

Research paper**Evaluation of the efficiency of TiO₂ coating on steel substrates in the removal of *E. coli* using the photocatalytic method****A. Seifi^{1*}****Extended Abstract****Introduction:**

By growing the population and expanding industries, the need for sustainable and efficient wastewater treatment methods has become increasingly urgent. Among the different technologies, advanced photocatalytic oxidation is a promising technology, gaining attention for its ability to disinfect water and wastewater with minimal formation of harmful by-products. This study explored the use of titanium dioxide (TiO₂) nanoparticles for photocatalytic disinfection of water contaminated with *Escherichia coli* (*E. coli*), focusing on using different stainless-steel substrates to enhance disinfection performance. The primary objective was to identify optimal conditions for achieving maximum bacterial removal efficiency while ensuring the stability and reusability of the coated substrates.

Materials and Methods:

In this research, TiO₂ nanoparticles were deposited on various stainless-steel substrates, including the inner surface of stainless-steel pipes, brushed stainless-steel sheets, and stainless-steel meshes. The TiO₂ nanoparticles were coated at different dosages (5, 10, 15, and 35 mg/cm²) on surfaces, and their performance was evaluated under UV light (6 W) for a residence time of 90 minutes. The brushed stainless-steel sheet was coated using physical vapor deposition (PVD), providing a durable and uniform TiO₂ layer. In contrast, stainless-steel meshes and the inner surfaces of stainless-steel pipes were coated using solution-based methods by brushing, followed by heat treatment to stabilize the coating. To assess the effectiveness of these coatings, laboratory experiments were conducted using ultrapure water contaminated with *E. coli* at an initial concentration of approximately 10⁹ CFU/ml. The photocatalytic disinfection process was carried out in a reactor equipped with a UV light source (6 W). Samples were collected at intervals (2, 5, 10, 20, 30, 60, and 90 minutes), and bacterial concentrations were determined using standard agar plate culture methods. Disinfection efficiency was calculated based on the bacterial log reduction and removal percentages of *E. coli*. The pseudo-first-order kinetic model was applied to analyze the disinfection data, and reaction rate constants (k) were determined to assess the effectiveness of different coatings. In addition, statistical analyses, including the Mann-Whitney U test and

1- Associated Professor, Department of Water Science & Engineering, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan, Iran.

* Corresponding Author: a.seifi@vru.ac.ir

Received: 2024/12/12

Accepted: 2025/02/06

Kruskal-Wallis test, were employed to evaluate differences in performance between various coating conditions.

Result and Discussion:

The study revealed that TiO₂ coatings on the inner surfaces of stainless-steel pipes achieved the highest bacterial removal efficiencies, reaching 99.99% disinfection within 20 minutes at dosages of 35 mg/cm² and 5 mg/cm². However, the coatings on stainless-steel pipes exhibited stability issues, as TiO₂ particles gradually shed over time, which could reduce their long-term effectiveness. In contrast, stainless-steel mesh coated with TiO₂ nanoparticles at a dosage of 10 mg/cm², combined with UV irradiation, achieved a removal efficiency of 99.96% within 30 minutes. This configuration demonstrated a balance between high efficiency and stability, making it a reliable choice for sustained applications. Furthermore, the stainless-steel mesh showed better resistance to particle shedding compared with the inner surfaces of the pipes. The disinfection process was effectively described by the pseudo-first-order kinetic model, as indicated by high correlation coefficients (R^2). The highest reaction rate constants (k) were observed for coatings on stainless-steel pipes (35 mg/cm²) and stainless-steel meshes (10 mg/cm²). Statistical analyses revealed no significant differences in disinfection efficiency between these two configurations. This result suggested that stainless-steel mesh coated with 10 mg/cm² dosages of TiO₂ offers an equally effective and more stable alternative. The findings established the critical role of nanoparticle dosage in determining the performance of photocatalytic systems. The findings from this research provided valuable insights into the design and optimization of sustainable water treatment technologies that align with global efforts to address water scarcity and pollution challenges. Currently, numerous water treatment plants worldwide are equipped with UV lamps that use ultraviolet light for water disinfection. However, studies have shown that relying solely on UV light can lead to the production of smaller-than-average colony phenotypes in surviving bacteria, which can pose a serious health risk. Therefore, the industrial-scale application of TiO₂ nanoparticles as a sustainable and effective disinfection method in water treatment should be considered. However, challenges such as costs, nanoparticle stability, and the need for advanced technologies to separate and recover photocatalysts must still be addressed. Therefore, it is recommended to investigate the durability and reusability of TiO₂ coatings under continuous operation, to evaluate the effectiveness of alternative light sources, including solar or energy-efficient LEDs, to reduce operational costs, to extend the findings to pilot-scale studies to assess the feasibility of implementing TiO₂-based photocatalytic systems in industrial water treatment facilities, and to examine the potential environmental risks associated with TiO₂ nanoparticle shedding and develop strategies for nanoparticle recovery and reuse.

Keywords: Nanomaterial immobilization, Stainless-steel mesh, Disinfection, Coating, Pseudo-first-order kinetic model.

Citation: Seifi A., 2025. Evaluation of the efficiency of TiO₂ coating on steel substrates in the removal of *E. coli* using the photocatalytic method. *Iranian Water Research Journal*, 56, pp. 35-44. <https://dx.doi.org/10.22034/IWRJ.2025.15044.2649>



مقاله پژوهشی

بررسی کارایی لایه‌نشانی TiO_2 بر بسترهای استیل در حذف *E. coli* با روش فوتوکاتالیستی

اکرم سیفی^{*۱}

چکیده

در سال‌های اخیر، استفاده از روش‌های نوین فوتواکسیداسیون پیشرفته برای گندزدایی آب و فاضلاب به منظور تأمین نیازهای روزافزون با کمترین مضر ثانویه بسیار مورد توجه قرار گرفته است. این پژوهش با هدف بررسی گندزدایی آب آلوده به باکتری *E. coli* با استفاده از سطوح (شامل بخش داخلی لوله استیل، ورق استیل خش‌دار و توری استیل) لایه‌نشانی شده با نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم (TiO_2) تحت فرآیندهای فوتوکاتالیستی انجام شد. تأثیر دوز مصرفی نانوذرات به مقدار ۵، ۱۰، ۱۵ و ۳۵ میلی‌گرم بر سانتی‌مترمربع بر راندمان حذف باکتری‌ها در شرایط آزمایشگاهی بررسی گردید. آب خالص آلوده به باکتری با غلظت اولیه تقریباً 10^9 CFU/ml تحت تابش UV با توان ۶ وات ارزیابی شد. نتایج نشان داد که روش لایه‌نشانی TiO_2 روی توری استیل با دوز ۱۰ میلی‌گرم بر سانتی‌مترمربع همراه با تابش UV روش بهینه است؛ به طوری که پس از ۳۰ دقیقه، راندمان حذف ۹۹/۹۶٪ به‌دست آمد. تحلیل‌های آماری نشان داد که مدل سینتیک شبه‌درجه اول به خوبی با داده‌های اندازه‌گیری شده انطباق دارد. بیشترین مقدار k به ترتیب برای لایه‌نشانی درون لوله استیل و روی توری استیل به‌دست آمد. این نتایج نشان‌دهنده اثر قابل توجه دوز نانوذرات و شرایط لایه‌نشانی در راندمان گندزدایی است.

