

(OPEN ACCESS)

Efficiency of Titanium Dioxide (TiO₂) and Zinc Oxide (ZnO) Photocatalysts in Ammonia Removal from Synthetic Wastewater: A Comparison of Natural and Artificial Light Effects

Majid Jafari Hemmat¹, Kiadokht Rezaei², Arash Javanshir Khoei^{*3}

1. Dept. of Fisheries, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: m.jafarihemmat@ut.ac.ir
2. Dept. of Fisheries, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: kia.rezaie@ut.ac.ir
3. Corresponding Author, Dept. of Fisheries, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.
E-mail: arashjavanshir@ut.ac.ir

Article Info	ABSTRACT
Article type: Full Length Research Paper	Background and Objectives: In recent years, the increasing influx of nitrogenous compounds, including nitrate, nitrite, and ammonia, into water resources has created significant environmental challenges. These pollutants not only pose a serious threat to human health but also lead to the disruption of aquatic ecosystems through eutrophication. This study aims to evaluate the efficiency of titanium dioxide (TiO ₂) and zinc oxide (ZnO) photocatalysts in removing ammonia from synthetic wastewater.
Article history: Received: 05.22.2025 Revised: 06.12.2025 Accepted: 06.15.2025	
Keywords: Ammonia, Nitrogenous Pollutants, Photocatalyst, Titanium dioxide (TiO ₂), Wastewater Treatment, Zinc oxide (ZnO)	Materials and Methods: Synthetic wastewater containing 50 mg/L of ammonia was used to simulate industrial and agricultural wastewater. The treatment system consisted of a photocatalytic reactor and a BioDroF system. In the photocatalytic reactor, two types of nanoparticles, titanium dioxide and zinc oxide, were used at concentrations of 0.5 and 1 g/L under both natural and artificial light. The bio-filtration system removed the nanoparticles from the water, after which samples were collected from the system's output. The remaining ammonia concentration in each sample was measured using a JBL assay kit and a spectrophotometer. The efficiency of the system in removing nitrogenous pollutants was evaluated using different nanoparticles.
	Results: Both photocatalysts showed higher efficiency under artificial light, with TiO ₂ achieving 97.67% ammonia removal (0.5 g/L, LED) and ZnO reaching 90.34% under similar conditions. Reducing photocatalyst concentration improved treatment efficiency, emphasizing the need for optimized concentration and light conditions.
	Conclusion: The study demonstrates the high potential of TiO ₂ and ZnO photocatalysts for ammonia removal, particularly under artificial light. These findings support the application of photocatalytic technology in industrial and agricultural wastewater treatment, offering a

pathway toward sustainable and efficient water purification systems. Further research should focus on scaling up the process for real-world applications.

Cite this article: Jafari Hemmat, Majid, Rezaei, Kiadokht, Javanshir Khoei, Arash. 2026. Efficiency of Titanium Dioxide (TiO₂) and Zinc Oxide (ZnO) Photocatalysts in Ammonia Removal from Synthetic Wastewater: A Comparison of Natural and Artificial Light Effects. *Journal of Utilization and Cultivation of Aquatics*, 15 (2), 109-124.



© The Author(s).

Doi: 10.22069/japu.2025.23686.1954

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

کارایی فتوکاتالیست‌های دی‌اکسید تیتانیوم (TiO_2) و اکسید روی (ZnO) در حذف آمونیاک از فاضلاب سنتتیک: مقایسه تأثیر نور طبیعی و مصنوعی

مجید جعفری همت^۱، کیادخت رضایی^۲، آرش جوانشیر خویی^{۳*}

۱. گروه شیلات، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: m.jafarihemmat@ut.ac.ir

۲. گروه شیلات، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: kia.rezaie@ut.ac.ir

۳. نویسنده مسئول، گروه شیلات، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: arashjavanshir@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی- پژوهشی	سابقه و هدف: در سال‌های اخیر، افزایش ورود ترکیبات نیتروژنی نظیر نیتрат، نیتريت و آمونیاک به منابع آب، چالش‌های زیست‌محیطی قابل‌توجهی ایجاد کرده است. این آلاینده‌ها نه تنها تهدیدی جدی برای سلامت انسان محسوب می‌شوند، بلکه با ایجاد پدیده یوتریفیکاسیون، منجر به اختلال در اکوسیستم‌های آبی می‌گردند. این مطالعه با هدف بررسی کارایی فتوکاتالیست‌های دی‌اکسید تیتانیوم (TiO_2) و اکسید روی (ZnO) در حذف آمونیاک از فاضلاب مصنوعی انجام شده است.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۰۱ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۳/۲۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۲۵	
واژه‌های کلیدی: اکسید روی (ZnO)، آلاینده‌های نیتروژنی، آمونیاک، تصفیه فاضلاب، دی‌اکسید تیتانیوم (TiO_2)، فتوکاتالیست	مواد و روش‌ها: از فاضلاب سنتتیک حاوی آمونیاک با غلظت ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر برای شبیه‌سازی پساب‌های صنعتی و کشاورزی استفاده شد. سیستم تصفیه شامل یک تانک فتوکاتالیستی و یک سیستم بیودراف بود. در تانک فتوکاتالیستی، از دو نوع نانوذره دی‌اکسید تیتانیوم و اکسید روی با غلظت‌های ۰/۵ و ۱ گرم بر لیتر تحت تأثیر نور طبیعی و مصنوعی استفاده شد. سیستم بیودراف نیز باعث حذف ذرات نانو از بدنه آبی شده و در نهایت نمونه‌برداری از خروجی این سیستم انجام شد. غلظت آمونیاک باقی‌مانده در هر نمونه با استفاده از کیت سنجش JBL و دستگاه اسپکتروفوتومتر اندازه‌گیری شد و کارایی سیستم با کمک انواع نانوذرات در حذف آلاینده‌های نیتروژنی ارزیابی شد.
	یافته‌ها: نتایج نشان داد که هر دو فتوکاتالیست تحت تابش نور مصنوعی عملکرد بهتری داشتند، به‌طوری‌که در حضور TiO_2 با غلظت ۰/۵ گرم بر لیتر و نور LED، راندمان حذف آمونیاک به ۹۷/۶۷ درصد رسید. ZnO نیز در شرایط مشابه راندمان ۹۰/۳۴ درصد را نشان داد.

نتیجه‌گیری: کاهش غلظت فتوکاتالیست‌ها منجر به افزایش کارایی تصفیه شد، که نشان‌دهنده اهمیت بهینه‌سازی غلظت و شرایط نوری در فرآیندهای فتوکاتالیستی است. این یافته‌ها پتانسیل بالای استفاده از فناوری فتوکاتالیستی در تصفیه فاضلاب‌های صنعتی و کشاورزی را نشان می‌دهند و می‌توانند به توسعه سیستم‌های تصفیه کارآمد و پایدار کمک کنند.

