

Life Cycle Analysis of the Synthesis and Photocatalytic Application of Non-Metallic Semiconductor Nanosheets for Rhodamine B Removal with an Environmental Sustainability Approach

Afsaneh Shahbazi^{1*} 

1. Department of Environmental Technologies, Environmental Sciences Research Institute, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

Abstract

The proliferation of persistent organic dye contaminants, such as Rhodamine B (RhB), in aquatic environments necessitates the development and rigorous environmental evaluation of sustainable wastewater treatment technologies. Visible-light-driven photocatalysis using advanced semiconductor materials has emerged as a promising, green, and energy-efficient solution, offering complete degradation of pollutants into harmless minerals, unlike conventional methods that often merely transfer pollution. Graphitic carbon nitride nanosheets (g-C₃N₄), a metal-free, visible-light-active photocatalyst, has garnered considerable attention for its high thermal stability, scalability, and favorable physicochemical properties. However, the energy-intensive nature of synthesizing nanostructured catalysts demands a quantitative environmental assessment—a Life Cycle Assessment (LCA)—to validate the technology's true sustainability beyond functional performance metrics. Addressing this critical gap, this study conducted a comprehensive LCA, adhering to ISO 14040/14044 standards, to quantify the environmental burdens associated with both the production and the application of g-C₃N₄ in RhB dye degradation. Environmental impacts were assessed using the SimaPro 10.2 software and the globally accepted ReCiPe 2016 method at both the Midpoint (e.g., Global Warming, Water Use) and aggregated Endpoint levels (Human Health, Ecosystems, and Resources). The LCA results revealed a fundamental structural challenge: In the catalyst synthesis phase, electrical energy consumption was identified as the single, dominant environmental hotspot, contributing over 97% across all 22 Midpoint impact categories and approximately 97.5% to 99.8% across the Endpoint damage categories. This high dominance was directly attributed to the severe reliance of the high-temperature calcination process on the region's carbon-intensive, fossil fuel-based electricity grid. Conversely, the contributions from precursor materials (melamine and nitrogen) were consistently negligible, registering below 3%. In the photocatalytic application phase (wastewater treatment), the structure of the hotspot fundamentally shifted: the overall environmental cost was predominantly carried by the embedded environmental cost within the g-C₃N₄ catalyst itself. The catalyst's embodied burden accounted for approximately 78% of the total damage across all three Endpoint categories (Resources, Human Health, and Ecosystems). The operational electricity required for the visible-light reaction became a secondary contributor, accounting for less than 23% of the total burden. This finding conclusively demonstrated that the main environmental impact of the overall treatment process stemmed not from the operation, but from the initial, heavy "environmental investment" required for the high-carbon synthesis of the catalyst. To mitigate this structural challenge, a sensitivity analysis simulating a 95% reduction in electricity consumption during the g-C₃N₄ synthesis phase was performed. The results validated the direct relationship between the catalyst's embodied burden and the carbon intensity of its production: the catalyst's contribution to final Endpoint damages plummeted by over 92%, dropping to less than 6% across all damage categories. With the structural burden of the catalyst neutralized, the operational electricity consumption for the treatment process became the new dominant hotspot, contributing over 90% of the remaining impacts. In conclusion, this LCA study provides a critical, quantitative assessment revealing that the environmental sustainability of non-metallic semiconductor nanosheet photocatalytic technology is inextricably linked to the decarbonization of the synthesis process through the adoption of low-carbon electricity, and the maximization of the catalyst's operational lifespan and recoverability to distribute the high embodied environmental cost. This strategy is crucial for the technology to fulfill its potential as a truly green and sustainable solution for advanced wastewater treatment.

Review History

Received: Nov 13, 2025

Revised: Jan 17, 2026

Accepted: May 30, 2026

Keywords

Life Cycle Assessment
Nanosheets, Non-metallic
Semiconductor
Environmental
Sustainability

* Corresponding Author Email: a_shahbazi@sbu.ac.ir - ORCID: 0000-0002-5230-3332



Copyright © 2026, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

تحلیل چرخه حیات سنتز و کاربرد فتوکاتالیستی نانوصفحات نیمه‌رسانای غیرفلزی در حذف رنگ رودامین بی با رویکرد پایداری محیط‌زیستی

افسانه شهبازی^{*۱}

۱. دانشیار، گروه فناوری‌های محیط زیست، پژوهشکده علوم محیطی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

