷
کاهش وزن ناشی از سوزاندن٪	۸/۲۴



تصویر شماره ۲: عکس TEM از نانو ذره دی‌اکسید تیتانیوم



نمودار شماره ۱: XRD نانو ذره دی‌اکسید تیتانیوم

- آزمون نرمال بودن داده‌ها

جهت بررسی نرمال بودن داده‌ها از آزمون اسمینوف-کولموگروف (Kolmogorov-Smirnov Test) استفاده شد. چنانچه $p > 0.05$ باشد، بیانگر آن است که

نور فرابنفش انجام شد. برای انجام فرآیند گندزدایی توسط نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم از راکتور موصوف در ذیل استفاده شد. ابتدا نمونه‌ها را به ۵ ظرف انتقال داده و به هر کدام مقادیر مختلف شامل: ۰.۲، ۰.۴، ۰.۶ و ۰.۸ گرم در لیتر TiO_2 افزوده و در تماس با اشعه UV قرار گرفت. از هر ظرف در زمان‌های ۱۰، ۲۰، ۴۰ و ۶۰ دقیقه نمونه برداری صورت گرفت. دامنه دوز نانو ذرات و زمان نمونه برداری بر اساس مطالعات پیشین انتخاب و تعیین گردید (۱۲-۸، ۱۱).

- راکتور مورد استفاده

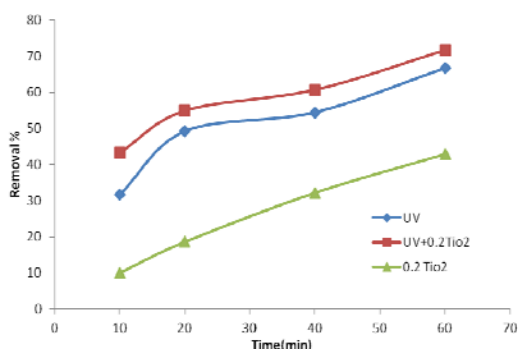
در این مطالعه از راکتوری از جنس مکعب مربعی جنس شیشه‌ای استفاده شد. در وسط راکتور جایی ویژه برای استقرار لامپ فرابنفش و ظروف حاوی نمونه در نظر گرفته شد. لامپ با پوشش کوارتزی احاطه شد تا به طور مستقیم با آب تماس پیدا نکند. بیک طول موج منتشره از لامپ فرابنفش مورد استفاده در این مطالعه، ۲۴۷/۳ نانومتر و از نوع UV-C بود. اطراف راکتور شیشه‌ای جهت حفاظت در برابر اشعه لامپ UV با فویل آلومینیومی پوشانده گردید. اختلاط در راکتور با استفاده از همزن مغناطیسی و مگنت انجام گرفت. جهت خشک‌سازی راکتور از مبرد آبی استفاده گردید. نمونه برداری در زمان‌های ۱۰، ۲۰، ۴۰ و ۶۰ دقیقه انجام شده و روند حذف اشرشیاکلی در این راکتور بررسی شد. شدت لامپ UV، مورد استفاده در راکتور از دستگاه رادیومتر هنگر مدل ECL-X مخصوص اندازه‌گیری شدت لامپ‌های محدوده تابشی UV-C استفاده می‌شود. شدت لامپ در فاصله نصف قطر راکتور (حدود ۷ سانتی متری)، در زمان‌های مختلف کنترل و مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. شدت لامپ برابر $1/8 \text{ w/m}^2$ بود.

یافته‌ها

- مشخصات نانو ذره

در جدول شماره ۲ مشخصات نانو ذره خریداری

الف. پراکنده‌گی آزمون نرمال است.
ب. محاسبه شده از داده‌ها



نمودار شماره ۲: تاثیر UV و nTiO₂ بصورت تنها و تلفیقی در حذف باکتری اشریشیا کلی آب (تعداد باکتری ۱۰^۵ کلنی در میلی‌لیتر).

بررسی اثرات متقابل بین سه فرایند فتو، کاتالیست و فتوکاتالیستی در کارایی گندزدایی (با ۱۰^۵ کلنی در میلی‌لیتر و غلظت نانوتیتانیوم ۰/۲ گرم در لیتر) با استفاده از آزمون آماری LSD با اطمینان ۹۵ درصد انجام شد. نتیجه آنالیز واریانس نشان داد که تاثیر فرایند nTiO₂ تنها در مقایسه با UV تنها معنی‌دار است (p < ۰/۰۵) هم‌چنین مقایسه اثر فرایند فتوکاتالیستی nTiO₂+UV با فرایند nTiO₂ تنها معنی‌دار است (p < ۰/۰۵)، اما تاثیر فرایند UV در مقایسه با فرایند nTiO₂+UV معنی‌دار نیست (p > ۰/۰۵). هرچند کارایی گندزدایی فرایند فتوکاتالیستی (nTiO₂+UV) بیش از UV تنها است.