واژه‌های کلیدی: تثبیت نانو مواد، توری استیل، گندزدایی، لایه‌نشانی، مدل سینتیک شبه‌درجه اول.

ارجاع: سیفی، اکرم، ۱۴۰۴. بررسی کارایی لایه‌نشانی TiO_2 بر بسترهای استیل در حذف *E. coli* با روش فوتوکاتالیستی. مجله پژوهش آب ایران، ۵۶، صص. ۳۵-۴۴. <https://dx.doi.org/10.22034/IWRJ.2025.15044.2649>

۱- دانشجویار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه ولیعصر رفسنجان.

* نویسنده مسئول: a.seifi@vru.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۱۸

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۲۲

مقدمه

افزایش جمعیت، توسعه صنایع و شهرها، محدودیت منابع آب و حساسیت محیط زیست، استفاده از پساب تصفیه‌شده در کشاورزی، صنعت و فضای سبز را افزایش داده است. عوامل بیماری‌زای موجود در فاضلاب، تغییرات قابل توجهی در ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک (Tabatabaei and Najafi, 2009) و چالش‌های محیط زیستی ایجاد می‌کند. حذف میکروب‌های بیماری‌زا از معیارهای اصلی تصفیه آب است و گندزدایی به‌عنوان آخرین مرحله تصفیه، نقش حیاتی در ایمن‌سازی آب دارد (Mecha et al., 2019). هدف گندزدایی، نه تنها غیرفعال‌سازی پاتوژن‌ها، بلکه کاهش تشکیل محصولات جانبی گندزدایی است (Hrudey and Charrois, 2012). از این‌رو استفاده از روش‌های کم هزینه، پایدار و دوست‌دار محیط زیست برای گندزدایی پساب‌ها مورد توجه قرار گرفته‌اند.

تاکنون روش‌های مختلفی از جمله کلرزی، ازن‌زی و امواج UVC برای گندزدایی آب استفاده شده‌اند. کلرزی، هرچند رایج‌ترین روش است، اما تولید تری‌هالومتان‌های سرطان‌زا و خطرات ناشی از نشت کلر، استفاده از آن را محدود می‌کند (Zazouli et al., 2015; Pajandi, 2012). روش ازن‌زی فاقد این اثرات جانبی بوده و در هنگام تخریب به اکسیژن تبدیل می‌شود (Garoma et al., 2010). استفاده از امواج UVC نیز با وجود راندمان بالا، برگشت‌پذیری مجدد باکتری‌های غیرفعال شده را نشان داده‌اند (Pablos et al., 2013).

فرآیندهای فوتوکاتالیستی به‌عنوان یکی از روش‌های زیست‌محیطی نوین و رایج در کشورهای صنعتی، شامل واکنش‌های شیمیایی تحت تابش نور بدون تغییر در ماده فوتوکاتالیست هستند. این فرآیندها که مبتنی بر تولید رادیکال هیدروکسیل هستند (Amanighadim et al., 2017)، انرژی و زمان کمتری مصرف کرده و امکان بازیافت ماده گندزا را فراهم می‌کنند. در سال‌های اخیر، نانوذرات فوتوکاتالیستی مانند دی‌اکسید تیتانیوم (TiO_2) در تصفیه آب و محیط زیست کاربرد گسترده‌ای یافته‌اند. TiO_2 با تابش نور خورشید یا فرابنفش، رادیکال‌های آزاد تولید کرده و آلودگی‌های آلی و میکروب‌های بیماری‌زا را تجزیه می‌کند. این ماده، غیرسمی، کم‌هزینه و پایدار بوده و از رشد مجدد میکروب‌ها جلوگیری می‌کند.

(Rincón and Pulgarin, 2007; Chen et al., 2014; Von Gunten, 2018). شکاف انرژی TiO_2 برابر با $3/2$ الکترون‌ولت است که فوتون‌های فرابنفش معمولاً سبب تحریک تولید گونه‌های اکسیژن فعال (ROS) و افزایش تخریب باکتریایی TiO_2 می‌شود (Zhang et al., 2019; Saravanan et al., 2021).

سیستم‌های گندزدایی فوتوکاتالیستی به دو دسته سیستم‌هایی با ذرات کاتالیست معلق و سیستم‌های با کاتالیست تثبیت شده، تقسیم می‌شوند. ذرات معلق در محلول‌ها به دلیل تماس بیشتر با آلاینده‌ها، واکنش‌های سریع‌تری دارند، اما بازیابی و پایداری آنها دشوارتر است (Hosseini et al., 2022). در حالت کاتالیست‌های تثبیت‌شده، نانومواد روی زیرلایه‌هایی مانند شیشه، فولاد ضدزنگ، سرامیک و استیل رسوب داده شده و در انواع رآکتورها به‌کار گرفته می‌شوند (Marugán et al., 2015; Hosseini et al., 2022). رسوب یک لایه نازک یا پوشش روی یک سطح، خواص شیمیایی، حرارتی، نوری یا محیطی زیرلایه را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Kışla et al., 2023).

لایه‌نشانی نانو مواد روی بسترها به دو روش فرآیندهای محلول‌محور و فرآیندهای بخارمحور اصلی انجام می‌شود. روش‌های محلول‌محور شامل تکنیک‌هایی مانند پوشش‌های الکتروشیمیایی، سل-ژل، چرخشی، غوطه‌وری و اسپری هستند که ساده، سریع و مقرون‌به‌صرفه هستند اما محدودیت‌هایی در نوع زیرلایه و خطرات استفاده از حلال دارند. روش‌های بخارمحور، مانند رسوب فیزیکی بخار (PVD) و رسوب شیمیایی بخار (CVD) از گازها یا مواد تبخیر شده برای پوشش‌دهی سطوح بهره می‌برند و پوشش‌های یکنواخت و بادوامی را ایجاد می‌کنند. اما این روش‌ها پیچیده و زمان‌بر بوده و به تجهیزات پیشرفته نیاز دارند (Kışla et al., 2023).