استناد: جعفری همت، مجید، رضایی، کیادخت، جوانشیر خویی، آرش (۱۴۰۵). کارایی فتوکاتالیست‌های دی‌اکسید تیتانیوم (TiO_2) و اکسید روی (ZnO) در حذف آمونیاک از فاضلاب سنتتیک: مقایسه تأثیر نور طبیعی و مصنوعی. نشریه بهره‌برداری و پرورش آبزیان، ۱۵ (۲)، ۱۲۴-۱۰۹.

Doi: 10.22069/japu.2025.23686.1954



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

در دهه‌های اخیر، افزایش بی‌رویه فعالیت‌های صنعتی، کشاورزی و شهری منجر به ورود مقادیر زیادی از آلاینده‌های شیمیایی به محیط‌زیست، به‌ویژه منابع آبی، شده است (۱). ترکیبات نیتروژنی، نظیر نیتрат‌ها و نیتريت‌ها، از جمله آلاینده‌های اصلی موجود در پساب‌های صنعتی، کشاورزی و فاضلاب‌های خانگی هستند (۲). این ترکیبات نه تنها کیفیت آب را کاهش می‌دهند، بلکه اثرات مخربی بر سلامت انسان و اکوسیستم‌های آبی دارند. مصرف آب‌های آلوده به نیترات می‌تواند منجر به بیماری‌هایی نظیر مت‌هموگلوبینمی^۱ (بیماری نوزادان) و افزایش خطر ابتلا به سرطان‌های دستگاه گوارش شود. از طرفی، ورود این ترکیبات به اکوسیستم‌های آبی باعث یوتریفیکاسیون یا پدیده مغذی شدن بیش‌ازحد آب، رشد جلبک‌های مضر و در نهایت کاهش اکسیژن محلول و مرگ و میر آبزیان می‌شود (۳).

با توجه به پیامدهای زیست‌محیطی و بهداشتی آلاینده‌های نیتروژنی، توسعه روش‌های کارآمد و پایدار برای تصفیه پساب‌های حاوی این ترکیبات، به یک ضرورت جهانی تبدیل شده است. روش‌های سنتی تصفیه مانند روش‌های فیزیکی (فیلتراسیون^۲، ته‌نشینی)، شیمیایی (انعقاد^۳، اکسیداسیون شیمیایی^۴) و زیستی (لجن فعال^۵، فرآیندهای هوازی و بی‌هوازی) تا حدودی در حذف آلاینده‌های نیتروژنی مؤثر هستند (۲)، اما هرکدام از این روش‌ها محدودیت‌هایی دارند. به عنوان مثال، فرآیندهای زیستی نیاز به زمان طولانی و شرایط محیطی خاص دارند و ممکن است در برابر شوک‌های بار آلودگی حساس باشند. روش‌های شیمیایی نیز اغلب پرهزینه بوده و منجر به تولید محصولات جانبی ناخواسته می‌شوند (۴).

در این میان، فرآیند فتوکاتالیستی^۶ به‌عنوان یک روش پیشرفته و کارآمد برای تصفیه پساب‌های آلوده به ترکیبات نیتروژنی مطرح شده است (۵). فتوکاتالیست‌ها موادی نیمه‌رسانا هستند که در حضور نور، به‌ویژه نور فرابنفش، واکنش‌های اکسیداسیون-احیا را تسریع می‌کنند و موجب تخریب ترکیبات آلی و غیرآلی می‌شوند (۶). از جمله فتوکاتالیست‌های پرکاربرد می‌توان به دی‌اکسید تیتانیوم (TiO_2) و اکسید روی (ZnO) اشاره کرد که به دلیل خواص منحصربه‌فردشان مانند پایداری شیمیایی، فعالیت نوری بالا، غیرسمی بودن و در دسترس بودن، توجه زیادی را در پژوهش‌های علمی به خود جلب کرده‌اند (۵).

TiO_2 به‌عنوان یک فتوکاتالیست مرجع در بسیاری از مطالعات تصفیه آب مورد استفاده قرار گرفته است. این ماده به دلیل داشتن باندگپ^۷ مناسب ($\sim 3.2 \text{ eV}$) قادر است تحت تابش نور فرابنفش، الکترون‌های خود را تحریک کرده و واکنش‌های فتوکاتالیستی را فعال کند (۷). از طرف دیگر، ZnO نیز به دلیل خواص نوری مشابه و حتی عملکرد بهتر در برخی شرایط، به‌عنوان جایگزین یا مکمل TiO_2 مورد توجه قرار گرفته است. ZnO علاوه بر پایداری شیمیایی بالا، توانایی جذب نور فرابنفش بیش‌تری دارد و در برخی موارد به دلیل هزینه کم‌تر و ساختار بلوری خاص، عملکرد بهتری نسبت به TiO_2 نشان داده است (۸). گزارش شده است که دی‌اکسید تیتانیوم در تصفیه فاضلاب، کارایی بالاتری تحت نور فرابنفش دارد (۹).

واکنش‌های فتوکاتالیستی بر سطح این نیمه‌رساناها به تولید رادیکال‌های آزاد (مانند هیدروکسیل رادیکال‌ها) منجر می‌شود که این رادیکال‌ها قدرت بالایی در اکسیداسیون ترکیبات آلی و معدنی دارند (۱۰). این

- 1- Methemoglobinemia
- 2- Filtration
- 3- Ligation
- 4- Chemical oxidation
- 5- Activated Sludge

- 6- Photocatalysis
- 7- Bandgap

فرآیند به تخریب ترکیبات نیتروژنی موجود در پساب، تبدیل آن‌ها به نیتروژن گازی بی‌ضرر یا محصولات بی‌خطرتر کمک می‌کند. علاوه بر این، فتوکاتالیست‌ها می‌توانند به‌صورت مداوم در فرآیند تصفیه استفاده شوند، زیرا در پایان واکنش، ساختار شیمیایی آن‌ها تغییر نمی‌کند و به حالت اولیه بازمی‌گردند (۵).

در ایران، بحران آب و کاهش منابع تجدیدپذیر، همراه با آلودگی روزافزون منابع آبی، نیاز به توسعه فناوری‌های نوین تصفیه آب را بیش از پیش آشکار ساخته است (۱۱). به‌ویژه در صنعت آبی‌پروری که وابسته به آب‌های باکیفیت است، پساب‌های تولیدی حاوی مقادیر زیادی ترکیبات نیتروژنی و فسفات‌ها هستند که در صورت عدم تصفیه مناسب، می‌توانند به آلودگی منابع طبیعی آب منجر شوند. استفاده از روش‌های فتوکاتالیستی در تصفیه این پساب‌ها می‌تواند علاوه بر کاهش آلودگی، به بازچرخانی آب و استفاده مجدد در مصارف صنعتی و کشاورزی کمک کند (۱۲).