تاثیر تعداد میکروارگانیزم

برای تعیین اثر تعداد باکتری (CFU/mL) بر عملکرد فرایند فتوکاتالیستی با UV/nTiO₂، اشریشیا کلی با سه دانسیته غلظت یعنی ۱۰^۳ CFU/mL، ۱۰^۴ CFU/mL و ۱۰^۵ CFU/mL در حضور ۰/۲ گرم در لیتر ذرات nTiO₂ و UV قرار گرفت. شرایط pH ثابت حفظ شد و زمان ۱۰، ۲۰، ۴۰ و ۶۰ دقیقه تماس برقرار شد. نمودار شماره ۳ بیانگر تاثیر تعداد کلنی بر کارایی فرایند فتوکاتالیستی UV/nTiO₂ در حذف اشریشیا کلی است. دوز ذرات nTiO₂ در این سری آزمایشات ۰/۲ گرم در لیتر بود.

داده‌ها نرمال می‌باشند. در این صورت از آزمون‌های پارامتری T-Test و ANOVA برای تحلیل داده‌ها استفاده خواهد شد. نتیجه آزمون نرمال بودن داده‌های برای کلیه آزمایشات فرآیند فتوکاتالیستی با تیتانیوم اکسید در جدول شماره ۳ آمده است. همان‌طوری که در این جدول دیده می‌شود، p > ۰/۰۵ که بیانگر نرمال بودن داده است.

- تاثیر UV و nTiO₂ بر راندمان فرآیند

برای تعیین اثر UV و nTiO₂ به صورت تنها و تلفیقی سه سری فرآیند انجام شد. در هر سه آزمایش تعداد ثابتی از کلنی در میلی‌لیتر (۱۰^۵) استفاده شد. آزمایش اول فقط باکتری در تماس با نور UV بدون nTiO₂ قرار گرفت. در آزمایش دوم باکتری در تماس با nTiO₂ بدون نور UV قرار گرفت. آزمایش سوم باکتری در تماس با نور UV و nTiO₂ قرار گرفت. غلظت nTiO₂ ۰/۲ گرم در لیتر به کار گرفته شد. در زمان‌های ۱۰، ۲۰، ۴۰ و ۶۰ دقیقه برای هر سری آزمایش راندمان تعیین شد. pH تمام آزمایشات در دامنه خنثی (۷/۵±۰/۵) تنظیم شد. روند و میزان مرگ و میر حذف باکتری در طی زمان‌های مختلف در نمودار شماره ۲ آمده است. همان‌طوری که این نمودار نشان می‌دهد، میزان مرگ و میر در حضور نور UV تنها بیش از راندمان فرآیند با nTiO₂ تنها است لیکن کارایی فرآیند فتوکاتالیستی (nTiO₂+UV) بیش از UV تنها و nTiO₂ تنها است.

جدول شماره ۳: آزمون اسمینزف-کولموگروف جهت نرمال بودن داده‌های مربوط به فرآیند UV+TiO₂

تاثیر UV و TiO ₂	تاثیر E.Coli با		تعداد (N)
	TiO ₂	TiO ₂ +UV	
میانگین	۶۴/۶۲۹۲	۷۱/۴۴۷۵	۶۹/۱۳۹۰
انحراف معیار	۱۸/۸۲۱۳۳	۱۷/۴۱۳۰۰	۱۶/۹۰۸۴۲
حداکثر اختلافات	۰/۱۲۹	۰/۱۲۸	۰/۱۱۲
مثبت	۰/۰۸۴	۰/۰۸۵	۰/۱۰۲
منفی	-۰/۱۲۹	-۰/۱۲۸	-۰/۱۱۲
آماره آزمون اسمینزف-کولموگروف (Z)	۰/۴۴۸	۰/۴۴۴	۰/۵۰۳
سطح معنی‌داری مجانبی (۲ طرفه)	۰/۹۸۸	۰/۹۸۹	۰/۹۶۲

(Asymp. Sig. (2-tailed))