تحقیقات گسترده‌ای برای ارزیابی فرآیند گندزدایی فوتوکاتالیستی فاضلاب با استفاده از نانوذرات TiO_2 لایه‌نشانی شده روی سطوح مختلف در حضور تابش UV انجام شده است. با این حال، پرسش‌هایی درباره تأثیر دوز نانوذرات، زمان ماند، پوشش تحت لایه‌نشانی و روش لایه‌نشانی وجود دارد. درک این اثرات می‌تواند تصمیم‌گیری برای استفاده از این تکنولوژی در تصفیه فاضلاب را تسهیل کند (He et al., 2021). در تحقیقی،

مواد و روش‌ها

لایه‌نشانی فوتوکاتالیست TiO_2

در تحقیق حاضر از پودر نانو TiO_2 فاز آناتاز تولید USNANO و روش‌های لایه‌نشانی نانوذرات روی پوشش‌های استیل استفاده شده است. مراحل لایه‌نشانی بسترهای متفاوت استیل به صورت زیر است:

- لایه‌نشانی نانوذرات TiO_2 داخل لوله استیل ۳۰۴ به مقدار ۳۵ میلی‌گرم بر سانتی‌مترمربع (شکل ۱): شامل مراحل (۱) شستشوی داخلی لوله استیل ۳۰۴ با اسید هیدروکلریک ۲۵ درصد و هوا خشک کردن و قرار دادن در کوره ۲۰۰ درجه سانتیگراد، (۲) محلول کردن مقدار ۱۳/۸ گرم پودر نانو TiO_2 در اتانول ۲۰ درصد و رساندن محلول مورد نظر به چگالی ۶۰ میلی‌گرم بر لیتر توسط آب مقطر (طول لوله استیل مورد نظر ۲۵ سانتی‌متر و قطر آن ۵ سانتی‌متر بوده و از آنجایی که غلظت ۳۵ میلی‌گرم بر سانتی‌مترمربع پودر نانو TiO_2 روی سطح استیل انتخاب شده است؛ بنابراین مقدار پودر نانو TiO_2 برابر با ۱۳/۸ گرم محاسبه شد) (۳) محلول آماده شده از مرحله قبل را چندین مرتبه داخل لوله مورد نظر اسپری کرده و هر مرتبه، لوله در کوره‌ای با دمای ۲۷۰ درجه سانتی‌گراد و به مدت ۵ ساعت قرار داده شد (Ho et al., 2010).

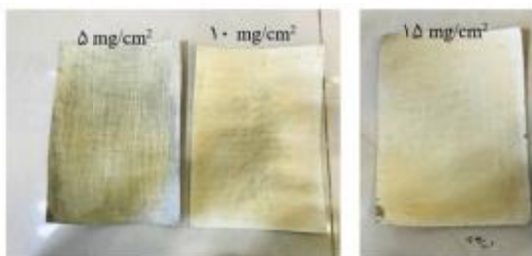


شکل ۱- لوله استیل ۳۰۴ لایه‌نشانی شده با نانوذرات TiO_2 با غلظت ۳۵ میلی‌گرم بر سانتی‌مترمربع

- لایه‌نشانی نانوذرات TiO_2 داخل لوله استیل ۳۰۴ به مقدار ۵ میلی‌گرم بر سانتی‌مترمربع: شامل مراحل اجرایی (۱) شستشوی داخلی لوله استیل ۳۰۴ با اسید هیدروکلریک ۲۵ درصد و هوا خشک کردن و قرار دادن در کوره ۲۰۰ درجه سانتیگراد، (۲) محلول کردن مقدار ۲ گرم نانوذرات TiO_2 در آب مقطر و رساندن pH محلول مورد نظر به عدد یک با اسید هیدروکلریک ۱N

عملکرد فوتوکاتوره‌های مختلف برای ضد عفونی فوتوکاتالیستی سوسپانسیون‌های آبی حاوی باکتری *E. coli* بررسی شد. نانو مواد TiO_2 روی دیواره داخلی راکتور و بستر ثابت لایه‌نشانی شدند. نتایج نشان داد که افزایش چگالی لایه TiO_2 پس از تثبیت، سطح TiO_2 فعال برای تخریب باکتری‌ها را کاهش می‌دهد. اگرچه فعالیت گندزدایی راکتورهای لایه‌نشانی شده کمتری از دوغاب TiO_2 بود (۶ لوگ کاهش در مدت ۱۸۰ دقیقه برای فاضلاب)، اما پایداری و مقاومت بیشتری در برابر مواد آلی داشتند (Van Grieken et al., 2009). در مطالعه‌ای، فیلتر مش تیتانیوم اصلاح‌شده (TiO_2 (TMiP™) به همراه یک لامپ UV و یک واحد ازن‌سازی (TiO_2 (TMiP™) برای گندزدایی آب استفاده شد. این سیستم توانست *E. coli* فاضلاب را طی ۱۵ دقیقه به طور چشمگیری کاهش دهد (Ochiai et al., 2013). در پژوهش دیگری، از پارچه‌های سلولزی لایه‌نشانی شده با TiO_2 به روش پاشش پلاسمای کم‌فشار، برای تخریب فوتوکاتالیستی باکتری *E. coli* تحت تابش UV-LED استفاده شد. این پارچه‌ها طی یک ساعت با مدل سینتیکی شبه‌درجه اول، باکتری‌ها را غیرفعال کردند و رشد مجدد مشاهده نشد. همچنین قابلیت استفاده مجدد آنها تأیید شد (De Vietro et al., 2019). اثر گندزدایی لایه‌نشانی TiO_2 با غلظت‌های یک و سه درصد روی شیشه بررسی شد. غلظت پایین‌تر یک درصد غیرفعال‌سازی سریع در مراحل رشد نمایی ایجاد کرد و حدود ۹۶/۲٪ از باکتری‌ها پس از ۲۱۰ دقیقه تخریب شدند (Isopencu et al., 2022).

با وجود پژوهش‌های گسترده در زمینه تصفیه فاضلاب، استفاده از روش اکسیداسیون پیشرفته با بستر ثابت استیل لایه‌نشانی شده توسط TiO_2 به منظور گندزدایی *E. coli* کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در تحقیق حاضر، راندمان حذف باکتری‌های بیماری‌زا از آب آلوده به روش فوتوکاتالیست، توسط نانو ذرات TiO_2 لایه‌نشانی شده روی لوله، ورق خش‌دار و توری استیل تحت تابش فرابنفش مورد بررسی قرار گرفت. هدف تعیین زمان بهینه تماس برای حذف باکتری‌های *E. coli* تحت شرایط متفاوت پوشش لایه‌نشانی شده است.



شکل ۲- توری استیل ۳۰۴ مش ۱۴۰۰ لایه‌نشانی شده با نانوذرات TiO_2 با غلظت‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ میلی‌گرم بر سانتی‌مترمربع

- لایه‌نشانی TiO_2 روی ورق استیل خَش‌دار ۳۰۴ با روش PVD: تیتانیوم تصعید شده و در محیطی خلاء و با انرژی بالا با اکسیژن واکنش داده شد. سپس رسوب فلزی، به صورت فیلم‌های نازک روی ورق استیل خَش‌دار ۳۰۴ قرار گرفتند. این فرآیند در کارخانه برنزااستیل انجام شده است (شکل ۳). خلاصه مشخصات تیمارها در جدول ۱ ارائه شده است.