مطالعات متعددی به بررسی کارایی فتوکاتالیست‌های مختلف در حذف آلاینده‌های نیتروژنی پرداخته‌اند. توگائو و همکاران (۲۰۱۸) نشان دادند که استفاده از TiO_2 در حضور نور فرابنفش می‌تواند به‌طور مؤثری نیترات‌ها را به نیتروژن گازی تبدیل کند (۱۳). در مطالعه‌ای دیگر، ماندور و همکاران (۲۰۲۲) به مقایسه عملکرد TiO_2 و ZnO پرداختند و نشان دادند که ZnO در برخی شرایط نوری و pH خاص، کارایی بالاتری در تخریب ترکیبات نیتروژنی دارد. با این حال، چالش‌هایی مانند محدودیت در بازدهی تحت تابش نور مرئی و تجمع فتوکاتالیست‌ها در سیستم‌های آبی هم‌چنان مطرح است که نیاز به تحقیقات بیش‌تر برای بهینه‌سازی این فرآیندها را ضروری می‌سازد (۱۴). در مطالعات اخیر، که فتوکاتالیست‌ها با عناصر مختلفی فعال شده‌اند، قابلیت استفاده از نور مرئی افزایش یافته

است. برای نمونه، اوباتا و همکاران (۲۰۱۴) نشان دادند که اضافه کردن عنصر آهن به دی‌اکسید تیتانیوم موجب افزایش کارایی آن در تجزیه آمونیاک می‌شود. هم‌چنین، مطالعه سان و همکاران (۲۰۱۵) نشان داد که ترکیب نیتروژن-پالادیوم می‌تواند در حذف آمونیاک نقش مؤثری ایفا کند (۱۵، ۱۶). هم‌چنین مواردی مانند غلظت (۱۷) و نوع (۱۸) فتوکاتالیست در میزان کارایی موفق آن‌ها به عنوان کاهنده آلاینده مؤثر بوده است.

با توجه به اهمیت موضوع، در این مطالعه، به بررسی اثر فتوکاتالیست‌های TiO_2 و ZnO بر کاهش آمونیاک در فاضلاب سنتتیک پرداخته شده است. هدف از این پژوهش، ارزیابی کارایی این نیمه‌رساناها در تخریب ترکیبات نیتروژنی و بهبود کیفیت پساب به سطح استانداردهای زیست‌محیطی و صنعتی است. نتایج این تحقیق می‌تواند راهکارهای نوینی برای مدیریت پایدار منابع آبی و کاهش اثرات زیست‌محیطی آلاینده‌ها ارائه دهد.

مواد و روش‌ها

محل انجام آزمایش‌ها: تمامی مراحل این پژوهش در آزمایشگاه لیمونولوژی و هیدروبیولوژی گروه مهندسی شیلات، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، طی فصول بهار و تابستان در دمای آزمایشگاه $25 \pm 7/48$ انجام شد.

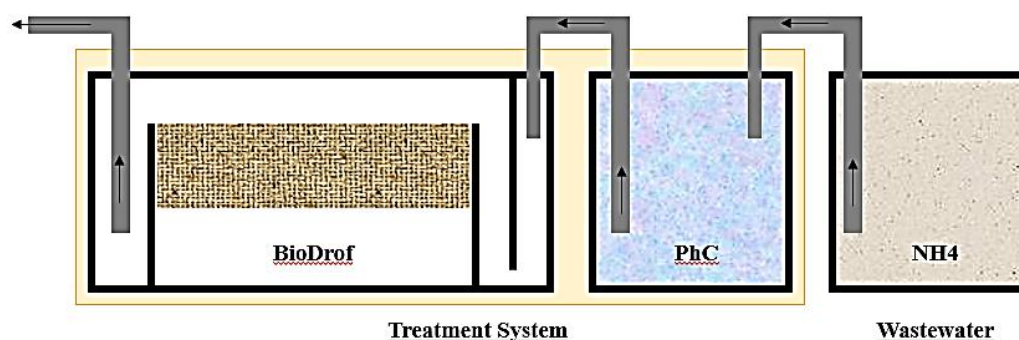
آماده‌سازی فاضلاب سنتتیک: فاضلاب سنتتیک مورد استفاده در این تحقیق به‌صورت مصنوعی تهیه شد و شامل آمونیاک با غلظت 50 mg/l بود. این غلظت به‌منظور شبیه‌سازی پساب‌های صنعتی و کشاورزی آلوده به ترکیبات نیتروژنی انتخاب شد.

طراحی و ساخت سیستم تصفیه: سیستم تصفیه شامل دو واحد است. واحد اول (تانک فتوکاتالیستی) شامل یک آکواریوم شیشه‌ای به ابعاد $30 \times 40 \times 50$ سانتی‌متر

طراحی شد که حداکثر کارایی تصفیه و کاهش کدورت در حداقل فضا حاصل شود و شامل چهار بخش مجزا بود: (۱) جداسازی مواد کم‌چگال: ذرات سبک و کف‌های سطحی از فاضلاب جدا شدند؛ (۲) رسوب‌گذاری مواد درشت: ذرات درشت و پرچگال ته‌نشین شدند؛ (۳) جداسازی ذرات ریز معلق: با استفاده از سازه‌ای پلاستیکی به ابعاد $23 \times 32 \times 20$ سانتی‌متر، جریان‌های میکروتوربولانس ایجاد شده و ذرات ریز به دیواره‌ها برخورد کرده و ته‌نشین شدند. حجم کلی بیودراف برای ورود فاضلاب 70 لیتر در نظر گرفته شد و گردش آب با پمپ 1400 لیتر در ساعت تنظیم گردید. برای جلوگیری از رشد جلبک‌ها در بخش‌های مختلف، بدنه سیستم با پوشش مخصوص استتار شد (شکل ۱).