چکیده

تاریخچه داوری

گسترش آلودگی‌های آبی ناشی از ترکیبات رنگ‌زای آلی، نیاز به بررسی همه‌جانبه و مبتنی بر پایداری فناوری‌های تصفیه را آشکار ساخته است. در همین راستا، در این پژوهش از ارزیابی چرخه حیات به عنوان روشی معتبر برای کمی‌سازی بارها و پیامدهای محیط‌زیستی فرآیندهای سنتز و کاربرد نانوصفحات نیمه‌رسانای غیرفلزی کربن نیتريد گرافیتی در حذف رنگ رودامین بی از پساب (با غلظت ۵۰ میلی گرم بر لیتر) استفاده شد. بدین ترتیب، پایداری محیط‌زیستی فرآیند تصفیه مورد مطالعه با استفاده از بانک داده Eco-invent در نرم‌افزار SimaPro و بر پایه روش ReCiPe 2016 در سطوح Midpoint و Endpoint به صورت کمی تحلیل شد. نتایج فاز سنتز نشان داد انرژی الکتریکی با سهمی بیش از ۹۷ درصد، کانون غالب پیامدهای محیط‌زیستی است؛ این امر به دلیل اتکای شدید فرآیند به منابع برق با ردپای کربن بالا در شبکه منطقه می‌باشد. با این حال، در فاز کاربرد (تصفیه پساب)، ساختار کانون آسیب تغییر یافته و هزینه‌های محیط‌زیستی نهفته در کاتالیست با سهمی حدود ۷۸ درصد، به عنوان عامل غالب در تمامی شاخص‌های آسیب‌نمایی شناسایی شد. به منظور مدیریت بارهای ساختاری مذکور، تحلیل حساسیت با سناریوی کاهش ۹۵ درصدی مصرف برق در فاز سنتز انجام شد. نتایج این سناریو، وابستگی مستقیم شدت آسیب‌های مرتبط با کاتالیست به میزان کربن تولید شده در فرآیند سنتز را نشان داد و سهم کاتالیست در آسیب‌های نهایی را حدود ۹۲ درصد کاهش داد. بنابراین، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که پایداری فناوری فتوکاتالیستی مبتنی بر نانوصفحات نیمه‌رسانای غیرفلزی و کاهش بارهای محیط‌زیستی، به‌طور معناداری به کربن‌زدایی فرآیند سنتز و افزایش طول عمر چرخه استفاده از کاتالیست وابسته است.

کلمات کلیدی

تحلیل چرخه حیات

نانوصفحات

نیمه‌رسانا

غیرفلزی

پایداری محیط‌زیست

۱- مقدمه

حدود ۲۸۰'۰۰۰ تن رنگ صنعتی سالانه از طریق فاضلاب صنایع نساجی وارد محیط زیست می‌شود. این ترکیبات، به ویژه رنگ رودامین بی (RhB)، به دلیل ساختار آروماتیکی پیچیده، مقاومت در برابر تجزیه زیستی و پایداری نوری و حرارتی بالا، از مهم‌ترین آلاینده‌های محیط‌های آبی محسوب شده که به راحتی از پساب‌های صنعتی حذف نمی‌شوند و در محیط باقی می‌مانند [1].

افزایش روزافزون صنایع نساجی، چاپ و تولید مواد رنگزا منجر به ورود مقادیر قابل توجهی از رنگ‌های آلی پایدار به منابع آبی شده است. طبق مطالعات پیشین، حدود ۱۰-۱۵ درصد از رنگ‌های استفاده شده در صنعت نساجی در فرآیند رنگرزی وارد فاضلاب می‌شوند. همچنین تخمین زده شده است که رقمی در

* رایانامه نویسنده مسئول: a_shahbazi@sbu.ac.ir - ORCID: 0000-0002-5230-3332

کپی‌رایت © ۲۰۲۶، انتشارات دانشگاه تربیت مدرس (TMU Press). این مقاله به‌صورت دسترسی آزاد منتشر شده و تحت مجوز بین‌المللی Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 قرار دارد (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>). بر اساس این مجوز، شما می‌توانید این مطلب را در هر قالب و رسانه‌ای کپی، بازنشر و بازآفرینی کنید و یا آن را ویرایش و بازسازی نمایید، به شرط آنکه نام نویسنده را ذکر کرده و از آن برای مقاصد غیرتجاری استفاده کنید.



استخراج مواد اولیه تا پایان عمر سامانه، ضرورتی انکارناپذیر است. این رویکرد، امکان شناسایی مراحل و نقاط بحرانی (هات اسپات‌ها) با بیشترین سهم در پیامدهای محیط‌زیستی، بهینه‌سازی مصرف منابع و انرژی، و تضمین پایداری واقعی فناوری‌های نوین تصفیه آب را فراهم می‌سازد [9-11].

