Evaluation of Biodenitrification Performance Using Nanophotocatalyst based Zinc and Titanium oxide in Bioreactor

Mohammadreza Ahmadiani Moghadam[1], Fatemeh Yazdian[2*], Hamid Rashedi [3]

1. Department of Environmental Engineering, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran
2. Department of Life Science Engineering, Faculty of New Science and Technologies, University of Tehran, Tehran, Iran
3. Department of Biotechnology, School of Chemical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

Abstract

Aim and Background: The concentration of nitrate in natural surface waters from agricultural runoff is still a challenging problem in environmental chemistry. One of the promising strategies for denitrification is the use of photocatalysts whose light-centered excited states are able to reduce nitrate to nitrogen gas. The aim of this research is to optimize the nanophotocatalyst based on zinc oxide and titanium by response surface method (RSM) in order to investigate its role in biological denitrification.

Material and methods: The structural and morphological characteristics of the prepared nanophotocatalyst were determined by Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR), scanning electron microscope (SEM), and X-ray diffraction (XRD) . The photocatalytic effect of the prepared catalyst was investigated using nitrate solution and acid adsorbent at different concentrations. Two important operational parameters, including temperature (°C) and concentration of nanophotocatalyst carbon-quantum-date/oxygen/titanium dioxide (CQDs/ZnO/TiO2) which affect the denitrification of the bio-microorganism *Thiobacillus denitrificans* in the presence of nanophotocatalyst, were optimized by the response surface method (RSM). FTIR spectrum confirmed the formation of CQDs/ZnO/TiO2 bonds.

Results: The average diameter of CQDs/ZnO/TiO2 nanophotocatalyst was in the range of 29.31-38.32 nm. Denitrification in the presence of CQDs/ZnO/TiO2 was achieved by increasing the temperature (38.5˚C) and the nanophotocatalyst concentration (0.5 g/L) equal to 62.5%. After determining the optimal conditions, biological denitrification in the presence of nanophotocatalyst was investigated at different nitrate concentrations in the moving bed bioreactor. Based on the results, under batch conditions, the biological denitrification efficiency of *Thiobacillus denitrificans* in the presence of CQDs/ZnO/TiO2 nanophotocatalyst was equal to 82.1%, while in the bioreactor, the biological denitrification efficiency of microorganisms in the presence of CQDs/ZnO/TiO2 increased to 95%. In other words, the biological denitrification of microorganisms in the moving bed bioreactor was higher in the presence of CQDs/ZnO/TiO2.

Conclusion: According to the results of this study, the CQDs/ZnO/TiO2 nanophotocatalyst in the bioreactor showed higher efficiency in nitrate removal than the discontinuous system. Based on the results, the addition of Ti^{+4} and Zn^{+2} metal nanoparticles will enhance biological denitrification and be useful for the development of cost-effective pollutant removal processes.

Keywords: CQDs/ZnO/TiO_2 nanophotocatalyst, Biodenitrification, *Thiobacillus denitrificans*, Bioreactor.

[Downloaded from ncmbjpiau.ir on 2026-08-31]

Corresponding author:
Department of Life Science Engineering, Faculty of New Science and Technologies, University of Tehran, Tehran, Iran
Email: yazdian@ut.ac.ir

ارزیابی عملکرد نیترات‌زداییِ زیستی با استفاده از نانوفتوکاتالیست پایهٔ روی و تیتانیوم اکسید (II) در بیورِاکتور

محمدرضا احمدیانی مقدم[۱]، فاطمه یزدیان[۲*]، حمید راشدی[۳]

۱. گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران
۲.گروه مهندسی علوم زیستی، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران، تهران، ایران
۳. گروه بیوتکنولوژی، دانشکده مهندسی شیمی، پردیس فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

چکیده

سابقه و هدف: غلظت نیترات در آب‌های سطحیِ طبیعی توسط رَواناب کشاورزی همچنان یک مشکل چالش‌برانگیز در شیمیِ محیطی است. یکی از استراتژی‌های امیدوارکنندهٔ نیترات‌زدایی، استفاده از فوتوکاتالیست‌هایی است که حالت‌های برانگیختهٔ نورمحور آن‌ها کاهش نیترات به گاز نیتروژن میسر می‌کنند. هدف از این پژوهش بهینه‌سازی نانوفتوکاتالیست پایهٔ روی و تیتانیوم اکسید (II) توسط روش سطح پاسخ (RSM) به‌منظور بررسی نقش آن در نیترات‌زداییِ زیستی می‌باشد.

مواد و روش‌ها: مشخصات ساختاری و مورفولوژیکی نانوفتوکاتالیست تهیه‌شده توسط طیف‌سنجی تبدیل فوریهٔ مادون‌قرمز (FTIR)، میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و طیف‌سنجی پراش اشعهٔ ایکس (XRD) مشخص شد. اثر فوتوکاتالیستی کاتالیزور تهیه‌شده با استفاده از محلول نیترات و جاذب اسید با غلظت‌های مختلف موردبررسی قرار گرفت. دو پارامتر عملیاتی مهم شامل دما (°C) و غلظت نانوفتوکاتالیست کربن کوانتوم دات / اکسید روی / دی اکسید تیتانیوم ($CQDs/ZnO/TiO_2$) که بر نیترات‌زداییِ زیستیِ میکروارگانیسم *تیوباسیلوس‌دنیتریفیکانس* در حضور نانوفتوکاتالیست تأثیر می‌گذارند، توسط روش سطح پاسخ (RSM) بهینه شدند. طیف FTIR تشکیل پیوندهای $CQDs/ZnO/TiO_2$ را تأیید نمود.

یافته‌ها: میانگین قطر نانوفتوکاتالیست $CQDs/ZnO/TiO_2$ در محدودهٔ ۳۸/۳۲-۲۹/۳۱ نانومتر بود. نیترات‌زدایی در حضور $CQDs/ZnO/TiO_2$ با افزایش دما (۳۸/۵°C) و غلظت نانوفتوکاتالیست (۰/۵ g/L) برابر ۶۲/۵٪ حاصل شد. پس از تعیین شرایط بهینه، نیترات‌زداییِ زیستی در حضور نانوفتوکاتالیست در غلظت‌های مختلف نیترات در بیورِاکتور بستر متحرک موردبررسی قرار گرفت. بر اساس نتایج، در شرایط ناپیوسته، کارایی نیترات‌زدایی زیستی *تیوباسیلوس دنیتریفیکانس* در حضور نانوفتوکاتالیست $CQDs/ZnO/TiO_2$ برابر ۸۲/۱٪ بود، درحالی‌که در بیورِاکتور، کارایی نیترات‌زداییِ زیستی میکروارگانیسم در حضور $CQDs/ZnO/TiO_2$ به ۹۵٪ افزایش یافت. به عبارت دیگر، نیترات‌زداییِ زیستیِ میکروارگانیسم در بیورِاکتور بستر متحرک در حضور $CQDs/ZnO/TiO_2$ بیشتر بود.

نتیجه‌گیری: طبق نتایج این مطالعه، نانوفتوکاتالیست $CQDs/ZnO/TiO_2$ در بیورِاکتور نسبت به سیستم ناپیوسته کارایی بالاتری در حذف نیترات نشان داد. براساس یافته‌ها، با افزودن نانوذرات فلزی Ti^{4+} و Zn^{2+} ، نیترات‌زداییِ زیستیِ تقویت‌شده و برای توسعهٔ فرآیندهای حذف آلاینده مقرون‌به‌صرفه و مفید خواهد بود.

واژگان کلیدی: نانوفتوکاتالیست $CQDs/ZnO/TiO_2$، نیترات‌زداییِ زیستی، *تیوباسیلوس دنیتریفیکانس*، بیورِاکتور.

مقدمه

آب آشامیدنی ناسالم و با کیفیت پایین روی سلامت انسان تأثیرگذار است و یک عامل بسیار مهم در مرگ‌ومیر جوامع به‌حساب می‌آید (۱). یون نیترات از جمله مهم‌ترین آلاینده‌های منابع آب‌های زیرزمینی است و با توجه به حلّالیت بالای آن، زدودن آن از آب آشامیدنی بسیار پرهزینه است. نیترات، علاوه‌بر چرخهٔ طبیعی ازت در اثر ورود فاضلاب انسانی، مـواد زائد شـهری، صنعتی و همچنین

نویسنده مسئول:
گروه مهندسی علوم زیستی، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران، تهران، ایران
پست الکترونیکی: yazdian@ut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۹/۲۵
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۲۰

[Downloaded from ncmbjpiau.ir on 2026-08-31]

فعالیت‌های کشاورزی وارد منابع آب‌وخاک شده و اثرهای نامطلوبی بر سلامتی مصرف‌کنندگان می‌گذارد (۲). افزایش غلظت نیترات در منابع آب در درجهٔ اول ناشی از منابع انسانی مانند استفادهٔ بیش از حد کودها در کشاورزی، فاضلاب خانگی و صنعتی، همچنین فضولات حیوانی است. غلظت بالای نیترات ممکن است باعث اتروفیکاسیون[1] (مُغذی شدن) منابع آب‌طبیعی مانند رودخانه‌ها و دریاچه‌ها شود (۳). همچنین افزایش آلودگیِ آب‌های سطحی و زیرزمینی به نیترات به‌دلیل تأثیر آن بر محیط‌زیست و سلامت انسان باعث نگرانی شده‌است (۴). آب آشامیدنی می‌تواند آسیب‌های مختلفی به سلامتی انسان به‌ویژه سرطان و مت‌هموگلوبینمی[2](سندرم نوزاد آبی) وارد کند (۵). حد توصیه‌شدهٔ نیترات در آب آشامیدنی توسط WHO ۵۰ میلی‌گرم در لیتر (به‌عنوان نیترات) یا ۱۱/۳ میلی‌گرم در لیتر (به‌عنوان نیتروژن) است (۶). نیترات‌زدایی آب به‌دلیل حلّالیت و پایداری بالای یون نیترات در آب یک چالش بزرگ است. بنابراین، تلاش زیاد جهت توسعهٔ تکنیک‌هایی برای حذف نیترات از آب مانند تبادل یونی، جذب، اسمز معکوس، الکترودیالیز، الکتروشیمیایی، فوتوکاتالیز، روش‌های مبتنی بر غشا و روش‌های شیمیایی و بیولوژیکی انجام شده‌است (۱۱-۷).