شکل ۳- ورق استیل خَش‌دار ۳۰۴ لایه‌نشانی شده با فلز تیتانیوم و گاز اکسیژن به روش PVD

جدول ۱- خلاصه مشخصات تیمارهای مورد ارزیابی		
تیمار	بستر لایه‌نشانی	دوز لایه‌نشانی (mg/cm^2)
Spipe, 35 mg/cm^2	لوله استیل	۳۵
Spipe, 5 mg/cm^2	لوله استیل	۵
Spipe	بدون لایه‌نشانی	-
Ssheet, Ti(PVD)	ورق استیل خَش‌دار	-
Sscreen, 5 mg/cm^2	توری استیل	۵
Sscreen, 10 mg/cm^2	توری استیل	۱۰
Sscreen, 15 mg/cm^2	توری استیل	۱۵

(وزن نانوذرات TiO_2 برابر با ۲ گرم محاسبه شد. در این مرحله بایستی چگالی مخلوط پودر TiO_2 ، آب مقطر و اسید هیدروکلریک به عدد ۷۰ گرم بر لیتر برسد)، (۳) گرم کردن کوره از قبل و رساندن درجه حرارت آن به ۳۸۵ درجه سانتی‌گراد، (۴) اسپری یا براش کردن مقداری از مخلوط آماده شده روی سطح داخلی لوله و قرار دادن آن در کوره به مدت ۱-۵ دقیقه و تکرار فرآیند تا تمام شدن مخلوط آماده شده، (۵) قرار دادن لوله لایه‌نشانی شده مورد نظر در کوره به مدت ۲ ساعت، (۶) خنک کردن لوله در دمای اتاق و شستن سطح داخلی آن با آب مقطر (Jiao, 2020).

- لایه‌نشانی نانوذرات TiO_2 روی توری استیل ۳۰۴ با مقادیر ۵، ۱۰ و ۱۵ میلی‌گرم بر سانتی‌مترمربع: در این روش از توری استیل ۳۰۴ شماره مش ۱۴۰۰ با اندازه روزه‌های ۵ میکرون با ابعاد ۱۵ در ۲۱ سانتی‌مترمربع استفاده و پس از لایه‌نشانی، داخل لوله استیل قرار داده شد. مقدار ۱/۶ گرم نانوذرات TiO_2 برای غلظت ۵ میلی‌گرم بر سانتی‌مترمربع، مقدار ۳/۲ گرم نانوذرات TiO_2 برای غلظت ۱۰ میلی‌گرم بر سانتی‌مترمربع و مقدار ۴/۸ گرم نانوذرات TiO_2 برای غلظت ۱۵ میلی‌گرم بر سانتی‌مترمربع توزین و مخلوط مورد نظر آماده شد (شکل ۲) (Jiao, 2020).

مقادیر غلظت‌های انتخاب شده، مطابق با روش‌های مورد استفاده در مطالعات مختلف است. به عنوان مثال در مطالعه‌ای، مقدار ۳ میلی‌گرم TiO_2 بر یک سانتی‌مترمربع ورق استیل لایه‌نشانی و در راکتور گندزدایی استفاده شد (Jiao et al., 2021). همچنین در مطالعه دیگری، غلظت‌های ۱۱، ۲۲ و ۳۳ میلی‌گرم TiO_2 را بر یک سانتی‌مترمربع توری استیل لایه‌نشانی و ارزیابی کردند (Wongaree et al., 2022). این مطالعات نشان داده‌اند که دوزهای مختلف نانوذرات TiO_2 می‌توانند اثرات متفاوتی بر کارایی گندزدایی داشته باشند. در مطالعه حاضر، دوزهای ۵، ۱۰ و ۱۵ میلی‌گرم بر سانتی‌مترمربع برای ارزیابی تغییرات تدریجی در راندمان و پایداری لایه به‌کار رفته‌اند. دوز ۳۵ میلی‌گرم بر سانتی‌مترمربع به عنوان مقدار حداکثر برای بررسی حداکثر کارایی گندزدایی و مقایسه با دوزهای پایین‌تر انتخاب شده است.

انجام فرآیند گندزدایی

برای بررسی تأثیر روش‌های مختلف لایه‌نشانی بسترهای مختلف شامل داخل لوله استیل، روی ورق استیل خش‌دار و توری استیل ۳۰۴ در کاهش یا حذف باکتری *E. coli*، آب حاوی $2/5 \times 10^9$ CFU/ml باکتری *E. coli* تهیه شد. در تحقیق حاضر از سویه K-12 باکتری *E. coli* استفاده و به منظور تکثیر آن از محیط کشت میکروبی Nutrient Broth (NB) استریل شده در آب مقطر استفاده شد. پس از ۴۸ ساعت هم زدن محیط کشت حاوی باکتری، میزان جذب و جمعیت اولیه باکتری در دستگاه اسپکتوفوتومتر در طول موج ۶۲۰ نانومتر خوانده شد. به منظور رساندن غلظت باکتری به مقدار $2/5 \times 10^9$ CFU/ml و تنظیم جمعیت باکتری، رقیق‌سازی محتوی اولیه باکتری با آب مقطر انجام و مجدداً میزان جذب تا رسیدن به مقدار عددی مورد نظر قرائت شد.

نمونه‌گیری آب آلوده به این باکتری در حضور لامپ UV با توان ۶ وات و همچنین بسترهای استیل لایه‌نشانی شده در زمان‌های مختلف شامل ۲، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۹۰ دقیقه انجام شد. سپس نمونه‌های گرفته شده، کشت باکتریایی شدند تا غلظت آنها بر حسب CFU/ml تعیین گردد. در این فرآیند، پس از رقیق‌سازی سریالی نمونه‌های آب، کشت باکتری به شیوه چمنی و در محیط کشت LB Agar انجام شد. نمونه‌های حاصل به مدت ۲۴ ساعت در انکوباتور قرار گرفت و سپس شمارش باکتری‌ها انجام شد.

تحلیل‌های آماری

راندمان گندزدایی باکتریایی (R) بر اساس معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$R = \left(\frac{N_0 - N}{N_0} \right) \times 100 \quad (1)$$

که در آن N_0 و N به ترتیب تعداد باکتری (CFU/mL) در شروع فرآیند و پس از انجام فرآیند تصفیه است. راندمان گندزدایی بر اساس مقدار لگاریتم (log) کاهش (LRV) نیز بیان می‌شود که بیانگر پتانسیل گندزدایی برای غیرفعال‌سازی باکتری‌ها است. LRV بر مبنای لگاریتم‌گیری از نسبت غلظت باکتری در شروع و پس از فرآیند تصفیه تعیین می‌شود (Zhao et al., 2020):

$$LRV = -\log \left(\frac{N}{N_0} \right) \quad (2)$$

داده‌های گندزدایی بر مدل سینتیک شبه درجه اول برازش داده شدند (Wang et al., 2018):

$$\log \left(\frac{N}{N_0} \right) = -k't \quad (3)$$

که در آن k ثابت سرعت واکنش می‌باشد.