ادغام ارزیابی چرخه حیات (LCA) در توسعه و کاربرد فتوکاتالیست‌های نانوساختار، نه تنها به شناسایی نقاط بحرانی محیط زیستی کمک می‌کند، بلکه بهینه‌سازی فرایندها و انتخاب مواد اولیه را نیز تسهیل می‌نماید. مطالعات اخیر نشان می‌دهند که پیروی دقیق از مراحل چهارگانه LCA مطابق با استانداردهای ISO 14040 و ISO 14044 (شامل تعریف هدف و دامنه، تهیه فهرست موجودی چرخه حیات، ارزیابی آثار و تفسیر نتایج) برای اطمینان از شفافیت، کیفیت داده‌ها و قابلیت مقایسه نتایج ضروری است [12-14]. در حوزه فتوکاتالیست‌های نانوساختار، LCA به‌عنوان ابزاری راهبردی برای ارزیابی جامع آثار محیط زیستی از مرحله استخراج مواد اولیه تا پایان عمر محصول به کار می‌رود. این رویکرد امکان شناسایی سهم هر مرحله (مانند سنتز، مصرف انرژی، و دفع نهایی) در پیامدهای محیط زیستی را فراهم می‌سازد و به تصمیم‌گیرندگان کمک می‌کند تا گزینه‌های بهینه با کمترین آثار منفی را انتخاب کنند. به ویژه، مصرف انرژی و نوع مواد اولیه به عنوان مهم‌ترین نقاط بحرانی شناسایی شده‌اند و استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر و مواد اولیه پایدار می‌تواند به کاهش آثار منفی کمک کند [15]. همچنین، LCA با فراهم کردن داده‌های کمی و مقایسه‌ای، نقش مهمی در توسعه فناوری‌های نوین تصفیه آب و تضمین پایداری آن‌ها ایفا می‌کند و به‌عنوان ابزاری برای تصمیم‌گیری مبتنی بر شواهد در سیاست‌گذاری و طراحی صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرد [16].

در سال ۲۰۲۳ مطالعه‌ای با عنوان «مقایسه ارزیابی چرخه حیات مسیرهای سنتز گرافیت کربن نیتريد» انجام شد. آن‌ها با استفاده از LCA، هشت مسیر مختلف سنتز $g-C_3N_4$ را از نظر آثار محیط زیستی بررسی کردند و دریافتند که مصرف برق بیشترین سهم را در آثار تجمعی دارد. همچنین نشان دادند که بهینه‌سازی مراحل سنتز و استفاده از منابع انرژی پاک می‌تواند آثار محیط زیستی را کاهش دهد. مقایسه با نانوذرات TiO_2 نیز نشان داد که روش سنتز و منبع انرژی نقش کلیدی در پایداری محیط زیستی دارند [17].

حضور این ترکیبات در آب، حتی در غلظت‌های بسیار پایین، می‌تواند باعث سمیت، جهش‌زایی، سرطان‌زایی و اختلال در اکوسیستم‌های آبی شود و سلامت انسان و محیط زیست را به شدت تهدید کند. از این رو، توسعه فناوری‌های کارآمد، اقتصادی و پایدار برای حذف مؤثر این ترکیبات از پساب‌ها، یک ضرورت جهانی و حیاتی به شمار می‌رود [2].

روش‌های مرسوم تصفیه شامل جذب سطحی، انعقاد شیمیایی، اکسیداسیون پیشرفته و فرایندهای بیولوژیکی، علی‌رغم اثربخشی نسبی، با محدودیت‌هایی مانند مصرف بالای مواد شیمیایی، تولید لجن ثانویه، هزینه عملیاتی زیاد و ناکارایی در حذف کامل رنگ‌های مقاوم مواجه‌اند. افزون بر این، برخی از این فناوری‌ها فقط موجب انتقال آلودگی از فاز مایع به جامد می‌شوند، بدون آن‌که منجر به تجزیه واقعی ترکیب آلاینده شوند [3]. در این میان، استفاده از فناوری‌های فتوکاتالیستی مبتنی بر نور مرئی و مصارف انرژی اندک، به دلیل قابلیت اکسیداسیون کامل آلاینده‌ها تا محصولات معدنی بی‌ضرر، به عنوان رویکردی سبز و پایدار مورد توجه گسترده قرار گرفته است [4].

در میان نیمه‌رساناهای مورد استفاده در فتوکاتالیز، کربن نیتريد گرافیتی ($g-C_3N_4$) به عنوان یک فتوکاتالیست نسل جدید بدون فلز و فعال در ناحیه نور مرئی، به دلیل ترکیب منحصربه‌فردی از ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خود، از جمله پایداری حرارتی و شیمیایی بالا، باند گپ مناسب (~ 2.7 eV)، سنتز مقرون‌به‌صرفه و مقیاس‌پذیر و سازگاری محیط‌زیستی، توجه زیادی را به خود جلب کرده است [5-8].

با توجه به پیچیدگی فرایندهای سنتز و به‌کارگیری فتوکاتالیست‌های نانوساختار، ارزیابی آثار محیط‌زیستی آن‌ها صرفاً بر اساس کارایی حذف آلاینده‌ها نمی‌تواند تصویری دقیق از پایداری واقعی فناوری ارائه دهد. فرایندهای تولید و استفاده از مواد نانوساختار مانند $g-C_3N_4$ ممکن است با مصرف انرژی بالا، استفاده از پیش‌ماده‌های شیمیایی و تولید پسماندهای جانبی همراه باشند که منجر به بروز پیامدهای محیط‌زیستی مستقیم و غیرمستقیم می‌شود. از این رو، بهره‌گیری از ارزیابی چرخه حیات (Life Cycle Assessment-LCA) به عنوان رویکردی کمی و نظام‌مند مطابق با استانداردهای ISO 14040 و ISO 14044، برای شناسایی کمی‌سازی و مقایسه پیامدهای محیط‌زیستی در تمامی مراحل از