چرخهٔ نیتروژن (تبدیل نیتروژن به اشکال اکسیدشده و احیاشده) برای کشاورزی، انرژی و محیط‌زیست اهمیت اساسی دارد. محرک مهم اخیر این چرخه، تثبیت نیتروژن انسانی بوده که عمدتاً به سمت نیتریفیکاسیون[3]خاک برای کشاورزی و کاربرد در سنتز شیمیایی و ذخیرهٔ انرژی هدایت می‌شود (۱۲-۱۴). تثبیت نیتروژن انسانی یک به‌هم‌ریختگی قابل‌توجه در چرخهٔ نیتروژن است، که منجر به تخریب محیط‌زیست می‌شود. برای متعادل کردن چرخهٔ نیتروژن، شناسایی یک استراتژی نیتروژن‌زداییِ مصنوعی که می‌تواند در مقیاس بزرگ اجرا شود ضروری است. در طبیعت، نیترات‌زدایی عمدتاً از طریق کاهش متوالی NOx به N_2 در موجودات میکروبی انجام می‌شود (۱۵، ۱۶). روش‌های اخیر تصفیهٔ آب فرآیند نیترات‌زداییِ طبیعی را تکرار می‌کنند و از باکتری‌ها برای کاتالیز کردن مسیر انتقال الکترون چندمرحله‌ای برای تبدیل NOx به N_2 استفاده می‌کنند (۱۷). فرایندهای متداول تصفیه از قبیل روش‌های فیزیکی و شیمیایی باعث انتقال آلاینده از فازی به فاز دیگر، افزایش غلظت آن‌ها، در نتیجهٔ تولید یک آلایندهٔ جدید می‌شوند که نیاز به تصفیهٔ بیشتری دارند. در سال‌های اخیر فرایندهای اکسیداسیون‌پیشرفته به‌عنوان جایگزینی برای فرایندهای متداول تصفیه به‌کار می‌رود. این روش‌ها مبتنی بر تولید رادیکال‌های فعال مانند رادیکال‌های هیدروکسیل می‌باشند که قادرند گروه وسیعی از آلاینده‌های آلی را به‌سرعت اکسید کنند (۱۸). در میان فرایندهای اکسیداسیون پیشرفته، فتوکاتالیست‌های ناهمگن یک روش موفق برای تجزیهٔ انواع آلاینده‌ها از جمله آلاینده‌های مقاوم و خطرناک به‌کار برده می‌شوند. کاربرد فرایندهای اکسیداسیون پیشرفته مانند روش‌های فنتون، الکتروفنتون و استفاده از فتوکاتالیزورها به‌ویژه نانوفتوکاتالیزورهای با سیستم ذره‌ای نیمه‌رسانا که منجر به تولید رادیکال‌های فعال در طی فرایند اکسیداسیون می‌گردد، باعث تخریب آلاینده‌ها می‌شوند. به تازگی فرایند فتوکاتالیست به‌عنوان یکی از راهکارهای زیست‌محیطی در کشورهای صنعتی جهان به‌کار می‌رود (۱۹). فتوکاتالیست ماده‌ای است که در اثر تابش نور بتواند منجر به بروز یک واکنش شیمیایی شود، درحالی‌که خود ماده دستخوش هیچ تغییری نشود. فتوکاتالیست‌ها فقط شرایط موردنیاز برای انجام واکنش‌های اکسایش و کاهش را فراهم می‌کنند (۲۰). نیترات‌زداییِ زیستی با احیای نیترات (توسط میکروارگانیسم‌های نیترات‌زدا)، روشی مناسب برای حذف زیستی نیترات از منابع آبی می‌باشد. طی مسیر احیا، نیترات از طریق واکنش‌های احیا به گاز بی‌خطر نیتروژن تبدیل می‌شود (۲۱). در نیترات‌زداییِ زیستی، میکروارگانیسم‌ها به‌ویژه باکتری‌ها نقش اصلی را در حذف نیترات از پساب به‌عهده دارند (۲۲). مزیت این سیستم‌ها عملکرد خوب میکروارگانیسم‌های نیترات‌زدا برای حذف نیترات، هزینهٔ پایین و سرعت بالای دنیتریفیکاسیون[5]می‌باشد (۲۳، ۲۴).

امروزه ترکیبات کاتالیستیِ مختلفی نظیر کادمیم سولفید (CdS)، روی اکسید (ZnO) و تیتانیوم دی اکسید (TiO_2)، اکسید آهن (III) (Fe_2O_3) (۲۵)، اکسید زیرکونیوم (ZrO_2) (۲۶)، نقره کلرید (AgCl) (۲۷) و کامپوزیت‌های آن‌ها به‌عنوان کاتالیست در تجزیهٔ آلاینده‌های مختلف به‌خصوص نیترات مورداستفاده قرار می‌گیرند. فوتوکاتالیست‌هایی چون TiO_2 وZnO به‌دلیل پایداری در مقابل نور، هزینهٔ کم، استفاده از نور خورشید به‌عنوان منبع نور، شرایط واکنش ملایم و فعالیت فتوشیمیایی بالا در محیط‌هایی با آلودگی کم به‌طور گسترده استفاده شده‌اند (۲۸). دی اکسید تیتانیوم (TiO_2) برای کاربردهای زیست‌محیطی بسیار مناسب است، زیرا از نظر بیولوژیکی و شیمیایی غیرفعال بوده، در برابر

[1] Eutrophication
2 Methemoglobinemia
[3] Nitrification
[4] Advanced Oxidation Process
[5] Denitrification

[Downloaded from ncmbjpiau.ir on 2026-08-31]

خوردگیِ شیمیایی و فوتوشیمیایی پایدار است، همچنین به‌دلیل پایداری در شرایط سخت محیطی، در دسترس بودن آن از نقطه‌نظر تجاری، فرم چندشکلیِ مختلف با فعالیت نوریِ بالا، امکان پوشش نازک روی بسترهای جامد نگهدارنده و سهولت کار در آزمایشگاه، یکی از بهترین فتوکاتالیست‌هایی است که می‌تواند در تجزیهٔ نوری آلاینده‌های محیطی از جمله نیترات استفاده شود (۲۷). باوجوداین، فتوکاتالیست موردنظر به‌دلیل شکاف انرژی بزرگ، حساسیّت پایین به نور مرئی و تابش خورشید دارد و تنها می‌تواند تحت تابش‌های با طول‌موج کمتر از ۳۸۰ نانومتر، خاصیت فتوکاتالیستی از خود نشان دهد. نانومواد با توجه به اندازهٔ کوچک و نسبت سطح به حجم بالا، بسیار واکنش‌پذیر هستند و همین امر آن‌ها را قادر می‌سازد که به‌عنوان جاذب مورداستفاده قرار گیرند (۲۹). با ورود فناوری‌های نوین از قبیل روش‌های ترکیبی استفاده از میکروارگانیسم‌ها و نانوساختارها، مواد و راه‌حل‌های جدید جهت تصفیهٔ فاضلاب‌های صنعتی و کشاورزی و آب شرب ایجادشده و سبب بهبود کیفیت فرآیندهای حذف آلایندهٔ نیترات شده‌است (۳۰). استفاده از نانوفتوکاتالیست‌ها روشی بسیار مناسب برای حذف ترکیبات نامطلوب از محیط است، به‌طوری‌که علاوه‌بر حذف CO_2 از جو منجر به تولید ترکیبات مفیدی همچون CH_4، C_2H_6، HCHO و CH_3OH می‌شوند (۳۱). اخیراً فرآیند فوتوکاتالیست هتروژن به‌عنوان یک تکنیک با کاربردهای زیاد، از قبیل حذف کامل آلاینده‌های آلی طی چند ساعت با توجه به تولید رادیکال‌هایی از جمله هیدروکسیل، ضدعفونی کردن آب، استرلیزه کردن ابزارهای جراحی، قابلیت سازگاری با سیستم فتوراکتورها با طراحی ویژه، تهیهٔ شیشه‌های خودتمیزشونده و تبدیل آب به گاز هیدروژن موردتوجه قرار گرفته است. اساس فرآیندهای فوتوکاتالیست هتروژن، تابش‌دهی یک فوتوکاتالیست نیمه‌رسانا با نور ماوراءبنفش یا مرئی است (۳۲). دلیل جذابیت روش نانوفتوکاتالیستی عدم‌امکان حذف بسیاری از آلاینده‌ها به روش‌های مرسوم و متداول، امکان استفاده از اکسیژن اتمسفری به‌عنوان اکسیدکننده، انجام فرایند تحت شرایط محیطی و امکان معدنی‌شدن کامل مواد آلی به آب و دی‌اکسیدکربن می‌باشد. فرآیند حذف نانوفتوکاتالیستی به‌دلیل مزایای متعدد از جمله عدم‌حساسیت به سمّی بودن آلاینده، به‌عنوان یکی از راهکارهای نوین و مؤثر از بین بردن آلاینده‌های شیمیایی و میکروبی درحال توسعه است. فناوری نانو با ایجاد رویکردی نوین در صنعت فتوکاتالیست، کاربرد گسترده‌ای در آینده پیدا خواهد کرد. در مقیاس نانو نه‌تنها سطح ذرات افزایش قابل‌ملاحظه‌ای می‌یابد، بلکه اثرهای دیگری روی خواص نوری و الکترومغناطیسی خواهد داشت. مطالعات نشان می‌دهند با کاهش اندازهٔ ذره و افزایش پتانسیل اکسیداسیون - احیا، سرعت واکنش فتوکاتالیستی به‌طور چشمگیری افزایش می‌یابد. حتی در برخی شرایط، انرژی ساطع‌شده از هر منبع نوری در محیط می‌تواند به‌جای تابش اشعه ماوراءبنفش منبع انرژی مؤثری برای فتوکاتالیست باشد. فتوکاتالیست‌های نانوساختار با خواص آب‌دوستی و قدرت کاتالیستی زیاد به‌علت سطح به حجم بالای آن‌ها یکی از فناوری‌های مهم در کنترل آلودگی‌های زیست‌محیطی می‌باشند. از این فناوری می‌توان در سیستم‌های تصفیهٔ آب، پساب و هوا برای حذف آلاینده‌های مقاوم و خطرناک به‌نحو مطلوبی بهره برد (۳۳).

نقاط کوانتومی کربن[1] (CQD) یک خانوادهٔ جذاب از نانوذرات کربنی تعریف می‌شوند که عمدتاً از کربن‌هایی با اندازهٔ حدود ۱۰ نانومتر تشکیل شده‌اند (۳۴). خواص شگفت انگیز CQD مانند بی‌اثری شیمیایی، سمیت پایین، خواص فیزیکوشیمیایی مختلف و ویژگی‌های مطلوب مانند زیست-سازگاری بسیار عالی نسبت به رنگ‌های آلی معمولی و نقاط کوانتومی نیمه‌هادیِ معدنی، فعالیت فلورسنت بالا، حلّالیت آلی بالا، خواص نوری متمایز و هزینهٔ ساخت کم، توجه تحقیقاتی جامعی را به‌خود جلب کرده‌اند (۳۵-۳۸). CQD در بسیاری از زمینه‌های تحقیقاتی در تشخیص مولکول‌های زیستی (۳۹)، سنجش عناصر فلزات سنگین (۴۰)، فرآیند فوتوکاتالیستی (۴۱) حساس‌کنندهٔ دستگاه فوتوالکتروکرومیک (۴۲) تصویربرداری زیستی، کاتالیز و تحویل زیست‌مولکول/دارو استفاده شده‌است (۴۳، ۴۴). *تیوباسیلوس دنیتریفیکانس*، یک میکروارگانیسم میله‌ای، گرم‌منفی و متحرک است که نیترات‌زدایی اتوتروف انجام می‌دهد و می‌تواند طیف‌وسیعی از ترکیبات کاهش‌یافتهٔ گوگرد را برای به‌دست آوردن انرژی اکسید کند. ازآن‌جایی که این میکروارگانیسم ترجیح به استفاده از اکسیژن به‌جای نیترات به‌عنوان یک گیرندهٔ الکترونِ نهایی دارد، فقط تحت شرایط بی‌هوازی روش دنیتریفیکاسیون انتظار می‌رود (۴۵). ازآنجاکه جهت نیترات‌زدایی نیاز به یک منبع کربن است، از نانوذرات و نانوفوتوکاتالیست و اندازه‌های مختلف آن‌ها به‌منظور تأثیر آن‌ها روی رهایش منبع کربنی استفاده می‌گردد. پژوهشگرانی همچون فان[2] و همکاران مکانیسم حذف NO روی فوتوکاتالیست CQDs@MIL-100(Fe) را مطالعه نمودند. فوتوکاتالیست CQDs@MIL-100(Fe) عملکرد فوتوکاتالیستی عالی، با حداکثر ۷۰٪ راندمان حذف

[1] Carbon Quantum Dots

[2] Fan

[Downloaded from ncmbjpiau.ir on 2026-08-31]

NO را نشان داد (۴۶). همچنین اسدی و همکاران جهت حذف فوتوکاتالیستی یون نیترات از محلول‌های آبی، نانوچندسازهٔ کربن نیترید گرافیتی/کائولن را تهیه کردند (۴۷). جهت نیترات‌زدایی زیستی از بیورِاکتور نیز استفاده می‌گردد. مونتلوو[1] و همکاران در بیورِاکتور دمای ۳۵ °C، با استفاده از جمعیت میکروارگانیسم‌های اتوتروف و هتروتروف تثبیت‌شده بر بستر زئولیت ۹۵٪ نیترات‌زدایی مشاهده گردید (۴۸).