با ظرفیت 60 لیتر بود. در این تانک، ذرات فتوکاتالیست شامل دی‌اکسید تیتانیوم (TiO_2) خریداری شده از شرکت نماشیمی و اکسید روی (ZnO) خریداری شده از شرکت شیمی استور، به فاضلاب سنتتیک اضافه شدند. واکنش‌های فتوکاتالیستی در این واحد تحت تأثیر شرایط نوری متفاوت بررسی شدند؛ به‌طوری که سیستم، به‌طور متناوب در معرض نور طبیعی (تابش مستقیم نور خورشید) و نور مصنوعی (استفاده از لامپ UV-A LED با طول موج $365-400$ نانومتر) قرار گرفت. این طراحی به بررسی تأثیر نوع منبع نوری بر عملکرد فتوکاتالیست‌ها در حذف آلاینده‌های موجود در فاضلاب کمک کرد.

واحد دوم از جنس شیشه و با ابعاد $25 \times 98 \times 50$ سانتی‌متر طراحی و ساخته شد. این سیستم به‌گونه‌ای



شکل ۱- تصویر شماتیک از سیستم تصفیه.

Figure 1. Schematic diagram of the purification system.

60 دقیقه در تانک فتوکاتالیستی در مجاورت فتوکاتالیست‌های دی‌اکسید تیتانیوم و اکسید روی قرار گرفت تا واکنش‌های فتوکاتالیستی انجام شود. پس از این مرحله، فاضلاب به سیستم بیودراف منتقل شد، جایی که فرایندهای جداسازی ذرات و تصفیه نهایی صورت گرفت. آزمایش‌ها به مدت 8 روز متوالی انجام شدند و برای ارزیابی عملکرد سیستم تصفیه،

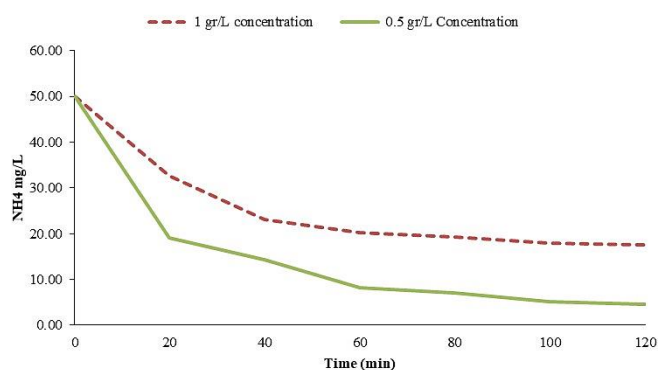
طراحی آزمایش و نمونه‌برداری: در این مطالعه، تأثیر دو نوع فتوکاتالیست شامل اکسید روی (ZnO) و دی‌اکسید تیتانیوم (TiO_2) با دو غلظت $0/5$ و 1 گرم بر لیتر بررسی شد (۱۹، ۲۰ و ۲۱). همچنین، تأثیر شرایط نوری (نور طبیعی و نور مصنوعی) بر میزان حذف آمونیاک در فاضلاب سنتتیک ارزیابی شد. برای انجام آزمایش، فاضلاب سنتتیک ابتدا به‌مدت

نتایج و بحث

عملکرد TiO_2 در کاهش آمونیاک: در شرایط نور طبیعی، فاضلاب سنتتیک حاوی ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر آمونیاک در مجاورت دی‌اکسید تیتانیوم با دو غلظت ۱ و ۰/۵ گرم بر لیتر قرار گرفت. نتایج نشان داد که در غلظت ۱ گرم بر لیتر، میزان کاهش آمونیاک به ۶۵ درصد رسید، به طوری که غلظت آمونیاک پس از ۱۲۰ دقیقه از مقدار اولیه به $17/50 \pm 0/41$ میلی‌گرم بر لیتر کاهش یافت. در حالی که در غلظت ۰/۵ گرم بر لیتر، راندمان حذف آمونیاک به $90/67$ درصد افزایش پیدا کرد و غلظت نهایی به $4/67 \pm 0/47$ میلی‌گرم رسید (شکل ۲). این نتایج نشان می‌دهد که کاهش غلظت TiO_2 به ۰/۵ گرم بر لیتر در نور طبیعی کارایی بیشتری در حذف آمونیاک داشته است. همچنین، مطالعه مقایسه‌ای اثر دی‌اکسید تیتانیوم در مجاورت نور طبیعی بر روی محلول آمونیاک نشان داد که در ابتدای آزمایش (از زمان صفر تا ۶۰ دقیقه) شیب کاهش نسبت به نیمه دوم آزمایش (از زمان ۸۰ تا ۱۲۰ دقیقه) بیش‌تر بود. این مورد در هر دو غلظت ۰/۵ و ۱ گرم بر لیتر دیده شد و در هر دو مورد نیز اختلاف‌ها معنی‌دار بودند (شکل ۳).

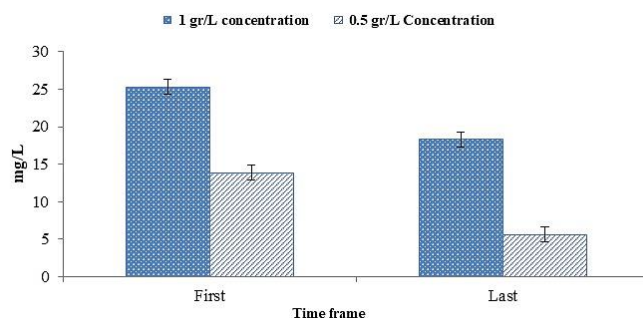
نمونه‌برداری در دو مرحله انجام شد: (۱) از خروجی تانک فتوکاتالیستی پس از تکمیل واکنش‌های اولیه و (۲) از خروجی نهایی سیستم بیودراف پس از پایان فرآیندهای جداسازی و تصفیه. نمونه‌ها در ۶ بازه زمانی طی ۱۲۰ دقیقه هر ۲۰ دقیقه و با ۳ تکرار به حجم ۱۰۰ میلی‌لیتر جمع‌آوری شدند. این نمونه‌ها جهت سنجش میزان کاهش آلاینده‌ها مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. در نهایت برای سنجش کارایی سیستم تصفیه، غلظت آمونیاک با استفاده از کیت سنجش آمونیاک شرکت JBL و دستگاه اسپکتروفوتومتر UV-Vis آزمایشگاه فرآوری آبزیان اندازه‌گیری شد.

آنالیز آماری داده‌ها: در ابتدا نرمال بودن توزیع داده‌ها با استفاده از آزمون کولموگراف-اسمیرنوف مورد بررسی قرار گرفت. سپس به منظور مقایسه میانگین پارامترهای مختلف آزمایشی در بازه‌های زمانی مختلف، از آزمون ANOVA استفاده شد. محاسبات آماری با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۲ انجام شد و نمودارها با استفاده از نرم‌افزار اکسل نسخه ۲۰۱۶ ترسیم شد.