۲-۱- تعریف هدف و دامنه

براساس روش استاندارد، گام اول که شامل تعریف هدف و دامنه، مشخص کردن مرز فرایندی و عملیاتی و همچنین تعریف واحد عملکردی است، انجام شد. هدف این مطالعه، سنجش کمی پیامدهای محیط‌زیستی و ارزیابی پیامدهای فرایند تخریب فتوکاتالیستی رنگ RhB به وسیله فتوکاتالیست $g-C_3N_4$ است. واحد عملکردی این مطالعه به صورت "تخریب ۵۰ میلی گرم رنگ RhB از ۱ لیتر محلول آبی با استفاده از فتوکاتالیست $g-C_3N_4$ " تعریف شد. این واحد عملکردی به گونه‌ای انتخاب گردید که بیانگر بازده واقعی فرایند فتوکاتالیستی در شرایط آزمایشگاهی باشد و مبنای مناسبی برای مقایسه و ارزیابی آثار محیط زیستی مراحل مختلف سنتز و کاربرد $g-C_3N_4$ در چارچوب ارزیابی چرخه حیات فراهم آورد.

دامنه ارزیابی چرخه حیات این مطالعه به صورت گهواره تا دروازه تعریف شد و شامل فرایند سنتز فتوکاتالیست $g-C_3N_4$ و کاربرد آن در تجزیه‌ی رنگ RhB است. از آنجا که تمامی مواد اولیه به صورت تجاری خریداری شدند، فرایندهای بالادستی تولید آن‌ها در تحلیل موجودی در نظر گرفته نشد و آثار محیط زیستی مرتبط با آن‌ها از طریق داده‌های ثانویه پایگاه Ecoinvent لحاظ شد. در این محدوده، مصرف انرژی و مواد در مرحله‌ی سنتز و اجرای آزمایش تحت تابش نور مرئی بررسی شد. مراحل پایان عمر و بازیافت یا استفاده‌ی مجدد از محدوده این مطالعه خارج هستند.

۲-۲- فهرست موجودی چرخه حیات

فهرست موجودی چرخه حیات (LCI) دومین گام در فرایند ارزیابی چرخه حیات (LCA) محسوب می‌شود و نقشی کلیدی در شناسایی، تعیین و کمی‌سازی جریان‌های ورودی و خروجی مرتبط با سیستم مورد مطالعه ایفا می‌کند. در این مرحله، کلیه داده‌های مربوط به مصرف منابع از جمله مواد اولیه، انرژی و مواد شیمیایی، به همراه خروجی‌ها شامل آلاینده‌ها، پسماندها و انتشارات به هوا، آب و خاک، در محدوده‌ی مرز تعریف‌شده‌ی سیستم گردآوری می‌شوند. این داده‌ها، بنیانی برای تحلیل و ارزیابی پیامدهای محیط‌زیستی در مراحل بعدی LCA فراهم کرده و نقش تعیین‌کننده‌ای در اطمینان از دقت و قابلیت اتکای نتایج دارند [20].

در سال ۲۰۲۴ در مقاله‌ای مروری به بررسی فتوکاتالیست‌های $g-C_3N_4$ دوپ شده با عناصر غیر فلزی و ارزیابی پایداری آن‌ها با استفاده از LCA پرداخته شد. نتایج این مطالعه نشان داد که دوپینگ غیر فلزی می‌تواند عملکرد فتوکاتالیستی را بهبود بخشد و تأکید کردند که برای تجاری‌سازی موفق این فناوری، انجام ارزیابی چرخه حیات جامع و دقیق ضروری است [18].

در سال ۲۰۲۵ در مطالعه‌ای با روش تحلیل کتاب‌سنجی، روند تحقیقات مربوط به کاربرد $g-C_3N_4$ در حذف آلاینده‌های نوظهور از آب بررسی شد. این مطالعه با استفاده از داده‌های ده سال اخیر نشان داد که تحقیقات در این حوزه رشد چشمگیری داشته و ارزیابی چرخه حیات به عنوان یک محور مهم برای هدایت پژوهش‌های آینده و شناسایی محدودیت‌ها مطرح شده است [19]. با این وجود، مرور ادبیات علمی نشان می‌دهد که تاکنون هیچ مطالعه جامعی در زمینه ارزیابی چرخه حیات (LCA) سنتز فتوکاتالیست $g-C_3N_4$ و عملکرد آن در حذف رنگ RhB انجام نشده است. این خلاء پژوهشی موجب شده است که پایداری محیط‌زیستی این فناوری عمدتاً به صورت کیفی و مبتنی بر شاخص‌های عملکردی ارزیابی شود. بنابراین در پژوهش حاضر، چرخه حیات سنتز و کاربرد فتوکاتالیست $g-C_3N_4$ برای حذف رنگ RhB مورد ارزیابی قرار می‌گیرد تا برای نخستین بار تصویری کمی و جامع از پیامدهای محیط‌زیستی این فرایند ارائه دهد و با شناسایی مراحل و نقاط بحرانی، راهکارهایی برای بهبود پایداری و کاهش آثار منفی ارائه دهد.