با توجه به اینکه امروزه استفاده از نانومواد در تصفیهٔ آلاینده‌های محیط بسیار موردتوجه است، هدف از این تحقیق بررسی عملکرد نانوفتوکاتالیست $CQDs/ZnO/TiO_2$ در حذف زیستی نیترات توسط میکروارگانیسم *تیوباسیلوس-دنیتریفیکانس*، بهینه‌سازی فرآیند نیترات‌زدایی توسط روش سطح پاسخ (RSM) و بررسی شرایط بهینهٔ حذف در بیورِاکتور است.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش از میکروارگانیسم *تیوباسیلوس دنیتریفیکانس* ATCC23644 استفاده شد. میکروارگانیسم یادشده اتوتروف می‌باشد و به یک منبع گوگردی (سولفید هیدروژن، گوگرد عنصری یا تیوسولفات) به‌عنوان منبع انرژی نیازمند است. میکروارگانیسم مورداستفاده در پژوهش از مجموعهٔ میکروبی DSMZ آلمان تهیه شد. برای کشت سویهٔ باکتریایی *تیوباسیلوس دنیتریفیکانس* از محیط معدنیِ پایه[2] استفاده شد.

جهت تعیین خصوصیات ساختاری و مورفولوژی نانوفوتوکاتالیست، اندازه‌گیری متوسط سایز ذرات از دستگاه‌های FT-IR 10.03.06، Perkin Elmer Spectrum، میکروسکوپ الکترونی روبشی KYKY-EM 3200، اسپکتروفوتومتر PG Instrument، دستگاه شیکر، انکوباتور مدل IKA و دستگاه سانتریفوژ مدل Sigma استفاده شد.

آزمون سنجش نیترات

در روش Chromotropic Acid جهت سنجش نیترات (۴۹، ۵۰) در اثر واکنش Nitrate Reagent A و Nitrate Reagent B با نیترات محلول زرد رنگ ایجاد و در طول‌موج ۴۱۰ نانومتر میزان جذب محلول حاصل اندازه‌گیری شد. به‌منظور سنجش نیترات نمونه‌ها، سلول‌ها به‌مدت ۲۰ دقیقه از محیط‌کشت توسط سانتریفوژ در ۵۰۰۰ دور در دقیقه جداسازی شدند. پس از عبور از فیلتر و عملیات رقیق‌سازی، ۱ میلی‌لیتر محلول به لولهٔ حاوی Nitrate Reagent A منتقل و ۱۰ بار تکان داده شد. سپس با قیف Nitrate Reagent B به لولهٔ آزمایش اضافه و تا ظهور رنگ زرد ۱۰ بار تکان داده شد. و درنهایت میزان غلظت نیترات به‌دست آمد (۵۱).

اندازه‌گیری رشد سلولی

جهت اندازه‌گیری رشد سلولی ۴ میلی‌لیتر سوسپانسیون باکتری به ویال‌های ۴۰ میلی‌لیتر حاوی ۳۶ میلی‌لیتر محیط BSM منتقل شد. پتاسیم نیترات به‌عنوان منبع نیترات با غلظت ۳۰۰ mg/L به محیط BSM اضافه شد. محیط‌کشت در انکوباتور (۳۰ °C) مدت ۲۴ تا ۴۸ ساعت همراه ویال شاهد بدون سلولِ باکتری گرماگذاری شد. نمونه‌گیری با فاصلهٔ ۶ ساعت انجام شد. میزان رشد میکروارگانیسم با اندازه‌گیری غلظت میکروارگانیسم برحسب ppm و اندازه‌گیری نیترات حذف‌شده در طول‌موج ۴۱۰ نانومتر انجام شد (۵۲).

تهیهٔ کربن کوانتوم‌دات (CQDs) به‌روش هیدروترمال

ابتدا مقدار ۲ گرم دی‌آمونیوم هیدروژن فسفات به ۷۵ میلی‌لیتر آب اضافه و روی هم‌زن مغناطیسی قرار داده شد تا به‌صورت کامل حل شود. سپس در درون بمب هیدروترمال ریخته و بمب هیدروترمال را در آون ۱۵۰ °C به‌مدت ۱۸ ساعت قرار داده شد و در نهایت کربن کوانتوم‌دات با غلظت ۲۶/۶۶ میلی‌گرم بر میلی‌لیتر به‌دست آمد.

تهیهٔ ZnO /CQDs

از کربن کوانتوم‌دات سنتزشده در مرحلهٔ قبل، ۳۰ میلی‌لیتر کربن کوانتوم‌دات با غلظت ۱۰ میلی‌گرم رقیق‌سازی شد و میزان ۷۵ میلی‌گرم ZnO اضافه نموده و در حمام اُلتراسونیک به‌مدت ۳۰ دقیقه قرار داده شد تا همگن شود، سپس میزان ۰/۰۱ گرم سدیم بورهیدارت اضافه نموده تا سطح کربن کوانتوم‌دات احیا شده و ZnO به سطح کربن کوانتوم‌دات متصل گردد. در حین واکنش گاز هیدروژن آزاد شد. در نهایت محلول کربن کوانتوم‌دات / ZnO با غلظت ۱۲/۵ میلی‌گرم بر میلی‌لیتر به‌دست آمد (۵۳).

تهیهٔ نانوفتوکاتالیست $TiO_2/ZnO/CQDs$

در مرحلهٔ بعد مقدار ۷۵ میلی‌گرم TiO_2 به محلول اضافه نموده و به‌مدت ۳۰ دقیقه روی هم‌زن مغناطیسی قرار گرفت تا کاملا حل شود و در نهایت محلول

[1] Montalvo
[2] Basal Salt Medium

[Downloaded from ncmbjpiau.ir on 2026-08-31]

$ZnO/TiO_2/CQDs$ با غلظت ۱۵ میلی‌گرم بر میلی‌لیتر به دست آمد. جهت پودر کردن نمونه نیز از دستگاه فریز-درایر استفاده نموده بدین صورت که نمونه را ابتدا سانتریفوژ کرده سپس در یخچال ۲۰-°C گذاشته تا فریز شود و سپس فریز-درایر می‌گردد.

مشخصه‌یابی نانوفتوکاتالیست $CQDs/ZnO/TiO_2$

بعد از سنتز نانوفتوکاتالیست، با استفاده از روش‌های تحلیلی مختلف، مشخصه‌یابی انجام شد. آزمون XRD برای نانوفتوکاتالیست $CQDs/ZnO/TiO_2$ با دستگاه پراش پرتوی ایکس مدل PW 1730، تحت تابش Cu-Kα (λ°=۱/۵۴۰۵۶A)، در ولتاژ ۴۰ کیلوولت و جریان ۳۰ میلی‌آمپر انجام گرفت. تحلیل‌وبررسی نتایج این آزمون توسط نرم‌افزار XPERT high score plus نسخهٔ 3.0.5 انجام شد. تأیید پیوند و برهمکنش بین کربن کوانتوم‌دات و نانوذرات ZnO و TiO_2 با دستگاه FT-IR Spectrophotometer (BRUKRE آلمان) در محدوده cm^{-1} ۴۰۰-۴۰۰۰ انجام شد.

پوشش سطح میکروارگانیسم با نانوفتوکاتالیست فلزی

جهت پوشش سطح میکروارگانیسم با نانوفتوکاتالیست $CQDs/ZnO/TiO_2$، ۴ میلی‌لیتر سوسپانسیون باکتری در ویال‌های ۴۰ میلی‌لیتر به ۳۶ میلی‌لیتر محیط‌کشت BSM اضافه شد، نانوذرات جداگانه با غلظت‌های g/L ۰/۰۱، ۰/۰۵، ۰/۵ ، ۱ و ۱/۱ به محیط اضافه شدند.

بهینه‌سازی آماری فرآیند نیترات‌زداییِ زیستی نانوفتوکاتالیست و میکروارگانیسم پوشش‌یافته در حضور نانوفتوکاتالیست

به‌منظور بهینه‌سازیِ آماری فعالیت نیترات‌زدایی نانوفتوکاتالیست $CQDs/ZnO/TiO_2$، هم‌چنین فعالیت نیترات‌زداییِ زیستی میکروارگانیسم در حضور نانوفتوکاتالیست، دما (A) و غلظت نانوفتوکاتالیست (B) به‌عنوان دو متغیر تأثیرگذار در فعالیت نیترات‌زدایی انتخاب شدند. جهت بهینه‌سازی دو عامل، نرم‌افزار روش سطح پاسخ و به‌منظور غربال‌گری و ارزیابی شاخص‌های مهم در فعالیت نیترات‌زدایی، نرم‌افزار Design-Expert برای طراحی آزمایش (DOE)[1] مورداستفاده قرار گرفت. آزمایش‌ها براساس طراحی آزمایش پلاکت برمن[2] انجام شد. جهت طراحی آزمایش محدودهٔ سطوح متغیرها پنج سطح انتخاب شدند (جدول ۱).

جدول ۱- سطوح متغیرها در بهینه‌سازی آماری فرآیند نیترات‌زدایی نانوفتوکاتالیست $CQDs/ZnO/TiO_2$ و فعالیت نیترات‌زداییِ زیستی میکروارگانیسم پوشش‌یافته با نانوفتوکاتالیست

علامت	متغیر	سطح پایین (−)	سطح مرکزی (۰)	سطح بالا (+)	کد ۱/۴۱−	کد ۱/۴۱+
A	دما (°C)	۲۵	۳۰	۳۵	۲۱/۵	۳۸/۵
B	غلظت نانوفتوکاتالیست (g/L)	۰/۰۵	۰/۵	۱	۰/۰۱	۱/۱

آزمایش در ویال‌های ۴۰ میلی‌لیتر حاوی ۳۶ میلی‌لیتر محیط‌کشت انجام شد. محیط‌های کشت حاوی غلظت mg/L ۳۰۰ نیترات ۲۰ دقیقه در دمای °C ۱۲۱ سترون شدند. نانوفتوکاتالیست جداگانه به محیط‌کشت اضافه و میزان حذف نیترات بررسی گردید. پس از تلقیح میکروارگانیسم و نانوفتوکاتالیست تحت شرایط سترون، فلاسک‌ها در دمای °C ۳۰ مدت ۲۵، ۳۵ و ۴۸ ساعت در انکوباتور قرار گرفته و فعالیت نیترات‌زداییِ زیستی ارزیابی شد.

بررسی فرآیند نیترات‌زداییِ زیستی میکرو ارگانیسم

میکروارگانیسم در محیط BSM با غلظت mg/L ۳۰۰ نیترات به‌مدت ۴۸ ساعت در دماهای °C ۲۱/۵، ۲۵، ۳۰، ۳۵ و ۳۸/۵ گرماگذاری شد. به‌منظور ارزیابی اثر دما در نیترات‌زداییِ زیستی میکروارگانیسم، نمونه‌گیری پس از ۴۸ ساعت انجام و نتایج بررسی شد.

[1] Design of experiments
[2] Placket Burman

[Downloaded from ncmbjpiau.ir on 2026-08-31]

بررسی فرآیند نیترات‌زدایی نانوفتوکاتالیست $CQDs/ZnO/TiO_2$

نانوفتوکاتالیست $CQDs/ZnO/TiO_2$ در محیط BSM با غلظت نیترات ۳۰۰ ppm، در پنج غلظت g/L ۰/۰۱، ۰/۰۵، ۰/۵، ۱ و ۱/۱ از نانوفتوکاتالیست در دماهای C° ۲۱/۵، ۲۵، ۳۰، ۳۵ و ۳۸/۵ به‌مدت ۴۸ ساعت در انکوباتور گرماگذاری شدند. به‌منظور بررسی اثر غلظت نانوفتوکاتالیست و دما بر میزان نیترات‌زداییِ نانوفتوکاتالیست، نمونه‌گیری پس از ۴۸ ساعت انجام و نتایج بررسی شد.