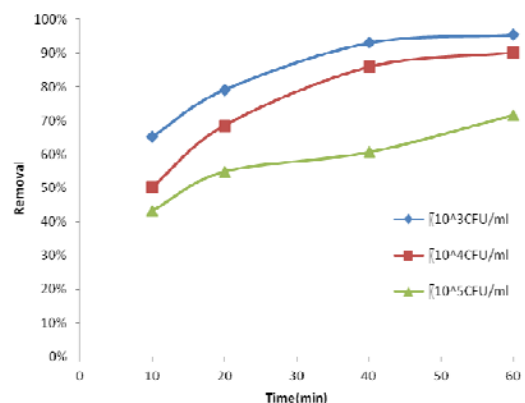
بنابراین لازم بود اثر بار کاتالیست در غیرفعال سازی اشرشیاکلی بررسی شود. برای این منظور چهار غلظت نانوذرات دی اکسید تیتانیوم یعنی ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶ و ۰/۸ گرم در لیتر استفاده شود. برای مشاهده بهتر نتایج، دانسیته باکتریایی آب مورد آزمایش در حدود تقریبی 10^5 CFU/mL تنظیم شد. نتایج این مرحله آزمایش در جدول شماره ۴ ذکر شده است. نتایج حاکی از آن است که درصد نابودی اشرشیاکلی با افزایش دوز کاتالیست $nTiO_2$ و زمان تماس افزایش می یابد. نتیجه آنالیز واریانس مربوط به مقایسه تاثیر دوز $nTiO_2$ بر کارایی گندزدایی با استفاده از فرآیند فتو کاتالیستی UV با 10^5 CFU/mL نشان داد که فرایند گندزدایی با $UV+TiO_2$ تنها، در مقایسه با فرایند فتو کاتالیستی UV با دوز ۰/۲ گرم در لیتر $nTiO_2$ معنی دار نبوده ($p > 0.05$)، اما در سایر موارد (۰/۴، ۰/۶ و ۰/۸) معنی دار است ($p < 0.05$). همچنین کارایی نابودی باکتری در دوز ۰/۸ گرم در لیتر دی اکسید تیتانیوم با دوز ۰/۲ گرم در لیتر $nTiO_2$ معنی دار است ($p < 0.05$) و در سایر موارد معنی دار نیست ($p > 0.05$).

تاثیر اثر زمان تماس

در نمودار شماره ۴ تاثیر زمان تماس ۱۰، ۲۰، ۴۰ و ۶۰ دقیقه بر کارایی گندزدایی (10^5 CFU/mL) روش فتو کاتالیستی نانو ذرات دی اکسید تیتانیوم نشان می دهد. همان طوری که دیده می شود با افزایش زمان تماس کارایی گندزدایی افزایش یافت. نتیجه آنالیز واریانس مربوط به مقایسه تاثیر زمان تماس بر کارایی گندزدایی با استفاده از فرآیند فتو کاتالیستی با $nTiO_2$ (10^5 CFU/mL) نشان داد که کارایی فرآیند

همان طوری که نمودارهای این شکل نشان می دهد، کارایی فرآیند با افزایش تعداد کلنی کاهش می یابد به طوری که کارایی گندزدایی با افزایش تعداد کلنی ها به 10^5 در میلی لیتر کمتر از زمانی است که تعداد کلنی 10^3 و 10^4 در میلی لیتر می باشد.

نتیجه آنالیز واریانس مربوط به مقایسه تاثیر دانسیته باکتری بر کارایی گندزدایی با استفاده از فرآیند فتو کاتالیستی (غلظت تیتانیوم ۰/۲ گرم در لیتر) نشان داد که راندمان حذف در دو غلظت پیاپی معنی دار نیست ($p > 0.05$). فقط بین حالتی که تعداد کلنی 10^2 CFU/mL است با حالتی که تعداد کلنی 10^5 CFU/mL می باشد، تاثیرشان معنی دار است ($p < 0.05$). زیرا هرچه دانسیته باکتری افزایش یابد میزان تماس با نانوذرات و محصولات فتو کاتالیستی کاهش می یابد.



نمودار شماره ۲: تاثیر تعداد کلنی بر کارایی فرایند فتو کاتالیستی $UV/nTiO_2$ (غلظت ذرات $nTiO_2$ ۰/۲ گرم در لیتر)

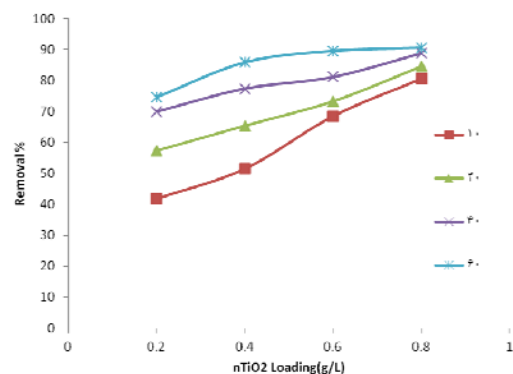
تاثیر غلظت نانو تیتانیوم اکسید

مطالعات نشان داد که بار کاتالیست TiO_2 در گندزدایی فتو کاتالیستی نقش موثری ایفا می کند (۱۰)