۲- روش تحقیق

در این پژوهش، چرخه حیات تخریب فتوکاتالیستی رنگ RhB با استفاده از فتوکاتالیست $g-C_3N_4$ مطابق استانداردهای ISO 14040 و ISO 14044 مورد ارزیابی قرار گرفت. ارزیابی انجام شده در قالب چهار گام اصلی طراحی شد که شامل تعریف هدف و دامنه^۱، جمع‌آوری داده‌ها^۲، ارزیابی چرخه حیات^۳ فرایند سنتز و تصفیه، و تحلیل و تفسیر نتایج^۴ است. در ادامه، هر یک از این گام‌ها به تفصیل بررسی خواهد شد.

¹ Goal and Scope

² Life Cycle Inventory (LCI)

³ Life Cycle Impact Assessment (LCIA)

⁴ Interpretation

نسبی (C/Co) RhB با استفاده از طیف‌سنج UV-Vis مدل DR 6000 (شرکت Hach) در طول موج ۵۵۳ نانومتر اندازه‌گیری گردید. با توجه به اینکه نتایج آزمایشگاهی نشان داد کارایی فوتوکاتالیستی فوتوکاتالیست $g-C_3N_4$ در حذف رنگ RhB به ۹۹/۵ درصد در مدت ۹۰ دقیقه تحت تابش نور مرئی می‌رسد [21]. بازده بالای فوتوکاتالیست حاصل، انگیزه بررسی پایداری محیط‌زیستی و ترکیب کارایی فنی با ارزیابی چرخه حیات را فراهم ساخت. از این‌رو، در مطالعه حاضر، کلیه داده‌های ورودی و خروجی به صورت کمی و دقیق از تحقیق پیشین گردآوری و مبنای تحلیل LCI قرار گرفت.

به منظور استانداردسازی، تمامی ورودی‌ها و خروجی‌ها بر مبنای تخریب ۵۰ میلی گرم از رنگ RhB در یک لیتر محلول آبی نرمال‌سازی شدند (جدول ۱). در این پژوهش، پایگاه داده Ecoinvent به عنوان منبع اصلی داده‌های LCI برای تمامی مواد اولیه و حامل‌های انرژی به کار گرفته شد. در فرایندهای آزمایشگاهی، برق به عنوان منبع غالب انرژی مصرفی نقش داشت و عمدتاً در مراحل گرمایش، خشک‌سازی، کلسیناسیون نانوماده و نیز در فرایند تخریب فوتوکاتالیستی رنگ RhB مورد استفاده قرار گرفت. داده‌های مربوط به مصرف برق نیز بر اساس الگوی ترکیب تولید برق در ایران از پایگاه داده Ecoinvent استخراج و در فهرست موجودی چرخه حیات لحاظ شد.

۲-۳- ارزیابی آثار و پیامدهای چرخه حیات

مرحله ارزیابی آثار چرخه حیات (LCIA)، بخشی از فرایند LCA است که در آن با استفاده از مجموعه‌ای از روش‌ها، داده‌های حاصل از LCI به شاخص‌های کمی آثار محیط‌زیستی تبدیل می‌شوند. در این مرحله، ورودی‌ها و خروجی‌های مرتبط با مصرف منابع و انتشار آلاینده‌ها در قالب دسته‌های اثرگذاری^۱ مانند گرمایش جهانی، مصرف آب، سمیت انسانی، و تقاضای تجمعی انرژی ارزیابی می‌شوند تا شدت و نوع آثار محیط‌زیستی سیستم مورد مطالعه مشخص شود [22]. در این مطالعه، برای ارزیابی آثار محیط‌زیستی از نرم‌افزار SimaPro 10.2 و روش استاندارد ReCiPe استفاده شد. این روش با تلفیق رویکردهای علمی و سیاست‌محور، امکان ارزیابی جامع ۲۵ شاخص بین‌المللی اثرگذاری در دو سطح میانی (Midpoint) و نهایی

جدول ۱. فهرست موجودی چرخه حیات تخریب ۵۰ میلی گرم رنگ RhB از ۱

لیتر محلول آبی با استفاده از فوتوکاتالیست $g-C_3N_4$

Table 1. Life Cycle Inventory (LCI) for the degradation of 50 mg of RhB dye from 1 liter of aqueous solution using the $g-C_3N_4$ photocatalyst

Stage	Life Cycle Inventory		
	Unit	Amount	Material
Photocatalyst synthesis	g	10	Melamine
	mL	450	Nitrogen
	kWh	6	Electricity
Photocatalyst application	g	0.3	$g-C_3N_4$
	kWh	1.65	Electricity