بررسی فرآیند نیترات‌زدایی زیستیِ میکروارگانیسم پوشش‌یافته با نانوفتوکاتالیست $CQDs/ZnO/TiO_2$

میکروارگانیسم‌های پوشش‌یافته با $CQDs/ZnO/TiO_2$ در محیط BSM با غلظت mg/L ۳۰۰ نیترات به مدت ۴۸ ساعت در غلظت‌های g/L ۰/۰۱، ۰/۰۵، ۰/۵، ۱ و ۱/۱ از نانوفتوکاتالیست در دماهای C° ۲۱/۵، ۲۵، ۳۰، ۳۵ و ۳۸/۵ گرماگذاری شدند. جهت بررسی اثر دما و غلظت نانوفتوکاتالیست بر میزان نیترات‌زداییِ زیستی میکروارگانیسم پوشش یافته با $CQDs/ZnO/TiO_2$، نمونه‌گیری پس از ۴۸ ساعت انجام و نتایج با کیت نیترات بررسی شد.

بررسی فرآیند نیترات‌زداییِ زیستی در بیوراکتور در حضور نانوفتوکاتالیست $CQDs/ZnO/TiO_2$

پس از بررسی رشد و فعالیت نیترات‌زدایی میکروارگانیسم *تیوباسیلوس دنیتریفیکانس* در ویال ۴۰ میلی‌لیتر با ۳۶ میلی‌لیتر محیط‌کشت BSM در حضور و عدم‌حضور نانوفتوکاتالیست $CQDs/ZnO/TiO_2$، میکروارگانیسم در بیوراکتور با حجم ۱۵ میلی‌لیتر حاوی ۱۲ میلی‌لیتر محیط‌کشت BSM (سترون در اتوکلاو C° ۱۲۱به‌مدت ۱۵ دقیقه) به‌مدت ۴۸ ساعت با فیلتر تحت جریان گاز نیتروژن جهت خروج اکسیژن و ایجاد شرایط بی‌هوازی قرار گرفت و در شرایط مشابه ویال، کشت داده شد. مایع تلقیح و ۱۰ میلی‌لیتر سوسپانسیون نانوفتوکاتالیست جداگانه به محیط‌کشت افزوده شدند. بیوراکتور در دمای C° ۳۵ و pH ۷ تنظیم شد. جهت بررسی رشد و فعالیت نیترات‌زداییِ زیستی میکروارگانیسم، نمونه‌گیری هر ۴ ساعت تا ۵۲ ساعت انجام شد.

تحلیل آماری

جهت مقایسهٔ اختلاف معنی‌دار مقادیر به‌دست‌آمده بین گروه‌های مطالعه، آزمون آماری One-way ANOVA در سطح آماری ۵٪ انجام شد. مقادیر کمتر از ۰/۰۵ معنادار درنظر گرفته شدند. تجزیه‌وتحلیل داده‌ها توسط نرم‌افزار SPSS22 مورد تجزیهٔ آماری قرار گرفت.

نتایج

تعیین خصوصیات مورفولوژی و بیوشیمیایی میکروارگانیسم

ویژگی‌های عمومی، مورفولوژی و بیوشیمیایی میکروارگانیسم *تیوباسیلوس دنیتریفیکانس* در جدول ۲ خلاصه شده است.

جدول ۲- خصوصیات مورفولوژی و بیوشیمیایی میکروارگانیسم *تیوباسیلوس دنیتریفیکانس*

رنگ	**قهوه‌ای**
شکل سلول	**باسیل**
ویژگی‌های کلنی	**میله ای شکل کوتاه**
اندازهٔ کلنی	**0.5×1-3µm**
تشکیل هاگ	-
واکنش گرم	-

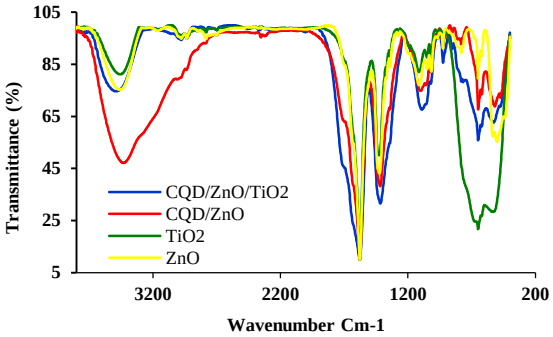
[Downloaded from ncmbjpiau.ir on 2026-08-31]

مشخصه‌یابی نانوفتوکاتالیست $CQDs/ZnO/TiO_2$

نانوفتوکاتالیست $CQDs/ZnO/TiO_2$ پس از سنتز، توسط روش‌های طیف FTIR، پراش اشعهٔ ایکس XRD و بررسی مورفولوژی مشخصه‌یابی شد.

طیف‌سنجی مادون‌قرمز (FTIR)

آنالیز طیف‌سنجی مادون‌قرمز (BRUKRE آلمان) به‌منظور حصول اطمینان از پیوند بین نانوذرات اکسید تیتانیوم و اکسید روی، تعیین برهم‌کنش بین کربن کوانتوم‌دات و نانوذرات روی و تیتانیوم اکسید (II) استفاده شد. در این روش، نمونه با استفاده از اسپکتروفتومتر در محدودهٔ طول‌موج cm^{-1} ۴۰۰-۴۰۰۰ مشخصه‌یابی شد.



شکل ۱- طیف FTIR نانوفتوکاتالیست $CQDs/ZnO/TiO_2$ و نانوذرات $CQDs/ZnO$، TiO_2 و ZnO

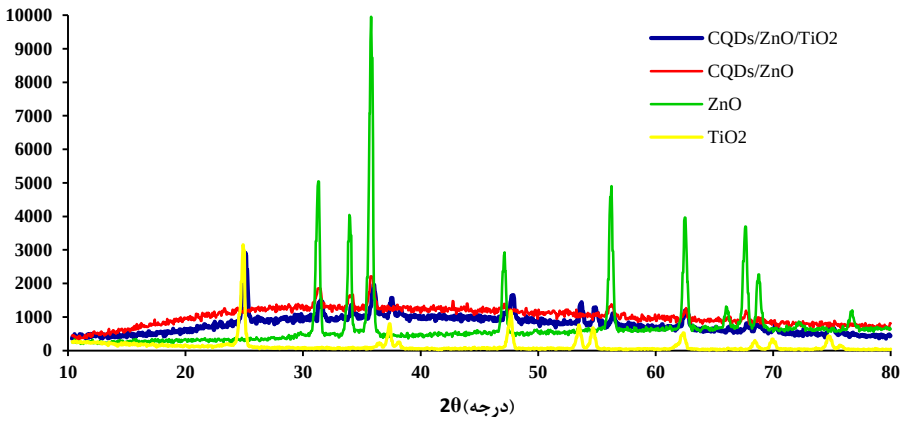
در طیف FTIR $CQDs/ZnO/TiO_2$، چندین پیک مشاهده شد که طیف‌های مربوط به گروه‌های عاملی CQD موجود بر سطح نانوذرات می‌باشند. براساس شکل ۱، پیک درمحدودهٔ cm^{-1} ۳۴۱۲ به ارتعاشات کششی گروه O-H اشاره دارد. پیک در ناحیهٔ cm^{-1} ۲۰۵۰ می‌تواند مربوط به پیوند کششی N=C باشد، نوار جذبی در cm^{-1} ۱۶۶۵ به ارتعاشات کششی گروه‌های C=C و C=O کربن کوانتوم‌دات نسبت داده می‌شود. پیک در cm^{-1} ۱۵۵۶ به ارتعاش کششی NH اشاره دارد. پیک در cm^{-1} ۱۳۹۴ به‌پیوند C=C و در Cm^{-1} ۱۱۵۵ به ارتعاش کششی پیوند C-O-C اشاره دارد. پیک موجود در cm^{-1} ۷۷۲ مربوط به گروه‌های C-H و N-H موجود در آلکن و آمین می‌باشد. نوار جذبی در Cm^{-1} ۶۷۱ به C-H اشاره دارد. پیک قوی در cm^{-1} ۵۸۱/۷۱ مربوط به Ti است و حضور TiO_2 را در نانوکامپوزیت تأیید می‌کند. به‌طورکلی حضور پیک در محدودهٔ cm^{-1} ۴۵۰-۸۰۰ به ارتعاشات کشش باند O-Ti اختصاص دارد. پیک موجود در cm^{-1} ۱۳۱۵/۹۷ تقریباً روی خط زمینهٔ پیک است و پیک خاصی نیست. پیک قوی در cm^{-1} ۱۶۳۳/۹۷ مشاهده‌شده مربوط به ارتعاش کششی TiO_4-Zn_2 می‌باشد. پیک موجود در cm^{-1} ۳۴۲۹/۶۸ پیک نسبتاً پهن و مربوط به گروه عاملی OH– آب و ارتعاشات این گروه است و با توجه به اندازهٔ پیک، مربوط به رطوبت جذب‌شده توسط نمونه می‌باشد. طیف FTIR به‌دست آمده، تشکیل پیوند CQD، ZnOو TiO_2 را تأیید نمود.

الگوی پراش پرتوی ایکس (XRD)

طیف پراش پرتوی ایکس نانوفتوکاتالیست $CQDs/ZnO/TiO_2$ و نانوذرات $CQDs/ZnO$، TiO_2 و ZnO در شکل ۲ آورده شده است.

پیک‌های موجود در زوایای °۳۰، °۶۹/۵، °۶۴/۴، °۶۲/۵، °۵۶/۵، °۳۵ = 2θ دیده می‌شود که به‌ترتیب با سطوح کریستالی ۱۰۰، ۰۰۲، ۱۱۰، ۱۰۳، ۱۱۲ و ۲۰۱ مربوط به نانوذرات ZnO هم‌خوانی دارد. پیک‌های موجود در زوا یای °۲۵/۵، °۳۸، °۴۸/۵، °۵۴، °۶۹/۵، °۷۷ = 2θ دیده می‌شود که به‌ترتیب با سطوح کریستالی ۱۰۱، ۰۰۴، ۲۰۰، ۱۰۵، ۲۰۴، ۱۱۶ و ۳۰۱ نانوذرات TiO_2 هم‌خوانی دارد. بنابراین نانوذرات ZnO و TiO_2 در نمونهٔ نانوفتوکاتالیست تأیید شد. پیک پهن در نواحی °۲۲/۵۷= 2θ، °۲۲/۸۷ = 2θ و °۲۳/۲۵ = 2θ مشاهده می‌شود، مطابق پژوهش‌های گوپتا (۵۴) پیک‌ها در نواحی °۲۲ = 2θ نشان دهندهٔ CQD در نانوذره است. در نتیجه ساختار نانوذرهٔ CQD موردتأیید است (۵۵). پیک‌های شاخص طیف پراش اشعهٔ ایکس نانوذرات $CQD-TiO_2$ در نواحی °۲۱/۶۱ = 2θ، °۲۲/۰۱ = 2θ، °۲۶/۴۶= 2θ، °۲۸/۳۳ = 2θ و °۲۹/۲۱ = 2θ دیده می‌شوند، که نشان‌دهندهٔ ترکیب CQD در نانوذرات می‌باشد. نتایج نشان می‌دهند که با افزودن نانوذرات ZnO وCQD از بلورینگی نانوذرات TiO_2 کاسته شده‌است (شکل ۲).