تجزیه و تحلیل‌های آماری اختلاف بین روش‌های مختلف لایه‌نشانی، با استفاده از نرم‌افزار SPSS و با روش‌های کروسکال-والیس (Kruskal-Wallis) و من‌وایتنی (Mann-Whitney U) انجام شد.

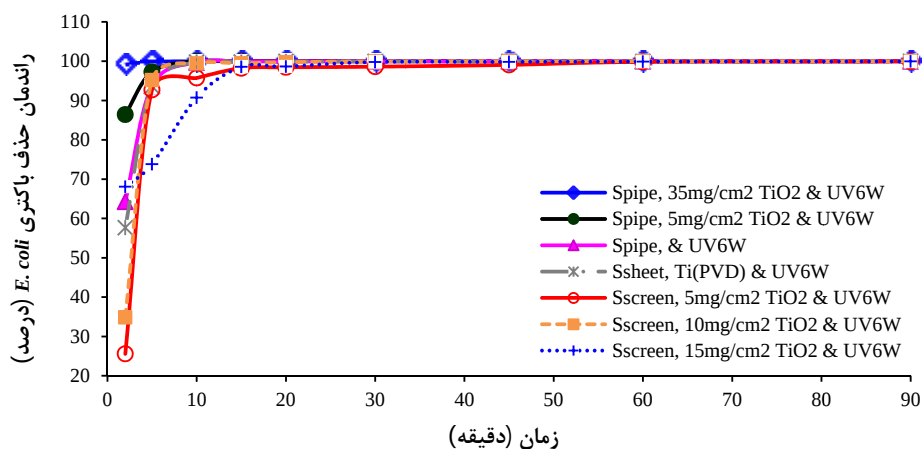
نتایج و بحث

راندمان گندزدایی بسترهای لایه‌نشانی شده

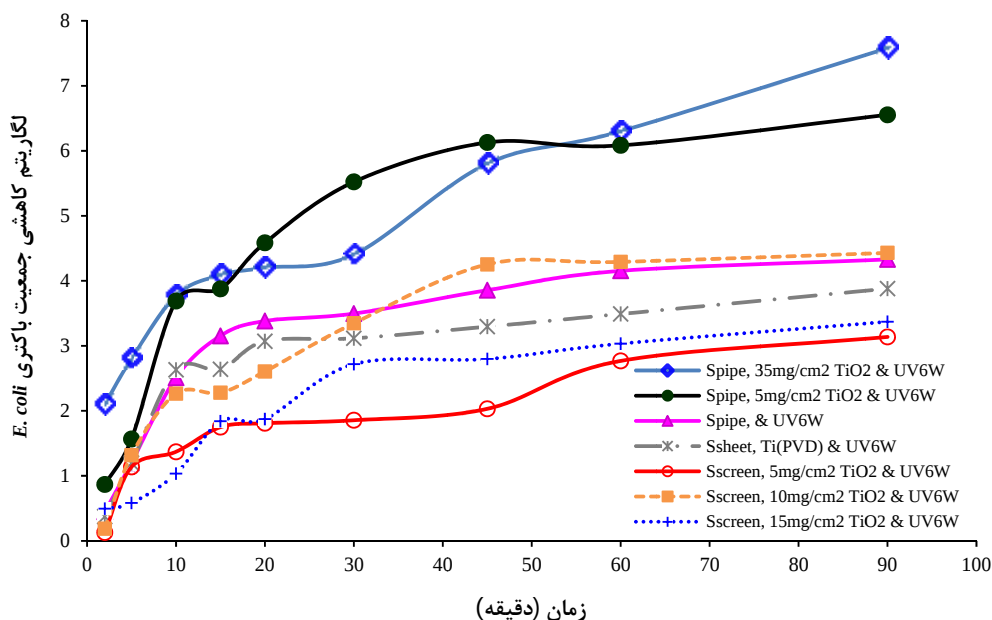
غلظت اولیه باکتری *E. coli* معادل $2/5 \times 10^9$ CFU/ml در محلول بود. در زمان‌های ۲، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۹۰ دقیقه از محلول مورد نظر نمونه‌گیری و برای هر سری آزمایش، راندمان حذف باکتری و لگاریتم کاهشی جمعیت باکتری محاسبه گردید. روند مرگ و میر باکتری در طی زمان‌های مختلف در شکل ۴ آورده شده است. همان‌طور که مشخص است، کارایی فرآیند با گذشت زمان افزایش می‌یابد و از تعداد کلنی‌ها کاسته می‌شود. راندمان حذف باکتری *E. coli* در زمان‌های مختلف بستر لوله استیل لایه‌نشانی شده با غلظت ۳۵ میلی‌گرم بر سانتی‌مترمربع نانوذرات TiO_2 و لامپ UV با توان ۶ وات نشان می‌دهد که راندمان حذف در زمان‌های ۲، ۵، ۱۰، ۱۵ دقیقه به ترتیب برابر با ۹۹/۲۱، ۹۹/۸۴، ۹۹/۹۸ و ۹۹/۹۹ درصد است. با زمان ماند ۱۵ دقیقه، جمعیت باکتری مورد نظر به $2/5 \times 10^3$ CFU/ml و پس از ۴۵ دقیقه به ۱۲۰۰ CFU/ml رسید. پس از آن، همچنین لایه‌نشانی ۵ میلی‌گرم بر سانتی‌مترمربع نانوذرات TiO_2 داخل لوله استیل و کاربرد آن به همراه لامپ UV، بهترین نتیجه کاهش باکتری را نسبت به سایر موارد نشان داد. در این شرایط، جمعیت باکتری در زمان‌های ۲۰، ۳۰ و ۴۵ دقیقه به ترتیب به اعداد $1/96 \times 10^3$ ، $2/26 \times 10^2$ و ۵۶۰۰ کاهش یافت. اگرچه لایه‌نشانی داخل لوله بهترین نتایج در حذف باکتری *E. coli* را داشت، اما بررسی‌های آزمایشگاهی نشان داد که پایداری لایه‌های TiO_2 قرار گرفته درون لوله استیل بسیار کم و ریزش می‌کنند.

لایه‌نشانی شده با ۱۰ میلی‌گرم بر سانتی‌مترمربع نانوذرات TiO_2 و لامپ ۶ وات UV حذف می‌شود. از زمان ۳۰ تا ۹۰ دقیقه، راندمان گندزدایی به صورت خطی بوده و در زمان ۹۰ دقیقه به ۹۹/۹۹ درصد افزایش می‌یابد. برای بررسی صحت نتایج، نمودار راندمان گندزدایی بر اساس مقدار لگاریتم کاهشی نیز آورده شده است (شکل ۵). این شکل بیانگر پتانسیل گندزدایی برای غیرفعال‌سازی باکتری‌های *E. coli* در زمان‌های مختلف است. ملاحظه می‌شود که روند افزایشی کاهش باکتری در تمامی زمان‌های تماس وجود دارد.