بر این اساس، داده‌های فرآیندی مورد نیاز برای ارزیابی پیامدهای چرخه حیات در دو فاز سنتز فوتوکاتالیست $g-C_3N_4$ و کاربرد آن در تجزیه رنگ رودامین بی (RhB) از نتایج آزمایش‌های انجام‌شده در مقیاس آزمایشگاهی استخراج شد. نویسنده در پژوهش پیشین خود، با به کارگیری روش کنترل جریان گازی، موفق به سنتز مهندسی‌شده، تک‌مرحله‌ای و پایدار نانوصفحات $g-C_3N_4$ بدون نیاز به افزودنی شد. بدین منظور، ابتدا برای سنتز $g-C_3N_4$ مقدار ۱۰ گرم ملامین در یک قایق آلومینایی با ابعاد $10 \times 2 \times 2$ سانتی متر قرار داده شد. سپس قایق در داخل یک کوره لوله‌ای (Tubular Furnace) با نرخ گرمایش ۵ درجه سلسیوس در دقیقه تا دمای ۵۵۰ درجه سلسیوس حرارت داده شد و به مدت ۳ ساعت در این دما نگه داشته شد. پس از آن، نمونه به صورت طبیعی تا دمای محیط خنک شد. در فرایند گرمایش، گاز نیتروژن به عنوان اتمسفر واکنش پلیمریزاسیون با دبی جریان ۲/۵ میلی لیتر بر دقیقه مورد استفاده قرار گرفت. در گام بعدی برای ارزیابی کارایی فوتوکاتالیستی $g-C_3N_4$ سنتز شده، مقدار معینی از فوتوکاتالیست انتخابی با غلظت ۰/۳ گرم بر لیتر در ۵۰ میلی لیتر محلول آبی حاوی ۵۰ میلی گرم بر لیتر RhB در دمای محیط پراکنده شد. به منظور دستیابی به تعادل جذب و واجذب، محلول به مدت ۳۰ دقیقه در تاریکی هم‌زده شد. سپس، نمونه در فاصله حدود ۶ سانتی متری از منبع نور قرار گرفت. لامپ LED با توان ۵۰ وات (مدل Ario 1i، ساخت Golonor، ایران) که فاقد تابش فرابنفش (طول موج انتشار < 400 نانومتر) است، به عنوان منبع نور مورد استفاده قرار گرفت. به منظور تعیین تغییرات غلظت رنگ، نمونه برداری در بازه‌های زمانی ۳۰ دقیقه انجام شد و مقدار غلظت

¹ Impact Categories

سمیت بوم‌سازگان دریایی (Marine Ecotoxicity) به بالای ۹۹/۶ درصد نیز می‌رسد. این غلبه قاطع نشانگر آن است که فارغ از نوع پیامد محیط‌زیستی مورد مطالعه، ردپای محیط‌زیستی فرآیند سنتز، عملاً بازتاب‌دهنده پروفایل محیط‌زیستی تولید برق در سبد انرژی منطقه مورد مطالعه (ایران) است. این نتایج تأیید می‌کند که هرگونه استراتژی برای کاهش آثار محیط‌زیستی $g-C_3N_4$ باید در وهله اول بر بهینه‌سازی یا جایگزینی منبع انرژی متمرکز باشد.

بیشترین سهم‌گذاری برق در دسته‌بندی‌های مرتبط با مصرف منابع و آلودگی‌های آبی مشهود است. Water Use و Freshwater/Marine Ecotoxicity هر دو سهمی نزدیک به ۱۰۰ درصد را به برق نسبت می‌دهند. علت اصلی این تأثیر بالا، وابستگی شدید نیروگاه‌های حرارتی (که بخش عمده‌ای از تولید برق در سبد انرژی فسیلی را تشکیل می‌دهند) به منابع آبی برای خنک‌سازی است که منجر به مصرف عظیم آب شیرین می‌شود. علاوه بر این، انتشار پساب‌ها و آلاینده‌های حرارتی و شیمیایی از نیروگاه‌ها، عامل اصلی در بروز سمیت آبی (Ecotoxicity) است. از سوی دیگر، آثار مرتبط با تغییرات اقلیمی، مانند Global Warming (با سهمی نزدیک به ۹۸/۳ درصد)، مستقیماً از انتشار گازهای گلخانه‌ای (CH_4 ، CO_2 ، و غیره) ناشی از سوزاندن سوخت‌های فسیلی (نفت، گاز، زغال سنگ) در همین نیروگاه‌ها سرچشمه می‌گیرد و علت آن را می‌توان به ماهیت کربن‌محور (Carbon-intensive) سبد انرژی منطقه نسبت داد.