جدول شماره ۴: تاثیر غلظت نانو تیتانیوم بر کارایی فرایند فتو کاتالیستی $UV/nTiO_2$ در حذف اشرشیاکلی در زمان های مختلف (10^5 CFU/mL)

شماره آزمایش	$nTiO_2$ (g/l)	زمان تماس (دقیقه)											
		۶۰	۴۰	۲۰	۱۰								
		حد اکثر	حد اقل	Ave±SD	حد اکثر	حد اقل	Ave±SD	حد اکثر	حد اقل	Ave±SD	حد اکثر	حد اقل	Ave±SD
۱	۰/۲	۳۷/۳	۴۴/۱/۸	۴۴/۸	۴۵/۹	۴۴/۸	۴۴/۱/۸	۴۴/۸	۴۴/۱/۸	۴۴/۱/۸	۴۴/۱/۸	۴۴/۱/۸	۴۴/۱/۸
۲	۰/۴	۴۳/۵	۷/۶±۵۱/۳	۵۸/۶	۵۵/۹	۵۵/۹	۵۵/۹	۵۵/۹	۵۵/۹	۵۵/۹	۵۵/۹	۵۵/۹	۵۵/۹
۳	۰/۶	۵۵/۹	۱۱±۶۸/۵	۷۶/۶	۶۴/۵	۶۴/۵	۶۴/۵	۶۴/۵	۶۴/۵	۶۴/۵	۶۴/۵	۶۴/۵	۶۴/۵
۴	۰/۸	۶۹/۷	۹/۵±۸۰/۶	۸۶/۵	۷۱/۹	۷۱/۹	۷۱/۹	۷۱/۹	۷۱/۹	۷۱/۹	۷۱/۹	۷۱/۹	۷۱/۹

فتوکاتالیستی در زمان ۱۰ دقیقه در غلظت ۰/۲ و ۰/۴ گرم در لیتر nTiO₂ با زمان تماس ۲۰، ۴۰ و ۶۰ دقیقه معنی دار است (p<۰/۰۵). در حالی که کارایی فرآیند براساس زمان با افزایش غلظت نانوذره nTiO₂ با غلظت‌های ۰/۶ و ۰/۸ گرم معنی دار نیست (p>۰/۰۵). به عبارتی در حالت‌هایی که غلظت‌های بیش‌تری از nTiO₂ بکاربرد گرفته شد معنی دار نیست (p>۰/۰۵)، هر چند روند افزایشی محسوسی وجود دارد.



نمودار شماره ۴: تاثیر زمان تماس بر کارایی فتوکاتالیستی nTiO₂+UV در گندزدایی با تعداد اولیه ۱۰^۵ CFU/mL اشرشیاکلی

بحث

تاثیر UV و nTiO₂ بر راندمان فرآیند

این مطالعه نشان داد که کارایی فرآیند فتوکاتالیستی (nTiO₂+UV) بیش از UV و nTiO₂ به تنهایی است و میزان مرگ و میر در حضور نور UV تنها بیش از راندمان فرآیند با nTiO₂ تنها است. نتایج این مطالعه با سایر مطالعات همخوانی دارد. مطالعه رحیم و همکاران در خصوص غیرفعال سازی اشرشیاکلی با تعداد ۱۰^۸ CFU/mL در حضور UV و نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم آنتاز با اندازه ۳ تا ۷ نانومتر نشان داد که اثر نور UV تنها و کاتالیست nTiO₂ تنها در غیرفعال سازی تفاوت چندانی ندارد اما میزان غیرفعال سازی باکتری در حالت فتوکاتالیستی بیشتر می‌باشد (۱۰). رحمانی و همکاران هم در خصوص حذف کلیفرم توسط روش فتوکاتالیستی با TiO₂ بیان داشتند که راندمان حذف

کلیفرم در حضور تابش UV و تماس با TiO₂ به صورت مجزا کم‌تر از حالت تلفیقی UV+TiO₂ بود. همچنین راندمان TiO₂ تنها کم‌تر از UV تنها گزارش شد. به طوری که راندمان حالت تلفیقی چند برابر حالت تنها نور یا کاتالیست است. آن‌ها بیان داشتند که در حالت تلفیقی رادیکال‌های هیدروکسیل تولید می‌شود که منجر به افزایش کارایی فرآیند می‌شود. اما در غیاب UV ذرات TiO₂ جذب بعضی میکروارگانیسم‌ها می‌شوند که موجب راندمان کم در حذف کلیفرم‌ها می‌شوند (۱۸).