شکل ۲- تغییرات غلظت آمونیاک در حضور فتوکاتالیست TiO_2 با دو غلظت ۰/۵ و ۱ گرم بر لیتر در مجاورت نور طبیعی.

Figure 2. Changes in ammonia concentration in the presence of TiO_2 photocatalyst at two concentrations (0.5 and 1 g/L) under natural light.

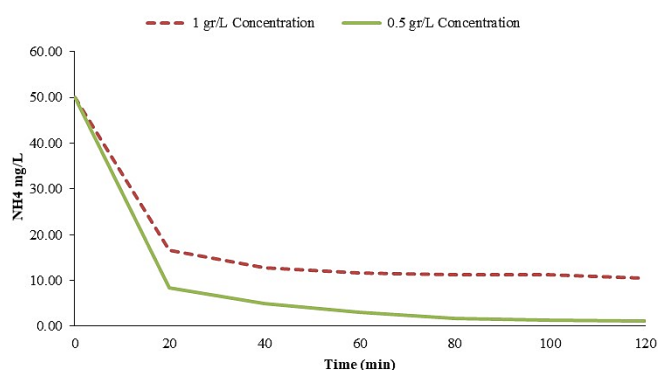


شکل ۳- الگوی زمانی کاهش آمونیاک در حضور فتوکاتالیست TiO_2 در مجاورت نور طبیعی.

Figure 3. Temporal pattern of ammonia reduction in the presence of TiO_2 photocatalyst under natural light.

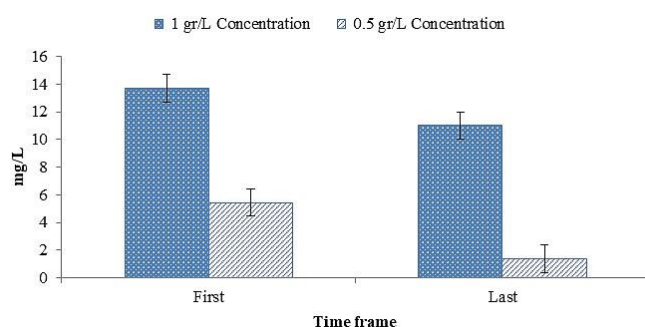
فاضلاب ارائه کرده است. همچنین، بررسی الگوی زمانی کاهش آمونیاک نشان داد که بیش‌ترین میزان کاهش در ۶۰ دقیقه ابتدایی آزمایش رخ داده است. در هر دو غلظت ۰/۵ و ۱ گرم بر لیتر، نرخ کاهش آمونیاک در بازه زمانی ۰ تا ۶۰ دقیقه به‌طور معنی‌داری بیش‌تر از بازه زمانی ۸۰ تا ۱۲۰ دقیقه بود. این امر نشان‌دهنده کاهش تدریجی کارایی فرآیند فتوکاتالیستی با گذشت زمان است، که می‌تواند ناشی از اشباع شدن سطوح فعال کاتالیست یا کاهش تدریجی غلظت آمونیاک باشد (شکل ۵). این اختلاف‌ها در هر دو غلظت به لحاظ آماری معنی‌دار بودند، که نشان‌دهنده اثربخشی بیش‌تر فتوکاتالیست در مراحل ابتدایی فرآیند تصفیه است.

در شرایط نور مصنوعی (استفاده از لامپ LED با شدت مشخص)، تأثیر دی‌اکسید تیتانیوم بر کاهش آمونیاک به‌طور قابل توجهی افزایش یافت. در غلظت ۱ گرم بر لیتر، راندمان حذف آمونیاک به ۷۹ درصد رسید و غلظت آمونیاک پس از ۱۲۰ دقیقه از مقدار اولیه ۵۰ mg/l به 10.50 ± 0.41 میلی‌گرم بر لیتر کاهش پیدا کرد. در غلظت ۰/۵ گرم بر لیتر، بالاترین راندمان حذف آمونیاک معادل ۹۷/۶۷ درصد به دست آمد و غلظت نهایی آمونیاک به 1.17 ± 0.24 میلی‌گرم بر لیتر کاهش یافت (شکل ۴). این نتایج نشان می‌دهد که نور مصنوعی نه تنها کارایی حذف آمونیاک را نسبت به نور طبیعی افزایش داده، بلکه کاهش غلظت TiO_2 به ۰/۵ گرم بر لیتر نیز عملکرد بهتری در تصفیه



شکل ۴- تغییرات غلظت آمونیاک در حضور فتوکاتالیست TiO_2 با دو غلظت ۰/۵ و ۱ گرم بر لیتر در مجاورت نور مصنوعی.

Figure 4. Changes in ammonia concentration in the presence of TiO_2 photocatalyst at two concentrations (0.5 and 1 g/L) under artificial light.



شکل ۵- الگوی زمانی کاهش آمونیاک در حضور فتوکاتالیست TiO_2 در مجاورت نور مصنوعی.

Figure 5. Temporal pattern of ammonia reduction in the presence of TiO_2 photocatalyst under artificial light.

در بررسی راندمان کاهش طی زمان‌های نمونه‌برداری می‌توان چنین عنوان نمود که در مورد دی‌اکسید تیتانیوم به صورت محرز کاهش شدید آمونیاک در ۲۰ دقیقه اول صورت می‌گیرد که در غلظت ۱ گرم بر لیتر در برابر نور طبیعی معادل ۶۲ درصد و در برابر نور مصنوعی ۸۳/۳۴ درصد بوده است (جدول ۱).

در بررسی راندمان کاهش طی زمان‌های نمونه‌برداری می‌توان چنین عنوان نمود که در مورد دی‌اکسید تیتانیوم به صورت محرز کاهش شدید آمونیاک در ۲۰ دقیقه اول صورت می‌گیرد که در غلظت ۱ گرم بر لیتر در برابر نور طبیعی معادل ۶۲ درصد و در برابر نور مصنوعی ۸۳/۳۴ درصد بوده است (جدول ۱).

جدول ۱- راندمان کاهش آمونیاک در حضور فتوکاتالیست TiO_2 در مجاورت نور طبیعی.

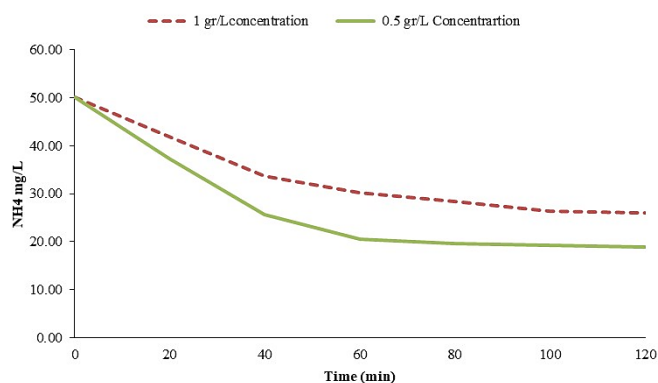
Table 1. Ammonia reduction efficiency in the presence of TiO_2 photocatalyst under natural and artificial light.