در مقابل تسلط انرژی، سهم مواد اولیه مورد استفاده در سنتز، یعنی ملامین و نیتروژن، بسیار ناچیز است. ملامین، به عنوان پیش‌ماده، حداکثر سهم خود را در دسته‌بندی اسیدی شدن خاک (Terrestrial Acidification) (با ۴/۱ درصد) و تشکیل ذرات ریز معلق (Fine Particulate Matter Formation) (با ۳/۹ درصد) نشان می‌دهد، که علت آن می‌تواند به انتشار ترکیبات اسیدی‌ساز (مانند SO_x و NO_x) و ذرات معلق در فرآیند تولید خود ملامین بازگردد. اما این سهم‌ها در برابر سهم غالب برق (بیش از ۹۵ درصد) کاملاً ثانویه محسوب می‌شوند. این اختلاف فاحش، یک مسیر بهینه‌سازی مشخص را نشان می‌دهد: در حالیکه تلاش برای جایگزینی ملامین یا تغییر در روش تولید آن می‌تواند نتایج جزئی داشته باشد، بزرگترین و مؤثرترین کاهش در ردپای محیط‌زیستی تنها از طریق سه اقدام حاصل می‌شود:

(Endpoint) را فراهم می‌سازد. در سطح میانی، نتایج به صورت شاخص‌های اثرگذاری علمی و کمی مانند گرمایش جهانی، اسیدی شدن، سمیت انسانی و مصرف آب بیان شدند که بیانگر ارتباط مستقیم میان فرآیندهای انتشار و پدیده‌های محیط‌زیستی هستند. در سطح نهایی، این آثار به پیامدهای کلی‌تر و تصمیم‌محور در سه حوزه اصلی شامل سلامت انسان، کیفیت اکوسیستم و منابع طبیعی تجمیع شدند تا آثار نهایی فعالیت‌ها بر محیط‌زیست و رفاه انسانی به صورت تلفیقی و قابل تفسیر ارائه شود [23].

۴-۲- تحلیل و تفسیر

مرحله تفسیر، آخرین گام در فرایند LCA است که هدف آن تحلیل، یکپارچه‌سازی و تبیین نتایج به‌دست‌آمده از مراحل LCI و LCIA به منظور دستیابی به نتیجه‌گیری‌های معتبر، شناسایی نقاط بحرانی، و ارائه پیشنهادها بهبود است. در این مرحله، تمامی داده‌ها و فرضیات مورد بازبینی قرار گرفته و منابع اصلی آثار محیط‌زیستی، حساسیت نتایج نسبت به متغیرهای کلیدی، و میزان عدم قطعیت تحلیل می‌شوند تا اطمینان حاصل شود که نتایج نهایی با اهداف و محدوده تعریف شده مطالعه سازگار است. این مرحله، ماهیتی تفسیری و تصمیم‌محور دارد و نقش آن ارائه درک علمی و جامع از پیامدهای محیط‌زیستی سیستم مورد بررسی و پشتیبانی از تصمیم‌گیری‌های مدیریتی و محیط‌زیستی بر مبنای شواهد کمی و شفاف است [24].

۳- نتایج و بحث

۳-۱- ارزیابی پیامدهای سنتز فتوکاتالیست $g-C_3N_4$ در سطح میانی

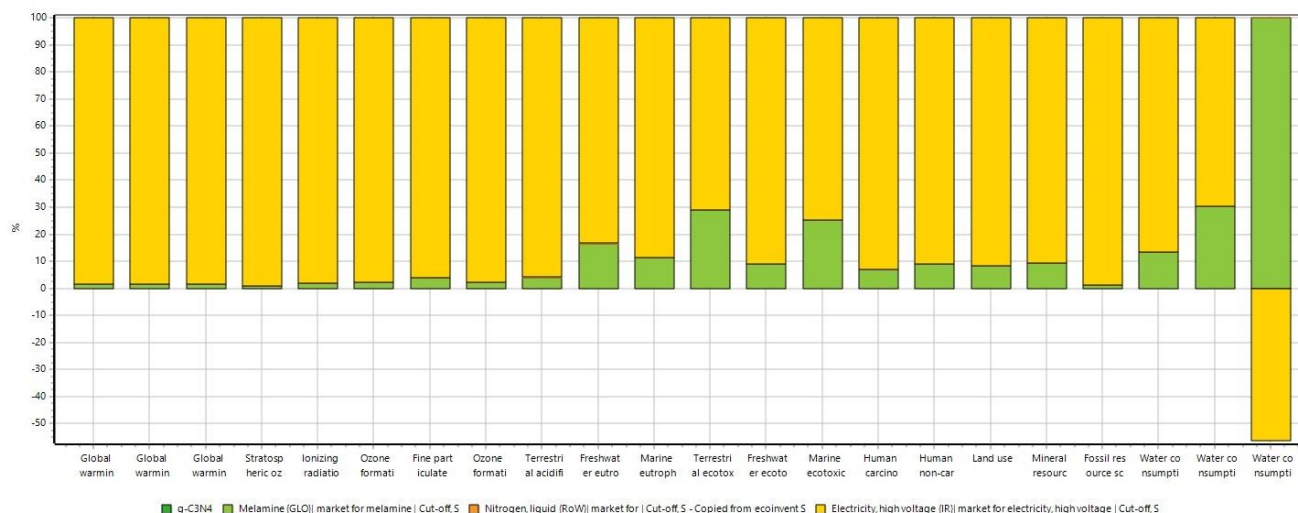
نتایج حاصل از ارزیابی آثار سنتز فتوکاتالیست $g-C_3N_4$ در سطح میانی برای ۲۲ پیامد محیط‌زیستی در جدول (۲) و شکل (۱) ارائه شده است. این نتایج به وضوح نشان می‌دهد که مصرف انرژی الکتریکی، به عنوان یکی از ورودی‌های اصلی، نقطه بحرانی^۱ محیط‌زیستی غالب در کل چرخه حیات این نانوماده است. سهم این ورودی در تمام ۲۲ دسته‌بندی پیامدهای محیط‌زیستی، از گرمایش جهانی (Global Warming) تا کاهش منابع فسیلی (Fossil Scarcity)، همواره بالاتر از ۹۵/۸ درصد است، که در برخی دسته‌بندی‌ها مانند مصرف آب (Water Use) و