لایه‌نشانی TiO_2 روی توری استیل مش ۱۴۰۰ نشان داد که بهترین نتایج مربوط به غلظت ۱۰ میلی‌گرم بر سانتی‌مترمربع است که نتایج نزدیکی با لایه‌نشانی TiO_2 روی استیل خش‌دار به روش PVD نشان داده است. مقایسه نتایج روش PVD نشان داد که فلز تیتانیوم تصعید و رسوب داده شده روی بستر استیل خش‌دار ضعیف‌تر از پودر حاوی نانوذرات TiO_2 ، در کاهش جمعیت باکتریایی است. همانطور که از شکل ۴ مشخص است، تا ۳۰ دقیقه اول ۹۹/۹ درصد باکتری‌ها تحت اثر بستر توری استیل



شکل ۴- مقایسه راندمان گندزدایی بسترهای استیل لایه‌نشانی شده مورد ارزیابی تا زمان ماند ۹۰ دقیقه



شکل ۵- مقایسه لگاریتم کاهشی بسترهای استیل لایه‌نشانی شده مورد ارزیابی

دوز $35\text{mg}/\text{cm}^2$ بر روی سطح داخلی لوله استیل، راندمان مشابهی با لایه‌نشانی TiO_2 در دوز $10\text{mg}/\text{cm}^2$ روی توری استیل مش ۱۴۰۰ دارد. راندمان کاهش یافته در دوز پایین‌تر از ۱۰ میلی‌گرم TiO_2 بر سانتی‌مترمربع بر بستر توری استیل ($\text{Sscreen}, 5\text{mg}/\text{cm}^2$) احتمالاً ناشی از کاهش سطح فعال فوتوکاتالیستی است. همچنین کاهش راندمان $\text{Sscreen}, 15\text{mg}/\text{cm}^2$ ممکن است به دلیل اشباع سطح و کاهش دسترسی تابش UV به مناطق فعال باشد. این پدیده می‌تواند باعث کاهش تولید رادیکال‌های آزاد و افت راندمان گندزدایی شود.

مقدار آماره H برابر با $17/822$ در آزمون کروסקال-والیس نشان داد که تفاوت معنی‌داری بین بسترهای مختلف لایه‌نشانی وجود دارد ($p\text{-value} = 0.007$). این نتیجه نشان می‌دهد که حداقل یکی از گروه‌ها به طور معنی‌داری با سایر گروه‌ها در راندمان تفاوت دارد. در جدول ۲ نتایج آزمون من‌وایتنی به منظور مقایسه جفتی تیمارها ارائه شده است. ملاحظه می‌شود که اختلاف معنی‌داری بین میانگین راندمان حذف $\text{Spip}, 35\text{mg}/\text{cm}^2$ و $\text{Sscreen}, 10\text{mg}/\text{cm}^2$ وجود ندارد اما اختلاف $\text{Spip}, 35\text{mg}/\text{cm}^2$ با $\text{Sscreen}, 5\text{mg}/\text{cm}^2$ و $\text{Sscreen}, 15\text{mg}/\text{cm}^2$ معنی‌دار می‌باشد. این نتیجه بیانگر این است که لایه‌نشانی TiO_2 در

جدول ۲- نتایج آزمون من‌وایتنی برای مقایسه راندمان گندزدایی تیمارهای مختلف

گروه‌های مقایسه‌ای				گروه‌های مقایسه‌ای			
U	آماره	p-value		U	آماره	p-value	
Spip, 35mg/cm ²	42	0/929	Spip, 5mg/cm ²	Spip, 35mg/cm ²	62	0/063	Spip
Spip, 35mg/cm ²	68	0/017	Ssheet, Ti(PVD)	Spip, 35mg/cm ²	78	0/001	Sscreen, 5mg/cm ²
Spip, 35mg/cm ²	60	0/093	Sscreen, 10mg/cm ²	Spip, 35mg/cm ²	75	0/002	Sscreen, 15mg/cm ²
Spip, 5mg/cm ²	61	0/077	Spip	Spip, 5mg/cm ²	64	0/042	Ssheet, Ti(PVD)
Spip, 5mg/cm ²	67	0/021	Sscreen, 5mg/cm ²	Spip, 5mg/cm ²	60	0/093	Sscreen, 10mg/cm ²
Spip, 5mg/cm ²	68	0/017	Sscreen, 15mg/cm ²	Spip, 5mg/cm ²	55	0/216	Sscreen, 15mg/cm ²
Spip, 5mg/cm ²	60	0/093	Sscreen, 10mg/cm ²	Spip, 5mg/cm ²	39	0/929	Sscreen, 10mg/cm ²
Spip, 5mg/cm ²	60	0/093	Sscreen, 5mg/cm ²	Spip, 5mg/cm ²	21	0/093	Sscreen, 10mg/cm ²
Spip, 5mg/cm ²	67	0/021	Sscreen, 5mg/cm ²	Spip, 5mg/cm ²	35	0/659	Sscreen, 15mg/cm ²
Spip, 5mg/cm ²	68	0/017	Sscreen, 15mg/cm ²	Spip, 5mg/cm ²	53	0/289	Sscreen, 15mg/cm ²

مقدار ۳۵ میلی‌گرم بر سانتی‌مترمربع محاسبه گردید که نشان می‌دهد مدل سینتیک شبه درجه اول با داده‌های این شرایط تطابق بسیار خوبی دارد. همچنین مقایسه شرایط ۵، ۱۰ و ۱۵ میلی‌گرم بر سانتی‌مترمربع روی توری استیل نشان می‌دهد که افزایش ضخامت پوشش ممکن است راندمان گندزدایی را تا حدی کاهش دهد، که احتمالاً به دلیل اشباع یا کاهش دسترسی تابش UV به سطح فعال است. بنابراین پیشنهاد می‌شود بررسی شود که آیا ضخامت‌های کمتر یا بیشتر از مقادیر فعلی می‌توانند باعث بهبود بیشتر در کارایی شوند یا خیر. همچنین شدت‌های مختلف تابش UV بر شرایط گندزدایی بررسی شود. مدل شبه درجه اول فرض می‌کند