Artificial light		Natural light		Time (min)
1 gr/l Concentration	0.5 gr/l Concentration	1 gr/l Concentration	0.5 gr/l Concentration	
-66.68	-83.33	-34.67	-62.00	20
-23.00	-40.00	-29.59	-24.56	40
-9.10	-40.00	-12.32	-43.02	60
-4.28	-44.44	-4.13	-14.28	80
1.49	-20.00	-6.90	-26.19	100
-7.35	-12.50	-2.78	-9.677	120
-79.00	-97.66	-65.00	-90.67	Total Efficiency

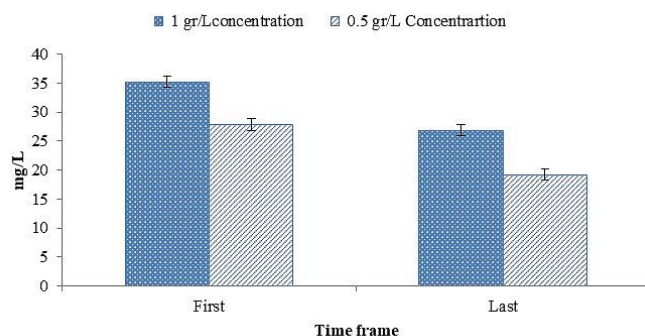
درصد و ۴۸ درصد بود. کاهش غلظت آمونیاک از مقدار اولیه ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر به ترتیب به ۲۶/۰۰±۰/۴۱ میلی‌گرم بر لیتر و ۱۸/۸۳±۰/۲۴ میلی‌گرم بر لیتر پس از ۱۲۰ دقیقه رسید. بیش‌ترین میزان کاهش آمونیاک در ۴۰ دقیقه ابتدایی مشاهده شد (شکل ۶).

عملکرد ZnO در کاهش آمونیاک: فاضلاب حاوی ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر آمونیاک تحت تأثیر نور طبیعی و در حضور اکسید روی با دو غلظت ۰/۵ و ۱ گرم بر لیتر مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که در شرایط نور طبیعی، راندمان حذف آمونیاک برای غلظت‌های ۰/۵ و ۱ گرم بر لیتر به ترتیب ۶۲/۳۴

تحلیل مقایسه‌ای تأثیر اکسید روی در دو غلظت مذکور نشان داد که نرخ کاهش آمونیاک در نیمه اول آزمایش (۰ تا ۶۰ دقیقه) به‌طور معناداری بیش‌تر از نیمه دوم (۸۰ تا ۱۲۰ دقیقه) بود. این تفاوت در هر دو غلظت ۰/۵ و ۱ گرم بر لیتر مشاهده شد و اختلاف‌ها از نظر آماری معنی‌دار بودند (شکل ۷).



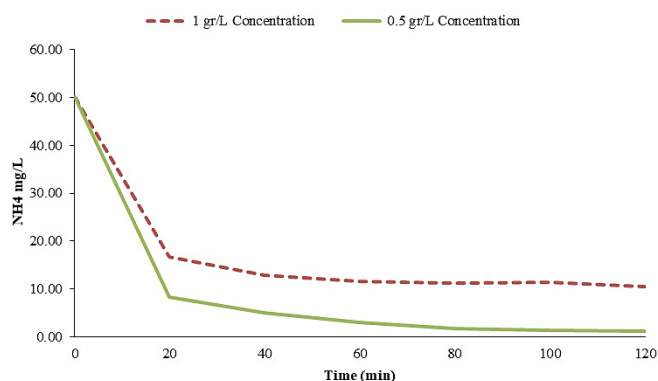
شکل ۶- تغییرات غلظت آمونیاک درحضور فتوکاتالیست ZnO با دو غلظت ۰/۵ و ۱ گرم بر لیتر در مجاورت نور طبیعی.
Figure 6. Changes in ammonia concentration in the presence of ZnO photocatalyst at two concentrations (0.5 and 1 g/L) under natural light.



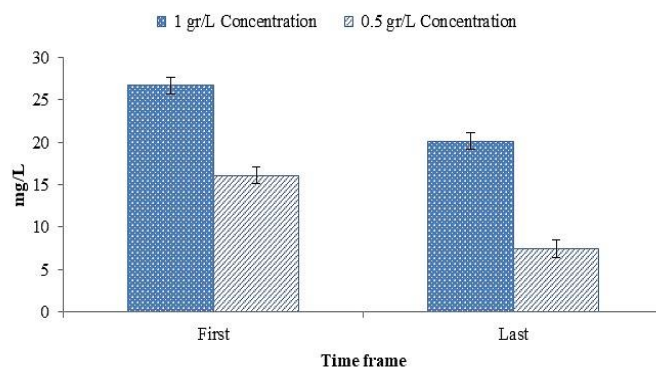
شکل ۷- الگوی زمانی کاهش آمونیاک درحضور فتوکاتالیست ZnO در مجاورت نور طبیعی.
Figure 7. Temporal pattern of ammonia reduction in the presence of ZnO photocatalyst under natural light.

مطالعات مقایسه‌ای نشان داد که در شرایط نور مصنوعی نیز، روند کاهش آمونیاک در نیمه اول آزمایش (۰ تا ۶۰ دقیقه) به‌طور قابل‌توجهی سریع‌تر از نیمه دوم (۸۰ تا ۱۲۰ دقیقه) بود. این روند در هر دو غلظت ZnO مشاهده شد و از نظر آماری تفاوت‌ها معنی‌دار گزارش شد (شکل ۸).

در تیمارهای تحت نور مصنوعی، راندمان حذف آمونیاک در حضور ZnO با غلظت‌های ۰/۵ و ۱ گرم بر لیتر به ترتیب ۹۰/۳۴ درصد و ۶۱/۶۷ درصد بود. غلظت آمونیاک از مقدار اولیه ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر به‌ترتیب به ۴/۸۳±۰/۶۲ و ۱۹/۱۷±۰/۲۴ میلی‌گرم بر لیتر پس از ۱۲۰ دقیقه کاهش یافت. بیش‌ترین کاهش در ۲۰ دقیقه ابتدایی آزمایش مشاهده گردید (شکل ۸).