مطالعه Cheng و همکاران در خصوص تصفیه آب با استفاده از نانو نیمه‌هادی نظیر TiO₂ و ZnO به صورت فتوکاتالیستی نشان داد که نانو ذره ZnO موثرتر از نانوذره TiO₂ است. به علاوه آن‌ها نشان دادند که UVA تنها موثرتر از TiO₂ تنها در حذف اشرشیاکلی می‌باشد. آن‌ها با مقایسه‌ای بین فرآیند فتوکاتالیستی TiO₂ با نور UVC و UVA دریافتند که فرآیند TiO₂+UVC در حذف اشرشیاکلی موثرتر از فرآیند TiO₂+UVA می‌باشد. غلظت نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم ۰/۰۱ تا ۱ گرم در لیتر استفاده شد (۱۱).

Sunada و همکاران در مطالعه‌ای بیان داشتند که مکانیسم نابودی اشرشیاکلی با فرآیند فتوکاتالیستی nTiO₂ دارای سه مرحله زیر است: (۱) لایه بیرونی غشاء مورد حمله قرار می‌گیرد و به طور جزئی توسط گونه‌های بسیار واکنش‌پذیر نظیر OH⁻، O₂ و H₂O₂ متلاشی می‌شوند؛ (۲) بهم خوردن ترتیب غشاء داخلی که منجر به پیش‌اکسیداسیون چربی غشاء و در نهایت نابودی سلول خواهد شد؛ (۳) سلول‌های مرده متلاشی می‌گردند. چنانچه تابش نور تا مدت زمان کافی ادامه یابد، اشرشیاکلی کلی به طور کامل به دی‌اکسید کربن، آب و سایر مواد معدنی تبدیل خواهد شد (۱۹).

تاثیر غلظت نانو تیتانیوم اکسید

نتایج حاکی از آن است که درصد نابودی اشرشیاکلی با افزایش دوز کاتالیست nTiO₂ و زمان

تماس افزایش می‌یابد. این نتیجه مطابق با نتایج تحقیق دیگران بود (۲۰۱۰، ۱۲، ۱۸، ۲۰).

Lydakis-Simantiris و همکاران برای گندزدایی فتوکاتالیستی از نانوذرات TiO_2 با دوز ۰/۵ تا ۱ گرم در لیتر برای آب طبیعی و فاضلاب استفاده نمودند. هدف آن‌ها نابودی کلیفرم‌های کل و انتروکوکوسی‌ها بود. آن‌ها دریافتند که افزایش بار کاتالیست از ۰/۵ به ۱ گرم در لیتر موجب تشدید نابودی باکتری‌ها شد. هم‌چنین بیان داشتند که انتروکوکوسی‌ها نسبت کلیفرم‌ها مقاومت بیش‌تری به گندزدایی به روش فتوکاتالیستی نشان دادند. این ناشی از آن است که ساختار دیواره سلولی میکروارگانیسم‌ها متفاوت خواهد بود. دیواره سلولی کلیفرم‌های کل، سلول باکتری‌های گرم منفی، دارای لایه پپتیدوگلیکان نازک‌تری در مقایسه با انتروکوکوسی‌ها، به عنوان گرم مثبت، می‌باشند. هم‌چنین یکی از دلایل مقاومت بیش‌تر انتروکوکوسی‌ها ناشی از ترکیب کپسول پلی‌ساکاریدها لایه بیرون دیواره سلولی است. این ترکیب خیلی لزج است و به عنوان پوشش ممانعت‌کننده عمل می‌کند. در نهایت حمله اکسیدکنندگی غشاء سلولی موجب پیش‌اکسیداسیون چربی خواهد شد. بنابراین ترکیبی از آسیب به غشاء سلولی و حملات اکسیدکنندگی اجزاء داخل سلولی منجر به مرگ سلول خواهد شد. هرچه غلظت نانوذرات TiO_2 افزایش یابد، میزان نفوذ TiO_2 افزایش یافته و میزان آسیب بین سلولی افزایش می‌یابد (۱۲). مطالعه رحیم و همکاران در خصوص غیرفعال‌سازی اشرشیاکلی با تعداد 10^8 CFU/mL در حضور UV و نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم آنتاز با اندازه ۳ تا ۷ نانومتر و سه دوز ۰/۱، ۱ و ۲/۵ گرم در لیتر نشان داد که درصد بقاء اشرشیاکلی با افزایش زمان تماس و غلظت نانوذره کاهش می‌یابد. آن‌ها نشان دادند که میزان غیرفعال‌سازی بهینه اشرشیاکلی در حضور دوز ۱ گرم در لیتر nTiO_2 در زمان تماس بیش از ۳ ساعت در حدود ۸۰ درصد می‌باشد. بیان داشتند که غلظت ۰/۱ گرم در لیتر nTiO_2