در جدول ۳ نتایج مدل سینتیک شبه درجه اول برازش داده شده بر داده‌های حاصل از گندزدایی ارائه شده است. ثابت سرعت واکنش نمایانگر سرعت کاهش غلظت در طول زمان است. بیشترین مقدار k به ترتیب برای شرایط لایه‌نشانی داخل لوله به مقدار ۳۵ و ۵ میلی‌گرم بر سانتی‌مترمربع به‌دست آمد. این مقادیر نشان می‌دهد که در این دو حالت، واکنش به طور موثرتری انجام شده و غلظت CFU/ml سریع‌تر کاهش یافته است. به طور کلی، مقدار بالاتر k نشان‌دهنده کارایی بیشتر سیستم گندزدایی است. دو وضعیت بستر لایه‌نشانی توری استیل با مقادیر ۵ و ۱۵ میلی‌گرم بر سانتی‌مترمربع کمترین کارایی را نشان دادند. بالاترین مقدار R^2 برای لایه‌نشانی داخل لوله به

که واکنش به صورت نمایی رخ می‌دهد، اما برای بررسی عمیق‌تر، آزمایش‌های طولانی‌مدت‌تری می‌توان انجام داد. در حال حاضر، تصفیه‌خانه‌های متعددی در سراسر جهان مجهز به لامپ‌های UV هستند که از نور فرابنفش برای گندزدایی آب استفاده می‌کنند. با این حال، مطالعات نشان داده‌اند که استفاده از نور UV به تنهایی می‌تواند منجر به تولید فوتونپ‌های کلنی کوچکتر از حد متوسط در باکتری‌های زنده باقیمانده شود، که این امر می‌تواند به یک خطر جدی برای سلامت تبدیل شود. در پژوهش‌های

گذشته، ارتباط بین کلنی‌های کوچک و عفونت‌های پایدار، عودکننده و مقاوم به آنتی‌بیوتیک نشان داده شده است (Robertson et al., 2005). بنابراین لازم است استفاده از نانوذرات TiO_2 در مقیاس صنعتی به‌عنوان یک روش پایدار و مؤثر برای گندزدایی در تصفیه آب مورد توجه قرار گیرد. اما چالش‌هایی نظیر هزینه‌ها، پایداری نانوذرات و نیاز به تکنولوژی‌های پیشرفته برای جداسازی و بازیابی فوتوکاتالیست‌ها باید همچنان در نظر گرفته شوند.

جدول ۳- نتایج مدل سینتیک شبه درجه اول

نوع لایه‌نشانی	k (1/min)	R ²	معادله سینتیک شبه درجه اول
Spipe, 35mg/cm ² TiO ₂ & UV6W	۰/۱۵۴	۰/۸۱۷	$\ln(C_t) = 0.154t - 15.373$
Spipe, 5mg/cm ² TiO ₂ & UV6W	۰/۱۵۴	۰/۶۹۴	$\ln(C_t) = 0.154t - 18.062$
Spipe, & UV6W	۰/۰۹۸	۰/۶۳۹	$\ln(C_t) = 0.098t - 17.97$
Ssheet, Ti(PVD) & UV6W	۰/۰۸۳	۰/۶۰۶	$\ln(C_t) = 0.083t - 17.504$
Sscreen, 5mg/cm ² TiO ₂ & UV6W	۰/۰۷۰	۰/۷۹۱	$\ln(C_t) = 0.070t - 19.929$
Sscreen, 10mg/cm ² TiO ₂ & UV6W	۰/۱۱۱	۰/۷۵۳	$\ln(C_t) = 0.111t - 17.94$
Sscreen, 15mg/cm ² TiO ₂ & UV6W	۰/۰۸۴	۰/۷۹۶	$\ln(C_t) = 0.084t - 14.37$

نتیجه‌گیری

نتایج این تحقیق نشان داد که استفاده از نانوذرات TiO_2 لایه‌نشانی شده بر بسترهای مختلف استیل می‌تواند به‌عنوان یک روش مؤثر در حذف باکتری *E. coli* از آب آلوده تحت تابش UV عمل کند. به‌ویژه، لایه‌نشانی TiO_2 روی توری استیل با دوز ۱۰ میلی‌گرم بر سانتی‌مترمربع توانسته است راندمان گندزدایی قابل توجهی را در مدت زمان کوتاه به دست آورد. همچنین، نتایج نشان داد که شرایط لایه‌نشانی روی لوله‌های استیل با دوزهای بالاتر TiO_2 ، هرچند عملکرد بهتری در کاهش جمعیت باکتری‌ها داشت، اما پایداری کمتری در طول زمان نشان دادند. در این تحقیق، مدل سینتیک شبه درجه اول بهترین انطباق را با داده‌های تجربی نشان داد. از سوی دیگر، تحلیل‌های آماری تأثیر معنی‌دار دوز نانوذرات و شرایط لایه‌نشانی در راندمان گندزدایی را نشان داد. بر اساس نتایج تحقیق حاضر، برای استفاده از این فناوری در مقیاس صنعتی، چالش‌هایی مانند پایداری طولانی‌مدت لایه‌ها، هزینه‌های بالا و نیاز به تکنولوژی‌های پیشرفته برای بازیابی و جداسازی فوتوکاتالیست‌ها باید در نظر گرفته شود. با این حال، به‌کارگیری سیستم‌های

فوتوکاتالیستی می‌تواند یک راهکار پایدار و مؤثر برای تصفیه آب در مناطق کم‌آب و در معرض آلودگی‌های میکروبی باشد. پیشنهاد می‌شود که در تحقیقات آینده، مطالعات بیشتری روی بهبود پایداری لایه‌های TiO_2 ، کاهش هزینه‌های اجرایی و بررسی اثرات طولانی‌مدت این روش‌ها در مقیاس‌های بزرگتر انجام گیرد. همچنین، بررسی استفاده از منابع نور طبیعی یا کم‌مصرف به جای UV می‌تواند به کاهش هزینه‌ها و بهینه‌سازی این فرآیند کمک کند.

تقدیر و تشکر

این مقاله برگرفته از طرح پژوهشی شماره ۰۲/۴۴۳۰/ص مورخ ۱۴۰۲/۰۴/۰۴ است که با حمایت شرکت آب و فاضلاب استان کرمان به انجام رسیده است. از حمایت‌های این شرکت صمیمانه سپاسگزارم.

تضاد منافع نویسندگان

در این مقاله هیچ‌گونه تضاد منافی وجود ندارد و این مسئله مورد تأیید همه نویسندگان است.

black dye in a rotating corrugated drum photocatalytic reactor. *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, 8(1).