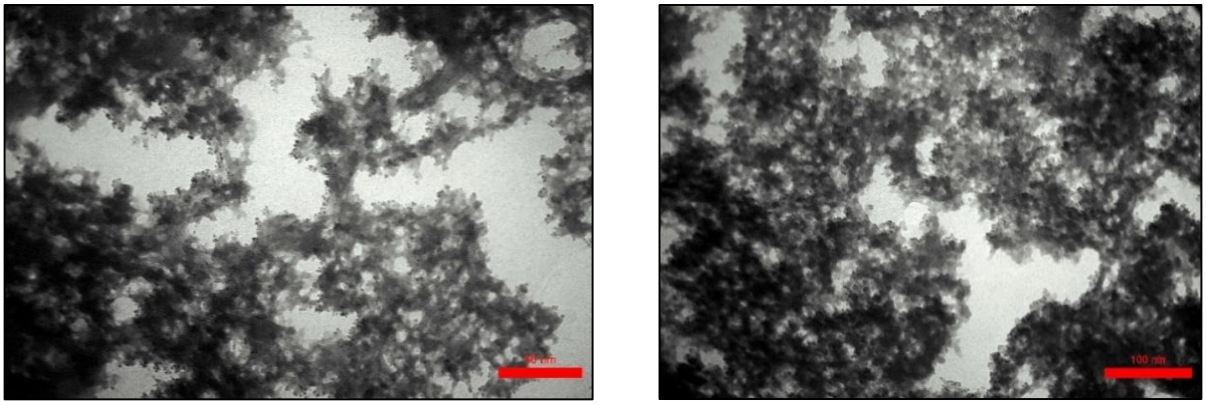
[Downloaded from ncmbjpiau.ir on 2026-08-31]



شکل ۲- طیف XRD نانوفتوکاتالیست $CQDs/ZnO/TiO_2$ و نانوذرات $CQDs/ZnO$، TiO_2 و ZnO

مورفولوژی نانوفتوکاتالیست $CQDs/ZnO/TiO_2$

مورفولوژی نانوفتوکاتالیست $CQDs/ZnO/TiO_2$ توسط تصویر SEM تعیین گردید (شکل ۳ الف و ب). همان‌طورکه در تصویر نشان داده‌شده به‌علت سبکی، نرمی و ابعاد نانومتری ذرات TiO_2 سنتزشده، چسبندگی و آگلومره شدن مشاهده می‌شود، و همچنین با افزودن نانوذرات ZnO از یکنواختی نانوفتوکاتالیست کاسته می‌گردد.



شکل ۳- الف و ب. تصاویر (SEM) نانوفتوکاتالیست $CQDs/ZnO/TiO_2$ در دو بزرگ‌نمایی مختلف

برر سی میزان حذف نیترات تو سط میکروارگانی سم *نیوباسیلوس دنیتریفیکانس*

میکروارگانیسم در محیط BSM با غلظت ۳۰۰ mg/L نیترات و pH ۷ به‌مدت ۴۸ ساعت در دماهای C° ۲۱/۵، ۲۵، ۳۰، ۳۵ و ۳۸/۵ در انکوباتور قرار داده شد. به‌منظور ارزیابی اثر دما در نیترات‌زداییِ زیستیِ میکروارگانیسم، نمونه‌گیری پس از ۴۸ ساعت انجام و نتایج بررسی شد (جدول ۳).

[Downloaded from ncmbjpiau.ir on 2026-08-31]

جدول ۳- بهینه‌سازی عوامل برای نانوفتوکاتالیست $CQDs/ZnO/TiO_2$ در حذف نیترات

آزمایش	دما (C°)	غلظت نانوفتوکاتالیست (g/L)	درصد حذف نیترات (٪)
۱	-۱	-۱	۵
۲	۱	-۱	۱۴/۲
۳	-۱	۱	۳۱/۷
۴	۱	۱	۶۲/۵
۵	-۱/۴۱	۰	۱۲
۶	۱/۴۱	۰	۴۳
۷	۰	-۱/۴۱	۱۶
۸	۰	۱/۴۱	۵۱/۱
۹	۰	۰	۲۳
۱۰	۰	۰	۲۳
۱۱	۰	۰	۲۳
۱۲	۰	۰	۲۳
۱۳	۰	۰	۲۳

بهینه‌سازی آماری شاخص های عملیاتی مؤثر در افزایش نیترات‌زداییِ نانوفتوکاتالیست $CQDs/ZnO/TiO_2$ با استفاده از روش سطح پاسخ (RSM)

دو متغیر A معرف دما (C°) و B معرف غلظت نانوفتوکاتالیست $CQDs/ZnO/TiO_2$ برای بهینه‌سازی فعالیت نیترات‌زداییِ نانوفتوکاتالیست در محیط‌کشت BSM با غلظت ۳۰۰ mg/L نیترات و pH ۷ درنظر گرفته شد. بهینه‌سازی این دو عامل توسط روش سطح پاسخ انجام شد. پاسخ R_1 برای بررسی درصد حذف نیترات می‌باشد. آزمایش‌ها برای نمونهٔ شاهد (بدون حضور نانوفتوکاتالیست) برای همهٔ نمونه‌ها انجام شد. همهٔ آزمایش‌ها با سه تکرار و میانگین آن‌ها ارائه شد. طبق طراحی آزمایش برای ۲ متغیر، ۱۳ آزمایش (۹ آزمایش و ۴ تکرار) برای نانوفتوکاتالیست (جدول ۳) مشخص شد. پاسخ R_1 مربوط به درصد حذف نیترات است. جدول ۴ نیز پاسخ R_1 نانوفتوکاتالیست $CQDs/ZnO/TiO_2$ را نشان می‌دهد. در نرم‌افزار سطح پاسخ، $p<0/05$ به‌عنوان سطح اطمینان از مؤثر بودن ضریب درنظر گرفته می‌شود. با توجه به جدول ۴، مقدار p-value برای ترم‌های دما (A) و غلظت نانوفتوکاتالیست (B) کمتر از ۰/۰۵ است، لذا این ترم‌ها برای نانوفتوکاتالیست $CQDs/ZnO/TiO_2$ هم‌چنین برهم‌کُنش پارامترهای A و B، بر درصد حذف نیترات (پاسخ R_1)، اثرگذار هستند. معادلهٔ نهایی فعالیت نیترات‌زداییِ نانوذرات با عبارت‌های کد شده، برای نانوفتوکاتالیست $CQDs/ZnO/TiO_2$ مطابق رابطهٔ ۱ می‌باشد:

$$R_1 = +23.00 + 10.79A + 15.89B + 6.02AB + 1.86A^2 + 4.89B^2 \quad \text{(رابطهٔ ۱)}$$

همچنین شرایط بهینهٔ پاسخ R_1 برای نانوفتوکاتالیست $CQDs/ZnO/TiO_2$ در جدول ۵ ارائه شده‌است.

[Downloaded from ncmbjpiau.ir on 2026-08-31]

جدول ۴- شاخص‌های نرم‌افزاری بهینه‌سازی فعالیت نیترات‌زدایی نانوفتوکاتالیست $CQDs/ZnO/TiO_2$

عبارت	مجموع مربعات	درجهٔ آزادی	مربع میانگین	F value	p-value Probe> F
	۳۲۷۴/۳۷	۵	۶۵۴/۸۷	۴۴/۹۲	<۰/۰۰۰۱
A-A	۹۳۱/۸۴	۱	۹۳۱/۸۴	۶۳/۹۱	<۰/۰۰۰۱
B-B	۲۰۲۰/۵۴	۱	۲۰۲۰/۵۴	۱۳۸/۵۸	<۰/۰۰۰۱
AB	۱۴۵/۲۰	۱	۱۴۵/۲۰	۹/۹۶	۰/۰۱۶۰
A^2	۲۴/۱۳	۱	۲۴/۱۳	۱/۶۶	۰/۲۳۹۲
B^2	۱۶۶/۱۸	۱	۱۶۶/۱۸	۱۱/۴۰	۰/۰۱۱۸

R-Squared = ۰ /۹۶۹۸

جدول ۵- شرایط بهینهٔ پاسخ R_1 برای نانوفتوکاتالیست $CQDs/ZnO/TiO_2$ (حجم ۱۰۰ میلی‌لیتر)

نانوفتوکاتالیست	R_1	B (g/l)	A (°C)
$CQDs/ZnO/TiO_2$	۶۲/۴۵۹۹	۱/۰۰	۱/۰۰

همان‌طورکه مشاهده می‌شود، حذف غیرزیستی توسط نانوفتوکاتالیست $CQDs/ZnO/TiO_2$ برابر ۶۲/۴۵۹۹٪ نیترات در C° ۳۵ و ۵٪ در دمای C° ۲۵ طی ۴۸ ساعت مشاهده شد (جدول ۵). نتایج به‌وضوح نشان می‌دهند که احیای غیرزیستی به‌شدت تحت‌تأثیر درجهٔ حرارت بوده و در دماهای بالاتر با سرعت بیشتر انجام می‌شود.

بهینه سازی آماری شاخص های عملیاتی موثر در افزایش نیترات‌زدایی‌زیستی میکرو ارگانیسم *تیوباسیلوس دنیتریفیکانس* در حضور نانوفتوکاتالیست $CQDs/ZnO/TiO_2$

جهت بهینه‌سازی فعالیت نیترات‌زدایی زیستی میکرو ارگانیسم درحضور نانوفتوکاتالیست در محیط کشت BSM با غلظت نیترات ۳۰۰ mg/L و pH ۷، دو عامل دما (°C) (A) و غلظت نانوفتوکاتالیست (B) (g/L) درنظر گرفته شد. برای تحلیل بهتر مدل متغیر R-Square (R_2) ارائه می‌شود. پاسخ R_2 بررسی درصد حذف نیترات توسط میکروارگانیسم در حضور نانوفتوکاتالیست است. جدول ۶ بهینه‌سازی عوامل موردنظر برای میکروارگانیسم *تیوباسیلوس دنیتریفیکانس* درحضور نانوفتوکاتالیست $CQDs/ZnO/TiO_2$را نشان می‌دهد.

آنالیز داده‌ها به روش RSM برای میکروارگانیسم *تیوباسیلوس دنیتریفیکانس* در حضور نانوفتوکاتالیست $CQDs/ZnO/TiO_2$

شاخص‌های نرم‌افزاری بهینه‌سازیِ افزایش نیترات‌زداییِ زیستیِ میکروارگانیسم در حضور نانوفتوکاتالیست $CQDs/ZnO/TiO_2$ در جدول ۷ نشان داده شده‌است.

[Downloaded from ncmbjpiau.ir on 2026-08-31]

جدول ۶- بهینه‌سازی عوامل برای میکروارگانیسم *تیوباسیلوس دنیتریفیکانس* درحضور نانوفتوکاتالیست $CQDs/ZnO/TiO_2$

آزمایش	غلظت نانوفتوکاتالیست (g/L)	دما (°C)	حذف نیترات (٪) ($CQDs/ZnO/TiO_2$)
۱	-۱	-۱	۲۱
۲	-۱	۱	۴۶/۸
۳	۱	-۱	۳۰
۴	۱	۱	۶۷/۸
۵	۰	-۱/۴۱	۴۰/۱
۶	۰	۱/۴۱	۸۲/۱
۷	-۱/۴۱	۰	۴۵/۱
۸	۱/۴۱	۰	۶۷/۹
۹	۰	۰	۶۸/۱
۱۰	۰	۰	۶۹
۱۱	۰	۰	۶۹
۱۲	۰	۰	۶۹
۱۳	۰	۰	۶۹

جدول ۷- شاخص‌های نرم‌افزاری بهینه‌سازی افزایش نیترات‌زدایی زیستی *تیوباسیلوس دنیتریفیکانس* درحضور $CQDs/ZnO/TiO_2$

عبارت	مجموع مربعات	درجهٔ آزادی	مربع میانگین	F value	p-value Probe> F
	۳۴۵۸/۲۶	۵	۶۹۱/۶۵	۸/۲۸	۰/۰۰۷۵
A-A	۱۸۲۲/۰۹	۱	۱۸۲۲/۰۹	۲۱/۸۲	۰/۰۰۲۳
B-B	۴۸۴/۲۹	۱	۴۸۴/۲۹	۵/۸۰	۰/۰۴۶۹
AB	۳۶/۰۰	۱	۳۶/۰۰	۰/۴۳	۰/۵۳۲۴
A^2	۵۰۳/۷۹	۱	۵۰۳/۷۹	۶/۰۳	۰/۰۴۳۷
B^2	۷۵۳/۸۷	۱	۷۵۳/۸۷	۹/۰۳	۰/۰۱۹۸

R-Squared = ۰/۸۵۵۴

به‌طور معمول R_2 بزرگتر از ۰/۷، بیانگر ضریب همبستگی نسبتاً خوب بوده و هرچقدر این ضریب به یک نزدیک‌تر باشد، انطباق داده‌های تجربی و مدل حاصل از رگرسیون بیشتر و مدل از دقت بالاتری برخوردار است. p-value <۰/۰۵ به‌عنوان سطح اطمینان از مؤثر بودن ضریب درنظر گرفته شده‌است. بر اساس نتایج جدول ۸، مقدار p-value برای ترم‌های دما (A) و غلظت نانوفتوکاتالیست (B) کمتر از ۰/۰۵ است، لذا شرایط بهینه بر درصد حذف نیترات (پاسخ R_2)، تحت‌تأثیر پارامترهای A و B، برای میکروارگانیسم *تیوباسیلوس دنیتریفیکانس* در حضور نانوفتوکاتالیست می‌باشد. معادلهٔ نهایی جهت بهینه‌سازی فعالیت نیترات‌زدایی‌زیستی میکروارگانیسم در حضور نانوفتوکاتالیست $CQDs/ZnO/TiO_2$ با عبارت‌های کد شده، مطابق رابطه ۲ می‌باشد:

$$R_1 = +68.82 + 15.09A + 7.78B + 3.00AB - 8.51A^2 - 10.41B^2$$ **(رابطهٔ ۲)**

شرایط بهینهٔ پاسخ R_2 برای میکروارگانیسم *تیوباسیلوس دنیتریفیکانس* در حضور نانوفتوکاتالیست $CQDs/ZnO/TiO_2$ در جدول ۸ ارائه شد.