شکل ۸- تغییرات غلظت آمونیاک در حضور فتوکاتالیست ZnO با دو غلظت ۰/۵ و ۱ گرم بر لیتر در مجاورت نور مصنوعی.
Figure 8. Ammonia concentration changes in the presence of ZnO photocatalyst at two concentrations (0.5 and 1 g/L) under artificial light.



شکل ۹- الگوی زمانی کاهش آمونیاک در حضور فتوکاتالیست ZnO در مجاورت نور مصنوعی.
Figure 9. Temporal pattern of ammonia reduction using ZnO photocatalyst under artificial light.

به ترتیب راندمان ۱۶/۳۴ درصد و ۱۹/۵۲ درصد و در غلظت ۰/۵ گرم بر لیتر در دقیقه‌های ۲۰ و ۴۰ به ترتیب راندمان ۲۵/۳۳ درصد و ۳۱/۲۵ درصد ثبت شد که می‌تواند ناشی از فعال شدن دیرتر فتوکاتالیست روی در مجاورت نور طبیعی باشد (جدول ۲).

در مورد اکسید روی، در مجاورت نور مصنوعی نیز به همین صورت بوده و در زمان ۲۰ دقیقه در غلظت ۱ گرم بر لیتر ۳۵/۳۴ درصد و در غلظت ۰/۵ گرم بر لیتر ۶۰ درصد کاهش مشاهده شد؛ اما در مجاورت نور طبیعی این مورد به دقیقه ۴۰ نمونه‌برداری انتقال یافته به این صورت که در غلظت ۱ گرم بر لیتر در دقیقه‌های ۲۰ و ۴۰

جدول ۲- راندمان کاهش آمونیاک در حضور فتوکاتالیست ZnO در مجاورت نور طبیعی و مصنوعی.

Table 2. Ammonia reduction efficiency in the presence of ZnO photocatalyst under natural and artificial light.

Artificial light		Natural light		Time (min)
1 gr/l Concentration	0.5 gr/l Concentration	1 gr/l Concentration	0.5 gr/l Concentration	
-35.333	-60	-16.333	-25.333	20
-20.618	-22.5	-19.521	-31.25	40
-13.636	-17.204	-10.396	-20.129	60
-5.263	-20.779	-6.077	-4.065	80
-3.174	-27.868	-7.058	-2.542	100
-5.737	-34.090	-1.265	-1.739	120
-61.666	-90.333	-48	-62.333	Total Efficiency

در مورد غلظت فتوکاتالیست‌ها، نتایج نشان داد که اختلاف معنی‌داری بین غلظت‌های ۱ و ۰/۵ گرم بر لیتر وجود دارد ($F=2/165$, $p=0/002$). و غلظت ۰/۵ گرم بر لیتر در کاهش غلظت آمونیاک تأثیر بیشتری داشته است. این کارایی موفق می‌تواند به افزایش کدورت و کاهش عبور نور در غلظت‌های بالاتر مرتبط باشد که در مطالعات قبلی نیز تأکید شده است (۱۷).

نوع کاتالیست نیز نقش مهمی در کارایی فرایند داشته است. نتایج حاصل نشان داد که دی‌اکسید تیتانیوم در مقایسه با اکسید روی در کاهش غلظت آمونیاک اثر بیشتری دارد ($F=1/741$, $p=0/007$). این نتیجه با گزارش‌های مطالعات قبلی مثل الشاذلی و همکاران (۲۰۱۶) همسو و منطبق است (۱۸).

نتیجه‌گیری

افزایش آلاینده‌های طبیعی و مصنوعی، تهدید جدی برای منابع آبی محسوب می‌شود، بنابراین کاهش این آلودگی‌ها و بازیابی آب‌های مصرفی از اهمیت بالایی برخوردار است. در این مطالعه، کارایی دو فتوکاتالیست دی‌اکسید تیتانیوم (TiO_2) و اکسید

براساس نتایج و تحلیل‌های مقایسه‌ای داده‌های حاصل از این مطالعه، مشخص شد که اختلاف معنی‌داری بین تأثیر نوع نور (طبیعی و مصنوعی) در فعالیت فتوکاتالیستی مشاهده نشد ($p=1/07$). این نتیجه در حالی است که در مطالعات پیشین، مانند مطالعه لی و پارک (۲۰۱۳) در راستای کاربرد دی‌اکسید تیتانیوم در تصفیه فاضلاب، کارایی بالاتری تحت نور فرابنفش گزارش شده است. آنان علاوه بر این، اشاره نمودند که دی‌اکسید تیتانیوم تنها ۵ درصد از انرژی خورشیدی را دریافت می‌کند (۱۴). اما در مطالعات اخیر که فتوکاتالیست‌ها با عناصر مختلفی فعال شده‌اند، قابلیت استفاده از نور مرئی افزایش یافته است. برای نمونه، اوباتا و همکاران (۲۰۱۴) نشان دادند که اضافه کردن عنصر آهن به دی‌اکسید تیتانیوم موجب افزایش کارایی آن در تجزیه آمونیاک می‌شود. همچنین، مطالعه سان و همکاران (۲۰۱۵) نشان داد که ترکیب نیتروژن-پالادیوم می‌تواند در حذف آمونیاک نقش مؤثری ایفا کند (۱۵، ۱۶). عدم تفاوت قابل ملاحظه در تأثیر دو نوع نور در مطالعه حاضر را می‌توان به کاربرد طیف یکسان نور مرئی از منابع نور طبیعی و مصنوعی نسبت داد.

روی (ZnO) در حذف آمونیاک از فاضلاب مصنوعی بررسی شد. هدف اصلی، ارزیابی امکان استفاده از این روش برای کاهش آمونیاک در فاضلاب‌های پرورش ماهی و بازگرداندن آب به چرخه تولید بود.

آزمایش‌ها تحت شرایط مختلف نوری (طبیعی و مصنوعی) و غلظت‌های متفاوت فتوکاتالیست (۰/۵ و ۱ گرم بر لیتر) انجام شد. نتایج نشان داد که در تمام موارد، کاهش معناداری در غلظت آمونیاک مشاهده شد. همچنین، استفاده از سیستم مکمل بیودراف همراه با تله ذره‌گیر، نه تنها جداسازی فتوکاتالیست‌های معلق را بهبود بخشید، بلکه هوادهی مداوم را بدون هزینه اضافی ممکن ساخت. این فرآیند به حذف مؤثر آمونیاک و ترکیبات جانبی ناشی از واکنش‌های فتوکاتالیستی کمک کرد.

با توجه به یافته‌ها، این روش می‌تواند به عنوان یک راهکار کارآمد برای مدیریت آمونیاک در صنایع پرورش ماهی و سایر صنایع با پساب‌های غنی از نیتروژن مورد استفاده قرار گیرد.