برای غیرفعال‌سازی کافی نمی‌باشد. در ضمن غلظت ۲/۵ گرم در لیتر nTiO_2 موجب اشباع شدن سوسپانسیون شده و موجب اثر پراکندگی نور و حالت بازدارندگی فرایند می‌شود (۱۰). در تحقیق حاضر nTiO_2 با چهار غلظت کم‌تر از ۱ گرم در لیتر به کار گرفته شد که با افزایش غلظت درصد غیرفعال‌سازی باکتری افزایش می‌یابد به طوری که در غلظت ۰/۶ و ۰/۸ میلی‌گرم در لیتر nTiO_2 و زمان تماس ۶۰ دقیقه ماکزیم حذف (در حالت متوسط) یعنی قریب ۹۰ درصد باکتری‌ها نابود می‌شوند (به جدول ۴ مراجعه شود). مطالعه حذف کلیفرم توسط روش فتوکاتالیستی با TiO_2 با غلظت صفر تا ۱/۴ گرم در لیتر توسط رحمانی و همکاران نشان داد که راندمان حذف کلیفرم با افزایش غلظت تا ۰/۸ گرم در لیتر افزایش می‌یابد اما در غلظت‌های بیش‌تر قابلیت گندزدایی کاهش می‌یابد. علت آن جذب و پراکندگی نور UV توسط ذرات معلق دی‌اکسید تیتانیوم اعلام شد (۱۸).

Pratap Reddy و همکاران از TiO_2 تنها و اکسید تیتانیوم که بر روی نوعی زئولیت ($\text{H}\beta$ Zeolite) تثبیت شده بود جهت گندزدایی فتوکاتالیستی اشرشیاکلی استفاده نمودند. در این مطالعه دانسیته اشرشیاکلی 10^7 CFU/mL تنظیم شد. در حالت TiO_2 تنها، غلظت آن از ۰/۱ تا ۱/۵ گرم در لیتر انتخاب شد که بعد از ۲۸۰ دقیقه باکتری‌ها به طور کامل حذف شدند. آن‌ها مشاهده کردند که با افزایش غلظت کاتالیست، کارایی حذف افزایش می‌یابد و در غلظت ۰/۷۵ گرم در لیتر کاتالیست راندمان حذف در مدت ۴۰ دقیقه تماس به ۹۹ درصد رسید. افزایش غلظت بیش از ۰/۷۵ گرم در لیتر موجب کاهش حذف باکتری‌ها شد که ناشی از افزایش کدورت محلول می‌باشد. افزایش کدورت محلول نفوذ نور UV را کاهش می‌دهد و بنابراین تعداد کم‌تری از رادیکال هیدروکسیل تولید خواهد شد که منجر به کاهش فعالیت باکتری‌کشی خواهد شد. از طرفی افزایش مقدار کاتالیست منجر به غیرفعال‌سازی

مولکول‌های فعال به واسطه تصادم مولکول‌ها و همچنین تجمع TiO_2 موجب کاهش سطح موثر کاتالیست خواهد شد. در این مطالعه نتیجه گرفته شد که غلظت 0.75 گرم در لیتر کاتالیست غلظت بهینه جهت حذف اشرشیاکلی است. همچنین آنان بیان داشتند که TiO_2 تثبیت شده بر روی زئولیت راندمان بیش تری نسبت به TiO_2 تنها دارد (۲۰). نتیجه آنالیز واریانس نشان داد که فقط کارایی نابودی باکتری در دوز 0.8 گرم در لیتر با 0.2 گرم در لیتر $nTiO_2$ معنی دار است و در سایر موارد معنی دار نیست. هرچند با افزایش دوز نانو، نابودی باکتری‌ها روند افزایش دارد اما این افزایش کند است که ناشی از اثرات پراکندگی نور بواسطه افزایش مقدار نانوذره خواهد بود. مطالعه Coleman و همکاران هم نشان داد که در غلظت‌های زیاد $nTiO_2$ ، اثر سایه و کدورت غالب شده و بنابراین میزان نوری که به نانوذره می‌رسد را کاهش خواهد داد (۱۳).