[Downloaded from ncmbjpiau.ir on 2026-08-31]

جدول ۸- شرایط بهینهٔ پاسخ R_2 برای میکروارگانیسم *تیوباسیلوس دنیتریفیکانس* درحضور نانوفتوکاتالیست $CQDs/ZnO/TiO_2$

نانوفتوکاتالیست	R_2	غلظت نانوفتوکاتالیست (gr)	دما (°C)
$CQDs/ZnO/TiO_2$	۷۸/۱۹۷۱	۰/۵۱	۰/۹۸

همان‌طورکه نتایج جدول ۸ نشان می‌دهند، در شرایط بهینه، میکروارگانیسم در حضور $CQDs/ZnO/TiO_2$ به‌میـزان ۷۸/۱۹۷۱٪ نیترات‌زداییِ زیستی دارد. در پژوهش اخیر، احیای زیستیِ نیترات در حضور نانوفتوکاتالیست تحت‌تأثیر دما می‌باشد.

افزایش دما ســـبب افزایش فعالیت آنزیم نیترات ردوکتاز و افزایش فعالیت نیترات‌زداییِ زیســـتی میکروارگانیســـم می‌گردد.

مقایســـهٔ نیتـــرات‌زداییـــِ نانوفتوکاتالیســـت $CQDs/ZnO/TiO_2$ و نیتـــرات‌زداییـــِ زیســـتی میکروارگانیسم در حضور $CQDs/ZnO/TiO_2$

پس از بررسی میزان نیترات‌زدایی نانوفتوکاتالیست $CQDs/ZnO/TiO_2$، هم‌چنین نیترات‌زداییِ زیستی میکروارگانیسم در حضور نانوفتوکاتالیست، نتایج حذف و درصد اختلاف در میزان نیترات حذف‌شده در جدول ۹ ارائه شده‌است. در جدول ۹ حذف ۸۲/۱٪ نیترات طی ۴۸ ساعت در نمونهٔ حاوی $CQDs/ZnO/TiO_2$ و میکروارگانیسم مشاهده شد. مقدار ۶۲/۵٪ از مقدار اولیهٔ نیترات طی ۴۸ ساعت در نمونهٔ حاوی نانوفتوکاتالیست حذف شد. در نمونه‌های کنترل حاوی محیط‌کشت، حذف قابل‌ملاحظه از نیترات مشاهده نشد. نتایج آماری اختلاف معنی‌داری ($P<۰/۱$) را نشان می‌دهند، به‌طوری‌که بهترین شرایط مربوط به نمونه‌های حاوی نانوفتوکاتالیست و میکروارگانیسم است. در این پژوهش نیـترات‌زداییِ اتوتروفیک بـا یون‌های Ti^{4+} و Zn^{2+} تولیدشده توسط نانوفتوکاتالیست، قادر به کاهش نیترات می‌باشد.

[Downloaded from ncmbjpiau.ir on 2026-08-31]

جدول ۹- مقایسهٔ نیترات‌زداییِ نانوفتوکاتالیست و نیترات‌زداییِ زیستیِ میکروارگانیسم در حضور نانوفتوکاتالیست

آزمایش	دما (°C)	غلظت نانوفتوکاتالیست (g/L)	نیترات‌زداییِ نانوفتوکاتالیست (٪)	نیترات‌زداییِ زیستی در حضور نانوفتوکاتالیست (٪)	اختلاف حذف (٪)
۱	۲۵	۰/۰۵	۵	۲۱	۱۶
۲	۳۵	۰/۰۵	۱۴/۲	۴۶/۸	۳۲/۶
۳	۲۵	۱	۳۱/۷	۳۰	۱/۷
۴	۳۵	۱	۶۲/۵	۶۷/۸	۵/۳
۵	۱۲/۵	۰/۵	۱۲	۴۰/۱	۲۸/۱
۶	۴۲/۵	۰/۵	۴۳	۸۲/۱	۳۷/۵
۷	۳۰	۰/۰۱	۱۶	۴۵/۱	۲۹/۱
۸	۳۰	۱/۱	۵۱/۱	۶۷/۹	۱۶/۸
۹	۳۰	۰/۵	۲۳	۶۸/۱	۴۵/۱
۱۰	۳۰	۰/۵	۲۳	۶۹	۴۶
۱۱	۳۰	۰/۵	۲۳	۶۹	۴۶
۱۲	۳۰	۰/۵	۲۳	۶۹	۴۶
۱۳	۳۰	۰/۵	۲۳	۶۹	۴۶

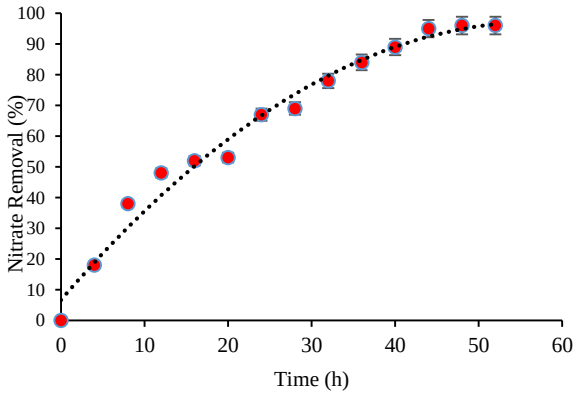
بررسی فرآیند نیترات‌زداییِ زیستی در بیوراِکتور در حضور نانوفتوکاتالیست $CQDs/ZnO/TiO_2$

نتایج نیترات‌زداییِ زیستی میکروارگانیسم در حضور نانوفتوکاتالیست $CQDs/ZnO/TiO_2$ در بیوراِکتور در جدول ۱۰ و میزان حذف نیترات توسط میکروارگانیسم در حضور نانوفتوکاتالیست $CQDs/ZnO/TiO_2$ در بیوراِکتور در زمان‌های مختلف در نمودار ۱ نشان داده شده‌است. همان‌طورکه نتایج نشان می‌دهند، نیترات‌زداییِ زیستی میکروارگانیسم در حضور $CQDs/ZnO/TiO_2$ در بیوراِکتور کارایی بالاتری در حذف نیترات دارد. در بیوراِکتور جهت ایجاد شرایط بی‌هوازی به‌منظور اکسایش نانوفتوکاتالیست و تولید الکترون، جریان گاز نیتروژن توسط کپسول نیتروژن ۴۸ ساعت ایجاد شد. طی انجام نیترات‌زدایی در بیوراِکتور به‌منظور ایجاد pH ۷، اسید و باز اتوکلاو شده وارد سامانه و pH سامانه کامل کنترل گردید. در شرایط ناپیوسته نیترات‌زداییِ زیستی میکروارگانیسم در حضور نانوفتوکاتالیست در بهترین شرایط پس از ۴۸ ساعت برابر ۸۲/۱٪ حاصل شد. در سامانهٔ بیوراِکتور نیترات‌زداییِ زیستی میکروارگانیسم در حضور نانوفتوکاتالیست، تسریع شد و پس از ۴۴ ساعت نیترات‌زداییِ زیستی میکروارگانیسم در حضور $CQDs/ZnO/TiO_2$ ۹۵٪ می‌باشد و پس از ۴۸ ساعت نیترات‌زداییِ زیستی افزایش یافت و به ۹۶٪ رسید.

[Downloaded from ncmbjpiau.ir on 2026-08-31]

جدول ۱۰- نیترات زداییِ زیستی میکروارگانیسم *تیوباسیلوس‌دنیتریفیکانس* در حضور نانوفتوکاتالیست $CQDs/ZnO/TiO_2$ در بیوراکتور

آزمایش	زمان (ساعت)	نیترات‌زداییِ زیستی میکروارگانیسم در حضور نانوفتوکاتالیست $CQDs/ZnO/TiO_2$ (٪)
۱	۰	۰٪
۲	۴	۱۸
۳	۸	۳۸
۴	۱۲	۴۸/۹
۵	۱۶	۵۲/۱
۶	۲۰	۵۳/۴
۷	۲۴	۶۷/۱
۸	۲۸	۶۹
۹	۳۲	۷۸
۱۰	۳۶	۸۴/۱
۱۱	۴۰	۸۹
۱۲	۴۴	۹۵
۱۳	۴۸	۹۶
۱۴	۵۲	۹۶



نمودار ۱- نیترات‌زداییِ زیستی میکروارگانیسم در حضور نانوفتوکاتالیست $CQDs/ZnO/TiO_2$ در بیوراکتور

بحث

نیترات به‌دلیل حلّالیت بسیار بالای آن به آسانی به درون خاک و آب‌های زیرزمینی نفوذ می‌کند. آب‌های سطحی مانند دریاچه‌ها، مخازن و رودخانه‌ها در معرض آلودگی با نیترات هستند (۵۶). حذف نیترات در فرآیندهای زیستی بازده پایین داشته، به‌همین دلیل استفاده از نانوذرات فلزی پیشنهادشده که بسیاری از محدودیت‌های نیترات‌زدایی زیستی را برطرف نموده و سبب افزایش نیترات‌زدایی زیستی می‌گردد (۵۷). فرآیندهای فتوکاتالیستی به‌دلیل اکسیداسیون کامل، عدم‌تشکیل متابولیت‌های چند سیکله و در دسترس بودن کاتالیست‌ها از قابلیت بالایی برای حذف نیترات برخوردار هستند (۵۶). تیتانیوم دی‌اکسید

[Downloaded from ncmbjpiau.ir on 2026-08-31]