شده است. آزمایش‌ها و سنجش‌ها در آزمایشگاه هیدروبیولوژی و لیمنولوژی گروه شیلات دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران صورت گرفته است.

مشارکت نویسندگان

مجید جعفری‌همت (نویسنده اول): انجام نمونه‌برداری‌ها، آزمایش‌ها و نگارش اولیه مقاله
کیادخت رضایی (نویسنده دوم): انجام آزمایش‌ها، آنالیز داده‌ها و بازبینی و اصلاح مقاله
آرش جوانشیر خویی (نویسنده سوم و مسئول): طرح پژوهش، نظارت بر روند اجرا، اصلاح و بازبینی نهایی مقاله

اصول اخلاقی

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این اثر رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید ایشان است.

تعارض منافع

در این مقاله تعارض منافی وجود نداشته و این موضوع مورد تأیید همه نویسندگان است.

داده‌ها و اطلاعات

این پژوهش براساس داده‌ها و سنجش‌های آزمایشگاهی کار تحقیقاتی نویسنده مسئول تدوین

منابع

- 1.Kordbacheh, F., & Heidari, G. (2023). Water pollutants and approaches for their removal. *Materials Chemistry Horizons*, 2(2), 139-153.
- 2.Kabuba, J., Lephallo, J., & Rutto, H. (2022). Comparison of various technologies used to eliminate nitrogen from wastewater: A review. *Journal of Water Process Engineering*, 48, 102885.
- 3.Patel, N., Srivastav, A. L., Patel, A., Singh, A., Singh, S. K., Chaudhary, V. K., ... & Bhunia, B. (2022). Nitrate contamination in water resources, human health risks and its remediation through adsorption: a focused review. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(46), 69137-69152.
- 4.Omar, A., Almomani, F., Qiblawey, H., & Rasool, K. (2024). Advances in Nitrogen-Rich Wastewater Treatment: A Comprehensive Review of Modern Technologies. *Sustainability*, 16(5), 2112.
- 5.Zhang, H., Cao, Y., Wang, S., Tang, Y., Tian, L., Cai, W., ... & Guo, Q. (2024). Photocatalytic removal of ammonia nitrogen from water: investigations and challenges for enhanced activity. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-20.

6. Liu, N., Sun, Z., Zhang, H., Klausen, L. H., Moonhee, R., & Kang, S. (2023). Emerging high-ammonia-nitrogen wastewater remediation by biological treatment and photocatalysis techniques. *Science of the Total Environment*, 875, 162603.
7. Mohadesi, M., Sanavi Fard, M., & Shokri, A. (2024). The application of modified nano-TiO₂ photocatalyst for wastewater treatment: A review. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 104(11), 2571-2592.
8. Chang, J. S., Saint, C. P., Chow, C. W., Bahnemann, D. W., & Chong, M. N. (2024). Recent innovations in engineering Zinc Oxide (ZnO) nanostructures for water and wastewater treatment: Pushing the boundaries of multifunctional photocatalytic and advanced biotechnological applications. *International Materials Reviews*, 69(7-8), 337-379.
9. Lee, S. Y., & Park, S. J. (2013). TiO₂ photocatalyst for water treatment applications. *Journal of industrial and engineering chemistry*, 19(6), 1761-1769.
10. Aziz, F. F. A., Jalil, A. A., Hassan, N. S., Fauzi, A. A., Azami, M. S., Jusoh, N. W. C., & Jusoh, R. (2022). A review on synergistic coexisting pollutants for efficient photocatalytic reaction in wastewater remediation. *Environmental Research*, 209, 112748.
11. Tafreshi, N., Jahan Aranejad, M., & Dayi Pour, S. (2012). Investigation of nanotechnology and its application in water and wastewater treatment. International Conference on Oil, Gas, Petrochemical, and Power Plants. [In Persian]
12. Khanjani, M. H., & Mohammadi, A. (2021). Aquaculture wastewater management for sustainable production: Methods of nitrogen compound removal. *Human & Environment*, *19* (4, Serial No. 59), 89-105. [In Persian]
13. Tugaoen, H. O. N., Herckes, P., Hristovski, K., & Westerhoff, P. (2018). Influence of ultraviolet wavelengths on kinetics and selectivity for N-gases during TiO₂ photocatalytic reduction of nitrate. *Applied Catalysis B: Environmental*, 220, 597-606.
14. Mandor, H., Amin, N. K., Abdelwahab, O., & El-Ashtoukhy, E. S. Z. (2022). Preparation and characterization of N-doped ZnO and N-doped TiO₂ beads for photocatalytic degradation of phenol and ammonia. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(37), 56845-56862.
15. Obata, K., Kishishita, K., Okemoto, A., Taniya, K., Ichihashi, Y., & Nishiyama, S. (2014). Photocatalytic decomposition of NH₃ over TiO₂ catalysts doped with Fe. *Applied Catalysis B: Environmental*, 160, 200-203.
16. Sun, D., Sun, W., Yang, W., Li, Q., & Shang, J. K. (2015). Efficient photocatalytic removal of aqueous NH₄⁺-NH₃ by palladium-modified nitrogen-doped titanium oxide nanoparticles under visible light illumination, even in weak alkaline solutions. *Chemical Engineering Journal*, 264, 728-734.
17. Feng, J., Zhang, X., Zhang, G., Li, J., Song, W., & Xu, Z. (2021). Improved photocatalytic conversion of high-concentration ammonia in water by low-cost Cu/TiO₂ and its mechanism study. *Chemosphere*, 274, 129689.
18. El-Shazly, A. N., Rashad, M. M., Abdel-Aal, E. A., Ibrahim, I. A., El-Shahat, M. F., & Shalan, A. E. (2016). Nanostructured ZnO photocatalysts prepared via surfactant assisted Co-Precipitation method achieving enhanced photocatalytic activity for the degradation of methylene blue dyes. *Journal of environmental chemical engineering*, 4(3), 3177-3184.
19. Akbal, F. (2005). Photocatalytic degradation of organic dyes in the presence of titanium dioxide under UV and solar light: Effect of operational parameters. *Environmental Progress*, 24(3), 317-322.

20. Parida, K. M., Dash, S. S., & Das, D. P. (2006). Physico-chemical characterization and photocatalytic activity of zinc oxide prepared by various methods. *Journal of colloid and interface science*, 298(2), 787-793.
21. Shavisi, Y., & Sharifnia, Shahram & Hosseini, seyed Nezamedin & Khadivi, Mohammad Ali. (2014). Application of TiO₂/perlite photocatalysis for degradation of ammonia in wastewater. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 20. 278-283. **10.1016/j.jiec.2013.03.037**.