7. Hosseini, F., Assadi, A.A., Nguyen-Tri, P., Ali, I. and Rtimi, S., 2022. Titanium-based photocatalytic coatings for bacterial disinfection: The shift from suspended powders to catalytic interfaces. *Surfaces and Interfaces*, 32, p. 102078.
8. Hrudey, S.E. and Charrois, J.W., eds. 2012. Disinfection by-products and human health. IWA Publishing, London.
9. Isopencu, G., Eftimie, M., Melinescu, A., Dancila, A.M. and Mares, M., 2022. Recycling of glass waste by deposition of TiO₂ for the intensification of the photocatalytic effect in the purification of wastewater. *Coatings*, 12(11), p. 1794.
10. Jiao, Y., 2020. UV/Photocatalyst based photoreactor design for water treatment. Doctoral Dissertation. Laurentian University of Sudbury.
11. Jiao, Y., Shang, H., and Scott, J. A., 2021. A UVC based advanced photooxidation reactor design for remote households and communities not connected to a municipal drinking water system. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(3), p. 105162.
12. Kışla, D., Gökmen, G.G., Evrendilek, G.A., Akan, T., Vlčko, T., Kulawik, P. and Ozogul, F., 2023. Recent developments in antimicrobial surface coatings: Various deposition techniques with nanosized particles, their application and environmental concerns. *Trends in Food Science & Technology*, 135, pp. 144-172.
13. Marugán, J., van Grieken, R., Pablos, C., Satuf, M.L., Cassano, A.E. and Alfano, O.M., 2015. Kinetic modelling of *Escherichia coli* inactivation in a photocatalytic wall reactor. *Catalysis Today*, 240, pp. 9-15.
14. Mecha, A.C., Onyango, M.S., Ochieng, A. and Momba, M.N.B., 2019. UV and solar photocatalytic disinfection of municipal wastewater: inactivation, reactivation and regrowth of bacterial pathogens. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 16(7), pp. 3687-3696.
15. Ochiai, T., Masuko, K., Tago, S., Nakano, R., Nakata, K., Hara, M. and Fujishima, A., 2013. Synergistic water-treatment reactors using a TiO₂-modified Ti-mesh filter. *Water*, 5(3), pp. 1101-1115.
16. Pablos, C., Marugan, J., van Grieken, R. and Serrano, E., 2013. Emerging micropollutant oxidation during disinfection processes using UV-C, UV-C/H₂O₂, UV-A/TiO₂ and

دسترسی به داده‌ها

داده‌های این پژوهش از نتایج آزمایش‌های انجام گرفته در چارچوب طرح استخراج شده است. همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است.

مشارکت نویسندگان

تمامی مراحل پژوهش توسط نویسنده اول انجام شده است.

اصول اخلاقی

نویسنده اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این اثر عملی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تایید همه آنها می‌باشد.

منابع

1. Amanighadim, A., Dorraji, M. and Lotfihayayee, K., 2017. Investigation on TiO₂ nanophotocatalysts performance in simultaneous removal of humic acid and biological contaminants (*E. coli*) from contaminated water under UV light irradiation. *Applied Chemistry Today*, 12(44), pp. 55-68. [In Persian]
2. Chen, Y., Huang, W., He, D., Situ, Y. and Huang, H., 2014. Construction of heterostructured g-C₃N₄/Ag/TiO₂ microspheres with enhanced photocatalysis performance under visible-light irradiation. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 6(16), pp. 14405-14414.
3. De Vietro, N., Tursi, A., Beneduci, A., Chidichimo, F., Milella, A., Fracassi, F. and Chidichimo, G., 2019. Photocatalytic inactivation of *Escherichia coli* bacteria in water using low pressure plasma deposited TiO₂ cellulose fabric. *Photochemical & Photobiological Sciences*, 18, pp. 2248-2258.
4. Garoma, T., Umamaheshwar, S.K. and Mumper, A., 2010. Removal of sulfadiazine, sulfamethizole, sulfamethoxazole, and sulfathiazole from aqueous solution by ozonation. *Chemosphere*, 79(8), pp. 814-820.
5. He, J., Cheng, J. and Lo, I.M., 2021. Green photocatalytic disinfection of real sewage: efficiency evaluation and toxicity assessment of eco-friendly TiO₂-based magnetic photocatalyst under solar light. *Water Research*, 190, p. 116705.
6. Ho, N., Gamage, J.D. and Zhang, Z.J., 2010. Photocatalytic degradation of eriochrome

27. Zhang, C., Li, Y., Shuai, D., Shen, Y. and Wang, D., 2019. Progress and challenges in photocatalytic disinfection of waterborne viruses: a review to fill current knowledge gaps. *Chemical Engineering Journal*, 355, pp. 399-415.
28. Zhao, Y. Huang, G., An, C., Huang, J., Xin, X., Chen, X. and Song, P., 2020. Removal of *Escherichia coli* from water using functionalized porous ceramic disk filter coated with Fe/TiO₂ nano-composites. *Journal of Water Process Engineering*, 33, p. 101013.
- UV-A/TiO₂/H₂O₂. *Water Research*, 47(3), pp. 1237-1245.
17. Pajandi, S., 2012. Evaluation of removal efficiency of trihalomethanes (THMs) from water using titanium dioxide (TiO₂) based on nano photocatalysis. Master's thesis, Water and Wastewater Engineering. [In Persian]
18. Rincón, A.G. and Pulgarin, C., 2007. Absence of *E. coli* regrowth after Fe³⁺ and TiO₂ solar photoassisted disinfection of water in CPC solar photoreactor. *Catalysis Today*, 124(3-4), pp. 204-214.
19. Robertson, J.M., Robertson, P.K. and Lawton, L.A., 2005. A comparison of the effectiveness of TiO₂ photocatalysis and UVA photolysis for the destruction of three pathogenic micro-organisms. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 175(1), pp. 51-56.
20. Saravanan, A., Kumar, P.S., Jeevanantham, S., Karishma, S. and Kiruthika, A.R., 2021. Photocatalytic disinfection of micro-organisms: Mechanisms and applications. *Environmental Technology & Innovation*, 24, p. 101909.
21. Tabatabaei, S.H. and Najafi, P., 2009. Effects of irrigation with treated municipal wastewater on soil properties in arid and semi-arid regions. *Irrigation and Drainage*, 58(5), pp. 551-560.
22. Van Grieken, R., Marugán, J., Sordo, C. and Pablos, C., 2009. Comparison of the photocatalytic disinfection of *E. coli* suspensions in slurry, wall and fixed-bed reactors. *Catalysis Today*, 144(1-2), pp. 48-54.
23. Von Gunten, U., 2018. Oxidation processes in water treatment: are we on track?. *Environmental Science & Technology*, 52(9), pp.5062-5075.
24. Wang, L., Wu, W., Xie, X., Chen, H., Lin, J. and Dionysiou, D.D., 2018. Removing *Escherichia coli* from water using zinc oxide-coated zeolite. *Water Research*, 141, pp. 145-151.
25. Wongaree, M., Bootwong, A., Choo-In, S., and Sato, S., 2022. Photocatalytic reactor design and its application in real wastewater treatment using TiO₂ coated on the stainless-steel mesh. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(30), pp. 46293-46305.
26. Zazouli, M.A., Ahanjan, M., Kor, Y., Eslamifar, M., Hosseini, M. and Yousefi, M., 2015. Water disinfection using photocatalytic process with titanium dioxide nanoparticles. *Journal of Mazandaran University of Medical Sciences*, 24(122), pp. 227-238. [In Persian]