فوتوکاتالیستی است که به‌دلیل بی‌اثر بودن بیولوژیکی و شیمیایی، عدم‌سمیّت، ارزان بودن، پایداری خوب در محیط آبی و کاربرد ایمن و بی‌خطر نسبت به سایر فوتوکاتالیست‌ها، کاربرد زیست‌محیطیِ بسیار گسترده دارد (۵۸). در پژوهش حاضر دو پارامتر دما (A) (C°) و غلظت نانوفتوکاتالیست $CQDs/ZnO/TiO_2$ از پارامترهای تأثیرگذار بر فعالیت نیترات‌زدایی می‌باشند. جهت بهینه‌سازی غلظت نانوفتوکاتالیست پنج سطح، مقدار کمینه (کد ۱-) ۰/۰۵ g/L، مقدار بیشینه (کد ۱+) ۱ g/L، حد وسط این دو (کد صفر) ۰/۵ g/L، (کد ۱/۴۱-) ۰/۰۱ g/L و (کد ۱/۴۱-) ۱/۱ g/L درنظر گرفته شد. برای این دو پارامتر، توسط نرم‌افزار Design-expert، ۱۳ آزمایش طراحی شد و یک پاسخ R_1 (در صد حذف نیترات mg/L) مشخص شد. با روش سطح پاسخ مقدار بهینهٔ پارامترها تعیین شد. طبق نتایج در حضور نانوفتوکاتالیست $CQDs/ZnO/TiO_2$ با افزایش پارامتر A (دما C°) به سمت مقدار بیشینه (۳۸/۵°C) و افزایش پارامتر B به‌سمت بیشینه (۱ g/L) مقدار کاهش نیترات ۶۲/۵٪ حاصل شد. در نیترات‌زداییِ زیستی میکروارگانیسم *نیوباسیلوس دنیتریفیکانس* در حضور نانوفتوکاتالیست$CQDs/ZnO/TiO_2$ ، با افزایش پارامتر A (دما C°) به سمت بیشینه (۳۸/۵°C) و تغییر پارامتر B به سمت کد مرکزی (۰/۵ g/L) پاسخ R_2 (درصد حذف نیترات) افزایش یافت. طبق نتایج، این نانوفتوکاتالیست در غلظت معین نه‌تنها اثر سمِی بر رشد و فعالیت نیترات‌زداییِ زیستیِ میکروارگانیسم ندارد بلکه با تحریک رشد و تأمین منبع الکترون اضافه، سبب افزایش فعالیت نیترات‌زداییِ زیستیِ میکروارگانیسم به‌میزان ۸۲/۱٪ در حضور نانوفتوکاتالیست $CQDs/ZnO/TiO_2$ شد. با بررسی غلظت‌های مختلف نانوفتوکاتالیست (۰/۰۱ g/L، ۰/۰۵، ۰/۵، ۱ و ۱/۱) و اندازه‌گیری میزان نیترات‌زداییِ زیستیِ میکروارگانیسم مشخص شد غلظت مناسب نانوفتوکاتالیست $CQDs/ZnO/TiO_2$ برابر ۰/۵ g/L می‌باشد. در غلظت‌های بالاتر از ۰/۵ g/L نانوفتوکاتالیست $CQDs/ZnO/TiO_2$، اثرهای سمّی حاصل از اکسیدهای فلزی نانوفتوکاتالیست بر سلول ایجاد می شود و رشد و فعالیت نیترات‌زداییِ زیستی میکروارگانیسم را کاهش می‌دهد (۵۹). در تحقیق حاضر، نیترات‌زداییِ اتوتروفیک با یون‌های Ti^{4+} و Zn^{2+} تولیدشده توسط نانوفتوکاتالیست، قادر به کاهش نیترات می‌باشد. در این پژوهش، شرایط بهینهٔ فعالیت نیترات‌زداییِ زیستی میکروارگانیسم *نیوباسیلوس دنیتریفیکانس* در حضور نانوفتوکاتالیست $CQDs/ZnO/TiO_2$ در بیوراکتور حاوی محیط BSM و ۳۰۰ mg/L نیترات و pH ۷ بررسی گردید. نتایج مشخص می‌کند نیترات‌زداییِ زیستیِ میکروارگانیسم در حضور نانوفتوکاتالیست در بیوراکتور کارایی بالاتری در حذف نیترات دارد. در شرایط ناپیوستهٔ نیترات‌زداییِ زیستیِ میکروارگانیسم در حضور نانوفتوکاتالیست در بهترین شرایط پس از ۴۸ ساعت برابر ۸۲/۱٪ حاصل شد. در سامانهٔ بیوراکتور نیترات‌زداییِ زیستیِ میکروارگانیسم در حضور نانوفتوکاتالیست، تسریع شد. طبق نتایج، پس از ۴۴ ساعت میزان نیترات‌زداییِ زیستیِ میکروارگانیسم در حضور $CQDs/ZnO/TiO_2$ ۹۵٪ بود و پس از ۴۸ ساعت افزایش یافت و به ۹۶٪ رسید. در این راستا اکرامی و همکاران نیز عملکرد نانوساختارهای‌گرافنی پایهٔ آلومینیوم rGO/Al وکلسیم rGO/Ca را جهت فعالیت نیترات‌زداییِ زیستیِ *نیوباسیلوس دنیتریفیکانس* بررسی نمودند، نتایج نشان دادند که نیترات‌زداییِ زیستی این میکروارگانیسم در حضور نانو ساختارهای rGO/Ca و rGO/Al به‌ترتیب میزان ۷۶/۶۹٪ و ۸۵/۲۶٪ حاصل شد. درصد نیترات‌زداییِ زیستی در حضور rGO/Al نسبت به rGO/Ca بیشتر بوده و در حضور rGO/Alمیزان ۹۸٪ حاصل‌شد، بنابراین این نانوساختار در بیوراکتور کارایی بالاتری در حذف نیترات نشان داد (۶۰). در مطالعهٔ Hmadi و همکاران سنتز و بهینه سازیِ نانوذرات Fe^0 پوشیده‌شده با نشاسته ($St\text{-}Fe^0$) وکربن کوانتوم‌دات ($CQD\text{-}Fe^0$) به‌منظور بررسی نقش آن‌ها در نیترات‌زداییِ زیستی و بررسی بیان‌ژن های *nirS*، *narH* و *recA* ارزیابی گردید. براساس نتایج در شرایط ناپیوسته نیترات‌زداییِ‌زیستی نانوذرات $St\text{-}Fe^0$ برابر ۸۰/۱۰٪، و نانوذرات$CQD\text{-}Fe^0$ برابر ۷۹/۸۳٪ حاصل شد. در حالی که در بیوراکتور کارایی نیترات‌زداییِ‌زیستی در حضور$St\text{-}Fe^0$ به ۹۴/۰۷٪ و$CQD\text{-}Fe^0$ به ۹۵٪ افزایش یافت. به‌عبارتی نیترات‌زداییِ‌زیستی میکروارگانیسم در بیوراکتور بستر متحرک در حضور$CQD\text{-}Fe^0$نسبت به $St\text{-}Fe^0$ بیشتر بود (۶۱). در مطالعه اخیر اختلاف نیترات‌زداییِ زیستی میکروارگانیسم در حضور نانوفتوکاتالیست $CQDs/ZnO/TiO_2$ در ارلن و بیوراکتور نشان داد، شرایط بهینه (غلظت اکسیژن حل شده (صفر)، دمای ۳۵°C و pH ۷)، به‌خوبی در بیوراکتور ایجادشده و رشد میکروارگانیسم تسهیل‌یافته و فعالیت نیترات‌زداییِ زیستی تسریع گردید.

[Downloaded from ncmbjpiau.ir on 2026-08-31]

نتیجه‌گیری

تصفیهٔ آب آشامیدنی از نیترات برای حفظ سلامت انسان و محیط‌زیست ضروری است. در این پژوهش برای نخستین‌بار از نانوفتوکاتالیست $CQDs/ZnO/TiO_2$ جهت بررسی نقش آن در نیترات‌زداییِ زیستی استفاده شد. پارامترهای عملیاتی مؤثر دما (°C) و غلظت نانوفتوکاتالیست (g/L) در نیترات‌زدایی و نیترات‌زداییِ زیستیِ میکروارگانیسم در حضور نانوفتو کا تالیست توسط روش RSM بهینه شد. نانوفتوکاتالیست تهیه‌شده توسط دستگاه‌های XRD، SEM و FTIR مشخصه‌یابی شد. طیف FTIR، برهم‌کنش بین CQD، ZnO و TiO_2 را تأیید نمود. پس از تعیین شرایط بهینه، نیترات‌زداییِ زیستیِ میکروارگانیسم در حضور نانوفتوکاتالیست و در بیورِاکتور بررسی شد. طبق نتایج، میکروارگانیسم در حضور نانوفتو کا تالیست ۸۲/۱٪ نیترات‌زداییِ زیستی داشت. در بیورِاکتور نیز در حضور $CQDs/ZnO/TiO_2$ ۹۶٪ نیترات‌زداییِ زیستی حاصل شد و این نانوفتوکاتالیست در بیورِاکتور کارایی بالاتری در حذف نیترات نشان داد. یافته‌های این مطالعه نشان دادند، با افزودن نانوذرات فلزی Ti^{4+} و Zn^{2+} در حذف آلاینده ها، نیترات‌زداییِ زیستیِ تقویت‌شده و برای توسعهٔ فرآیندهای حذف آلاینده مقرون‌به‌صرفه، مفید خواهد بود.

ملاحظات اخلاقی

ندارد.

تعارض منافع

نویسندگان اعلام می دارند تعارض منافعی وجود ندارد.

[Downloaded from ncmbjpiau.ir on 2026-08-31]

منابع

1. Mahvi AH, Asgari A, Nazemi S, Moradnia M. A Survey on drinking water quality in qazvin in 2015. Journal of Rafsanjan University of Medical Sciences. 2017 Apr 10;16(1):3-16.
2. mehrabinia P, Kermannezhad J. Investigation of Nitrate Absorption Methods from Contaminated Waters Using Biochar. J Water Sustainab Develop, 2020; 7(1): 79-90. doi: 10.22067/jwsd. v7i1.81367.
3. Lucchetti R, Onotri L, Clarizia L, Natale F.D, Somma I.D, Andreozzi R, Marotta R. Removal of nitrate and simultaneous hydrogen generation through photocatalytic reforming of glycerol over “in situ” prepared zero-valent nano copper/P25. Appl Catal B, 2017; 202: 539-549.
4. Soliman A.M, Alshamsi D, Murad A.A, Aldahan A, Ali I.M, Ayesh A.I, Elhaty I.A. Photocatalytic removal of nitrate from water using activated carbon-loaded with bimetallic Pd-Ag nanoparticles under natural solar radiation. J Photochem Photobiol A: Chem, 2022; 1;433:114175.
5. Schaider L.A, Swetschinski L, Campbell C, Rudel R.A. Environmental justice and drinking water quality: are there socioeconomic disparities in nitrate levels in US drinking water? Environ Health, 2019; 18:1-15.
6. F. Edition Guidelines for drinking-water quality WHO Chronicle, 2011; 38: 104-108.
7. El Ouardi M, Qourzal S, Alahiane S, Assabbane A, Douch J. Effective removal of nitrates ions from aqueous solution using new clay as potential low-cost adsorbent. Journal of Encapsulation and Adsorption Sciences. 2015 26;5(4):178-90.
8. Sarkar J, Saha A, Roy A, Bose H, Pal S, Sar P, Kazy SK. Development of nitrate stimulated hydrocarbon degrading microbial consortia from refinery sludge as potent bioaugmenting agent for enhanced bioremediation of petroleum contaminated waste. World Journal of Microbiology and Biotechnology. 2020 Oct;36:1-20.
9. Moussavi G, Shekoohiyan S. Simultaneous nitrate reduction and acetaminophen oxidation using the continuous-flow chemical-less VUV process as an integrated advanced oxidation and reduction process. J Hazard Mater, 2016; 318: 329-338.
10. Sowmya A, Meenakshi S. Photocatalytic reduction of nitrate over Ag–TiO_2 in the presence of oxalic acid. J Water Process Eng, 2915; 8: e23-e30.
11. Jung W, Hwang Y.J. Material strategies in the electrochemical nitrate reduction reaction to ammonia production, Mater Chem Front. 2021; 5: 6803-6823.
12. Valera-Medina A, Xiao H, Owen-Jones M, David W. I. F, Bowen P. J. Ammonia for power. Prog Energy Combust Sci, 2018; 69: 63−102.
13. Valera-Medina A, Amer-Hatem F, Azad AK, Dedoussi IC, De Joannon M, Fernandes RX, Glarborg P, Hashemi H, He X, Mashruk S, McGowan J. Review on ammonia as a potential fuel: from synthesis to economics. Energy & Fuels. 2021 Feb 28;35(9):6964-7029.
14. Chen JG, Crooks RM, Seefeldt LC, Bren KL, Bullock RM, Darensbourg MY, Holland PL, Hoffman B, Janik MJ, Jones AK, Kanatzidis MG. Beyond fossil fuel–driven nitrogen transformations. Science. 2018 May 25;360(6391):eaar6611.
15. Skiba U. Denitrification. In Encyclopedia of Ecology; Jørgensen S.E, Fath B.D, Eds. Academic Press: Oxford, 2008; 866−871.
16. Maia LB, Moura JJ. How biology handles nitrite. Chemical Reviews. 2014 May 28;114(10):97.
17. Tugaoen HO, Garcia-Segura S, Hristovski K, Westerhoff P. Challenges in photocatalytic reduction of nitrate as a water treatment technology. Science of the total environment. 2017 Dec 1;599:1524-51.
18. Gholami M, Nassehinia HR, Jonidi-Jafari A, Nasseri S, Esrafili A. Comparison of Benzene & Toluene removal from synthetic polluted air with use of Nano photocatalyticTiO 2/ZNO process. Journal of Environmental Health Science and Engineering. 2014 Dec;12:1-8.
19. Kabra K, Chaudhary R, Sawhney RL. Treatment of hazardous organic and inorganic compounds through aqueous-phase photocatalysis: a review. Industrial & engineering chemistry research. 2004 Nov 24;43(24):7683-96.
20. Akyol A, Yatmaz H, Bayramoglu M. Photo catalytic dechlorization of remazol Red RR in aqueous ZnO suspensions. Appl Catalys B Environ, 2004; 54(1): 19-24.
21. Su J, Lin S, Chen Z.L, Megharaj M, Naidu R. Dechlorination of p-chlorophenol from aqueous solution using bentonite supported Fe/Pd nanoparticles: synthesis, characterization and kinetics. Desalination, 2011; 280:167–173.
22. Kim JY, Park HJ, Lee C, Nelson KL, Sedlak DL, Yoon J. Inactivation of escherichia coli by nanoparticulate zerovalent iron and ferrous ion. Appl Environ Microbiol, 2010;76 (22): 7668-7670.