تاثیر اثر زمان تماس

در این مطالعه با افزایش زمان تماس کارایی گندزدایی افزایش یافت. در واقع هرچه زمان تماس افزایش یابد، میزان تماس نانوذرات با باکتری، نفوذ آن به داخل سلول باکتری، تولید رادیکال‌ها و گونه‌های بسیار واکنش پذیر نظیر OH ، O_2 و H_2O_2 بیش تر شده و میزان مرگ و میر باکتری‌ها افزایش می‌یابد (۱۹). رحمانی و همکاران نشان دادند که حذف فتوکاتالیستی با کاتالیست TiO_2 باکتری‌های کلیفرم با افزایش زمان تماس (از ۵ دقیقه به ۹۰ دقیقه) به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد به نحوی که بعد از ۶۰ دقیقه از بین رفتن باکتری روند تقریباً ثابتی دارد. آن‌ها نشان دادند ۱۰۰ درصد باکتری‌ها در مدت ۶۰ تا ۷۵ دقیقه تماس با غلظت 0.8 گرم در لیتر TiO_2 از بین می‌روند (۱۸). بررسی Liu و همکاران در خصوص تجزیه فتوکاتالیستی اشرشیاکلی در آب با استفاده از نور خورشید و $nTiO_2$ و نوع جدید نانوذره که با ازت داپ شده بود

(N-Dope $nTiO_2$) نشان داد که پس از تماس با نور خورشید به مدت ۲ ساعت، تعداد کلنی اشرشیاکلی از 10^9 CFU/mL به 10^5 CFU/mL کاهش یافت. برای فرآیند فتوکاتالیستی با نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم با نام تجاری Degussa P25 تعداد شمارش سلولی به 10^3 CFU/mL کاهش یافت اما برای فرآیند فتوکاتالیستی با $nTiO_2$ N-Dope شمارش سلول اشرشیاکلی قابل شناسایی نبود. سرعت غیرفعال‌سازی اشرشیاکلی از واکنش درجه اول پیروی می‌کند (۱۴). هم‌چنین مطالعه Prata Reddy و همکاران که از TiO_2 تنها و اکسید تیتانیوم تثبیت شده بر روی نوعی زئولیت ($H\beta$ Zeolite) جهت گندزدایی فتوکاتالیستی اشرشیاکلی با دانسیته 10^6 CFU/mL استفاده نمودند، دریافتند که با افزایش زمان تماس تا ۲۸۰ دقیقه، راندمان حذف روند افزایشی دارد به طوری که در حالت TiO_2 تنها، بعد از ۲۸۰ دقیقه باکتری‌ها به طور کامل حذف شدند (۲۰). مطالعه Kumar و Raza در خصوص گندزدایی فتوکاتالیستی آب با کامپوزیت نانو کریستال $Ag-TiO_2$ نشان داد که با افزایش زمان ماند تا ۶۰ دقیقه تعداد باکتری‌ها به شدت کاهش می‌یابد (۲۱). باتوجه به یافته‌ها و بحث به عمل آمده، نتیجه‌گیری حاصل از این تحقیق به شرح زیر می‌باشد:

کارایی گندزدایی فرآیند فتوکاتالیستی $nTiO_2+UV$ بیش از کاتالیست با نانوذره تنها است. یعنی نور UV اثر تشدیدکنندگی بر کارایی نانو ذرات دارد. مقایسه اثر گندزدایی فرایند فتوکاتالیستی $nTiO_2+UV$ با فرایند $nTiO_2$ تنها و UV تنها معنی دار است ($p < 0.05$)، اما تاثیر فرایند UV در مقایسه با فرایند $nTiO_2+UV$ در دوز 0.2 گرم در لیتر $nTiO_2$ معنی دار نیست ($p > 0.05$). هرچند کارایی گندزدایی فرآیند فتوکاتالیستی ($nTiO_2+UV$) بیش از UV تنها است. هم‌چنین تاثیر فرایند $nTiO_2$ تنها در مقایسه با UV تنها معنی دار است ($p < 0.05$).

حداقل، میانگین و حداکثر درصد حذف $nTiO_2+UV$ با غلظت 0.8 گرم در لیتر و زمان تماس

سپاسگزاری

بدینوسیله از حمایت مالی گروه تحقیقات و بهره‌برداری شرکت آب و فاضلاب روستایی استان گلستان در تامین هزینه این تحقیق با شماره طرح ملی ۹۱/۱۹۲۰ سپاسگزاری می‌گردد. از معاونت محترم تحقیقات و فناوری دانشگاه علوم پزشکی مازندران و کارکنان آزمایشگاه میکروبیولوژی دانشکده بهداشت ساری که شرایط انجمن تحقیق را فراهم آورده‌اند، قدردانی می‌شود.

۴۰ دقیقه به ترتیب $۷۵/۱$ ، $۱۲/۷ \pm ۸۸/۹$ و ۱۰۰ درصد می‌باشد.