[Downloaded from ncmbjpiau.ir on 2026-08-31]

23. Mohammadi M, Sedighi M, Alimohammadi V. Modeling and optimization of Nitrate and total Iron removal from wastewater by TiO2/SiO2 nanocomposites. International Journal of Nano Dimension. 2019 Apr 1;10(2):195-208.
24. Sedighi M, Mohammadi M. Application of Green Novel NiO/ZSM-5 for Removal of Lead and Mercury ions from Aqueous Solution: Investigation of Adsorption Parameters. J Water Environ Nanotechnol, 2018; 3(4): 301-10.
25. Zhang AY, Wang WK, Pei DN, Yu HQ. Degradation of refractory pollutants under solar light irradiation by a robust and self-protected ZnO/CdS/TiO_2 hybrid photocatalyst. Water Res, 2016; 92: 78-86.
26. Fakhri A, Behrouz S, Tyagi I, Agarwal S, Gupta VK. Synthesis and characterization of ZrO_2 and carbon-doped ZrO_2 nanoparticles for photocatalytic application. J Molecul Liq, 2016; 216: 342-46.
27. Geng Z, Chen Z, Li Z, Qi X, Yang X, Fan W, Huo M. Enhanced photocatalytic conversion and selectivity of nitrate reduction to nitrogen over AgCl/TiO_2 nanotubes. Dalton Transactions, 2018; 47(32): 11104-12.
28. Reñones P, Fresno F, Fierro JL, de la Peña O'Shea VA. Effect of La as Promoter in the Photoreduction of CO 2 Over TiO 2 Catalysts. Topics in Catalysis. 2017 Sep;60:1119-28.
29. Tyagi S, Rawtani D, Khatri N, Tharmavaram M. Strategies for nitrate removal from aqueous environment using nanotechnology: a review. Journal of water process engineering. 2018 Feb 1;21:84-95.
30. Samadi MT, Saghi MH, Ghadiri K, Hadi M, Beikmohammadi M. Performance of simple nano zeolite Y and modified nano zeolite Y in phosphor removal from aque solutions. Iranian J Health Enviro, 2010; 3(1): 27- 36.
31. Mahmodi G.h, Sharifnia S.h, Madani M, Vatanpour V. Photoreduction of carbon dioxide in the presence of H_2, H_2O and CH_4 over TiO_2 and ZnO photocatalysts. Solar Energ, 2013; 97:186-194.
32. Eskandarloo H, Badiei A, Tavakoli A.R, Behnajady M.A, Ziarani G.M. Simple and safe educational experiments for demonstration of environmental application of heterogeneous photocatalysis process using the example of natural fruit juice dye degradation. J Mater Educ, 2014; 111–116**.**
33. Xue B, Yang Y, Sun Y, Fan J, Li X, Zhang Z. Photoluminescent lignin hybridized carbon quantum dots composites for bioimaging applications. Int J Biol Macromol, 2019; 122: 954–61. doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.11.018.
34. Molaei M.J. Principles, mechanisms, and application of carbon quantum dots in sensors: a review. Anal Method, 2020; 12: 1266-1287.
35. Kou X, Jiang S, Park S.J, Meng L.Y. A review: recent advances in preparations and applications of heteroatom-doped carbon quantum dots. Dalton Trans, 2020; 49: 6915-6928.
36. Katzen JM, Tserkezis C, Cai Q, Li LH, Kim JM, Lee G, Yi GR, Hendren WR, Santos EJ, Bowman RM, Huang F. Strong coupling of carbon quantum dots in plasmonic nanocavities. ACS applied materials & interfaces. 2020 Apr 8;12(17):19866-73.
37. Shi Y, Liu X, Wang M, Huang J, Jiang X, Pang J, et al. Synthesis of N-doped carbon quantum dots from bio-waste lignin for selective irons detection and cellular imaging. Int J Biol Macromol, 2019;128: 537–545. doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019. 01.146.
38. Abd Manan FA, Hong WW, Abdullah J, Yusof NA, Ahmad I. Nanocrystalline cellulose decorated quantum dots based tyrosinase biosensor for phenol determination. Materials Science and Engineering: C. 2019 Jun 1;99:37-46. https://doi.org/10.1016/j.msec.2019.01.082
39. Athika M, Prasath A, Duraisamy E, Sankar Devi V, Selva Sharma A, Elumalai P. Carbon-quantum dots derived from denatured milk for efficient chromium-ion sensing and supercapacitor applications. Mater Lett, 2019; 241:156–9.doi. org/10.1016/j.matlet.2019.01.064.
40. Ratnayake S.P, Mantilaka MMMGPG, Sandaruwan C, Dahanayake D, Murugan E, Kumar S, et al. Carbon quantum dots-decorated nano-zirconia: A highly efficient photocatalyst. Appl Catal A Gen, 2019; 570:23–30. doi.org/10.1016/j.apcata.2018.10.022.
41. Shen K, Luo G, Liu J, Zheng J, Xu C. Highly transparent photo electrochromic device based on carbon quantum dots sensitized photoanode. Sol Energy Mater Sol Cells, 2019; 193: 372–378. doi.org/10.1016/j.solmat.2019.01.004.
42. Su W, Guo R, Yuan F, Li Y, Li X, Zhang Y, Zhou S, Fan L. Red-emissive carbon quantum dots for nuclear drug delivery in cancer stem cells. The journal of physical chemistry letters. 2020 Feb 4;11(4):1357-63.
43. Karakoçak B.B, Laradji A, Primeau T, Berezin M.Y, Li S, Revi N. Hyaluronan-Conjugated Carbon Quantum Dots for Bioimaging Use. ACS Appl Mater Interfac, 2021; 13: 277-286.
44. Xiao X, Shao Z, Yu L. A Perspective of the Engineering Applications of Carbon-based Selenium-containing Materials, Chin Chem Lett. 2021; 32: 2933–2938.
45. Chen M, Zhou X, Chen X, Cai Q, Zeng R. J, Zhou S. Mechanisms of nitrous oxide emission during photoelectrotrophic denitrification by self-photosensitized *Thiobacillus denitrificans*. Water Res, 2020; 172: 115501.
46. Fan X, Hu H, Qin J, Cao X, Zhao R, Wang D. Mechanism study on NO removal over the CQDs@MIL-100 (Fe) composite photocatalyst. Environ Technol Innovat, 2021; 24: 101809.
47. Asadi E, Ghasemi MH, Ahmadi P, Monajjemi N, Afsharpour M, Baghdadi M. Synthesis and characterization of graphitic carbon nitride/kaolin nanocomposite for photocatalytic removal of nitrate from aqueous solutions.
48. Montalvo S, Huilinir C, Galvez D, Roca N, Guerrero L. Autotrophic denitrification with sulfide as electron donor: Effect of zeolite, organic matter and temperature in batch and continuous UASB reactors. Inter Biodeteriorat Biodegradat, 2016; 108:158-165.
49. American Public Health Association. Standard methods for the examination of water and wastewater. American Public Health Association.; 1926.

[Downloaded from ncmbjpiau.ir on 2026-08-31]

50. Krishna NM, Philip L. Thiobacillus denitrificans immobilized biotrickling filter for NO 2 removal. Clean Technologies and Environmental Policy. 2005 Nov;7:285-93.
51. Liu Y, Li S, Chen Z, Megharaj M, Naidu R. Influence of zero-valent iron nanoparticles on nitrate removal by Paracoccus sp. Chemospher, 2014; 108: 426-432. doi. /10.1016/j.chemosphere.2014.02.045.
52. Bharath G, Anwer S, Mangalaraja R.V, Alhseinat E, Banat F, Ponpandian N. Sunlight-Induced photochemical synthesis of Au nanodots on α-Fe_2O_3@ Reduced graphene oxide nanocomposite and their enhanced heterogeneous catalytic properties. Sci Rep, 2018; 8: 1–14.
53. Bozetine H, Wang Q, Barras A, Li M, Hadjersi T, Szunerits S, Boukherroub R. Green Chemistry Approach for the Synthesis of ZnO-Carbon Dots Nanocomposites with Good Photocatalytic Properties under Visible Light. J Colloid Interface Sci, 2016; 465: 286–294
54. Gupta V, Saleh TA. Syntheses of carbon nanotube-metal oxides composites; adsorption and photo-degradation. Carbon Nanotubes-From Research to Applications. 2011 Jul 20;17:295-312.
55. Wang L, Wang Y, Xu T, Liao H, Yao Ch, Liu Y, et al. Gram-scale synthesis of single-crystalline graphene quantum dots with superior optical properties. Nat Commun, 2014; 5(1): 5357.
56. Pourkhabbaz A, Zeidi A, Mehrjo F. Survey of Nitrate Removal Method from Aqueous Solutions Using Titanium Dioxide Nano-Photocatalyst. J Health, 2020; 10(4): 396-410.
57. Liu Y, Li S, Chen Z, Megharaj M, Naidu R. Influence of zero-valent iron nanoparticles on nitrate removal by Paracoccus sp. Chemosphere, 2014; 108: 426-432. doi. /10.1016/j.chemosphere.2014.02.045.
58. Li F, Sun S, Jiang Y, Xia M, Sun M, Xue B. Photodegradation of an azo dye using immobilized nanoparticles of TiO2 supported by natural porous mineral. Journal of Hazardous Materials. 2008 Apr 15;152(3):1037-44.
59. Kim JY, Park HJ, Lee C, Nelson KL, Sedlak DL, Yoon J. Inactivation of Escherichia coli by nanoparticulate zerovalent iron and ferrous ion. Applied and Environmental Microbiology. 2010 Nov 15;76(22):7668-70.doi. /10.1128/AEM.01009-10.
60. Ekrami A, Taghavi L, Rasekh B, Yazdian F. Optimization of Biodenitrification Using Aluminum and Calcium Based Graphene Nanostructures in Bioreactor. New Cellular and Molecular Biotechnology Journal. 2023 Mar 10;13(50):49-66.
61. Hamdi E, Rasekh B, Tajbakhsh E, Yazdian F, Ghobeh M. Investigating the Molecular Mechanism of Optimized Bio Denitrification by *Thiobacillus denitrificans* in the Presence of Metal Nanostructures in Bioreactor. Geomicrobiol J, 2022; 39 (9): 791-803, DOI: 10.1080/01490451.2022.2078446.

[Downloaded from ncmbjpiau.ir on 2026-08-31]