کارایی نابودی باکتری در دوز $۰/۸$ گرم در لیتر دی‌اکسید تیتانیوم با دوز $۰/۲$ گرم در لیتر $nTiO_2$ معنی‌دار است و در سایر موارد معنی‌دار نیست. هرچند با افزایش دوز نانو، نابودی باکتری‌ها روند افزایش دارد اما این افزایش کند است که ناشی از اثرات پراکندگی نور به‌واسطه افزایش مقدار نانوذره خواهد بود.

References

- Zazouli M, Safarpour Ghadi M, Veisi A, Habibkhani P. Bacterial Contamination in Bottled Water and Drinking Water Distribution Network in Semnan, 2012. J Mazandaran Univ Med Sci 2013; 22(1): 151-159 (Persian).
- Hashemi Karouei SM, Eslamifar M, Zazouli MA. Determination of Fecal Coliform Contamination of Water Supplies in Some Rural Areas of Sari, Iran with Most Probable Number Test. J Mazandaran Univ Med Sci 2013; 23(104): 89-95 (Persian).
- Hrudey SE, Hrudey EJ. Alternative Disinfectants and Oxidants Guidance Manual. Safe Drinking Water: Lessons from Recent Outbreaks; Washington D.C: U.S. EPA; Environmental Protection Agency; 1999. p. 346.
- Environmental protection Agency (EPA). Water Treatment Manual: Disinfection. Johnstown Castle, Co. Wexford, Ireland 2011.
- Alipoor V, Bazrafshan E. Water Treatment, Theoretical and Practical Principle of Operation of Drinking Water Facilities. Isfahan: Soroush; 2002 (Persian).
- Zazouli MA, Bazrafshan E. Water and Wastewater Technology. Tehran: Samat; 2009 (Persian).
- Nakata K, Fujishima A. TiO_2 photocatalysis: Design and Applications. Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews 2012; 13(3): 169-189.
- Li Q, Mahendra S, Lyon DY, Brunet L, Liga MV, Li D, et al. Antimicrobial Nanomaterials for Water Disinfection and Microbial Control: Potential Applications and Implications. Water Res 2008; 42(18): 4591-602.
- Eslami A. Survey on the Potential of Photocatalytic Processes for Degradation of MTBE in Contaminated Water. PhD thesis of environmental Health engineering. Tehran Univ Medic Sci. 2007.
- Rahim S, Radman S, Hamzah A. Inactivation of Escherichia coli under Fluorescent Lamp using TiO_2 Nanoparticles Synthesized Via Sol Gel Method. Sains Malaysiana 2012; 41(2): 219-224.
- Cheng Z, Ting K-E, Tao Y, Goh A, Yin X-J. Studies on Water Treatment using Nano-Semiconductors as Photocatalysts. Sustain Environ Res 2010; 20(5): 281-286.
- Lydakiss-Simantiris N, Riga D, Katsivela E, Mantzavinou D, Xekoukoulotakis NP. Disinfection of Spring Water and Secondary Treated Municipal Wastewater by TiO_2

-
- Photocatalysis. *Desalination* 2010; 250(1): 351-355.
13. Coleman HM, Marquis CP, Scott JA, Chin SS, Amal R. Bactericidal Effects of Titanium Dioxide-based Photocatalysts. *Chemical Engineering Journal* 2005; 113(1): 55-63.
 14. Liu Y, Li J, Qiu X, Burda C. Novel TiO_2 Nanocatalysts for Wastewater Purification: Tapping Energy from the Sun. *Water Sci Technol* 2006; 54(8): 47-54.
 15. Available from: <http://ptcc.irost.org/>. Accessed February 20, 2015 (Persian).
 16. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 22nd ed: American Water Works Assn (AWWA); 2012.
 17. Garcia L. Preparation of Routine Media and Reagents Used in Antimicrobial Susceptibility Testing. In: *Clinical Microbiology Procedures Handbook*. Garcia LS. 3rd ed. Washington, DC: ASM Press; 2010. p. 181-201.
 18. Rahmani A, Samarghandi M, Samadi M, Nazami F. Photocatalytic Disinfection of Coliform Bacteria using UV/TiO_2 . *J Res Health Sci* 2009; 9(1): 1-6.
 19. Sunada K, Watanabe T, Hashimoto K. Studies on Photokilling of Bacteria on TiO_2 Thin Film. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry* 2003; 156(1-3): 227-233.
 20. Pratap Reddy M, Phil H, Subrahmanyam M. Photocatalytic Disinfection of *Escherichia coli* over Titanium (IV) Oxide Supported on H β Zeolite. *Catalysis Letters* 2008; 123(1-2): 56-64.
 21. Kumar RV, Raza G. Photocatalytic Disinfection of Water with Ag- TiO_2 Nanocrystalline Composite. *Ionics* 2009; 15(5): 579-587.