¹ Hotspot

جدول ۲. نتایج ارزیابی پیامدهای محیط‌زیستی ستر فتوکاتالیست $g-C_3N_4$ در سطح میانی

Table 2. Midpoint-level environmental impact assessment results for the synthesis of the $g-C_3N_4$ photocatalyst

Impact category	Unit	Total	Melamine	Nitrogen	Electricity
Global warming, Human health	%	100	1.6775	0.0054	98.3171
Global warming, Terrestrial ecosystems	%	100	1.6777	0.0054	98.3169
Global warming, Freshwater ecosystems	%	100	1.6774	0.0054	98.3172
Stratospheric ozone depletion	%	100	0.7518	0.0060	99.2422
Ionizing radiation	%	100	1.8654	0.0317	98.1028
Ozone formation, Human health	%	100	2.3998	0.0093	97.5909
Fine particulate matter formation	%	100	3.9092	0.0214	96.0694
Ozone formation, Terrestrial ecosystems	%	100	2.2792	0.0085	97.7123
Terrestrial acidification	%	100	4.1005	0.0114	95.8881
Freshwater eutrophication	%	100	16.6070	0.0926	83.3004
Marine eutrophication	%	100	11.5006	0.0049	88.4945
Terrestrial ecotoxicity	%	100	29.0338	0.0013	70.9649
Freshwater ecotoxicity	%	100	9.0845	0.0066	90.9090
Marine ecotoxicity	%	100	25.3304	0.0013	74.6683
Human carcinogenic toxicity	%	100	6.9639	0.0463	92.9898
Human non-carcinogenic toxicity	%	100	8.9977	0.0358	90.9665
Land use	%	100	8.2231	0.0252	91.7517
Mineral resource scarcity	%	100	9.2655	0.0052	90.7293
Fossil resource scarcity	%	100	1.0894	0.0018	98.9087
Water consumption, Human health	%	100	13.2540	0.0332	86.7127
Water consumption, Terrestrial ecosystem	%	100	30.2949	0.0776	69.6276
Water consumption, Aquatic ecosystems	%	100	228.4466	0.2496	-128.6962



شکل ۱. نتایج ارزیابی آثار ستر فتوکاتالیست $g-C_3N_4$ در سطح میانی

Fig. 1. Midpoint-level impact assessment results for the synthesis of $g-C_3N_4$ photocatalyst

۲- جایگزینی منبع انرژی از شبکه فسیلی با منابع انرژی تجدیدپذیر پاک (مانند خورشیدی یا بادی).

۱- بهینه‌سازی فرآیند ستر برای کاهش چشمگیر تقاضای حرارتی و در نتیجه مصرف برق خاص (Specific Energy Consumption).

زیستی سبد انرژی منطقه هستند. در نتیجه، ردپای محیط زیستی $g-C_3N_4$ نه توسط سینتیک شیمیایی ملامین، بلکه توسط زیرساخت تأمین انرژی تعریف می‌شود. این یافته، نقطه داغ اصلی فرآیند را به صورت قطعی در مرحله تأمین انرژی قرار می‌دهد و هرگونه تغییر در مواد اولیه، در مقایسه، تأثیری ثانویه و ناچیز (کمتر از ۳ درصد) خواهد داشت.

با مقایسه آسیب‌های نهایی، حوزه Resources با سهمی نزدیک به ۱۰۰ درصد، به‌عنوان بحرانی‌ترین محور آسیب شناسایی می‌شود. این آسیب عمدتاً از دسته‌بندی‌های سطح میانی مرتبط با کمیابی سوخت‌های فسیلی (Fossil Scarcity) و کانی‌ها (Mineral Scarcity) نشأت می‌گیرد. علت اصلی فنی این امر، اتکای شبکه برق منطقه به منابع تجدیدنپذیر است، که مصرف آن‌ها یک تخریب ترمودینامیکی جبران‌ناپذیر را در مقیاس جهانی اعمال می‌کند و این بیشترین وزندهی را در سطح نهایی دریافت کرده است.

۳- انتخاب مکان تولید در مناطقی با شبکه برق پاک‌تر (انرژی آبی یا هسته‌ای).

این نتایج تأکید می‌کند که پایداری نانوماده $g-C_3N_4$ به صورت جدایی‌ناپذیری با پایداری تأمین انرژی آن مرتبط است.

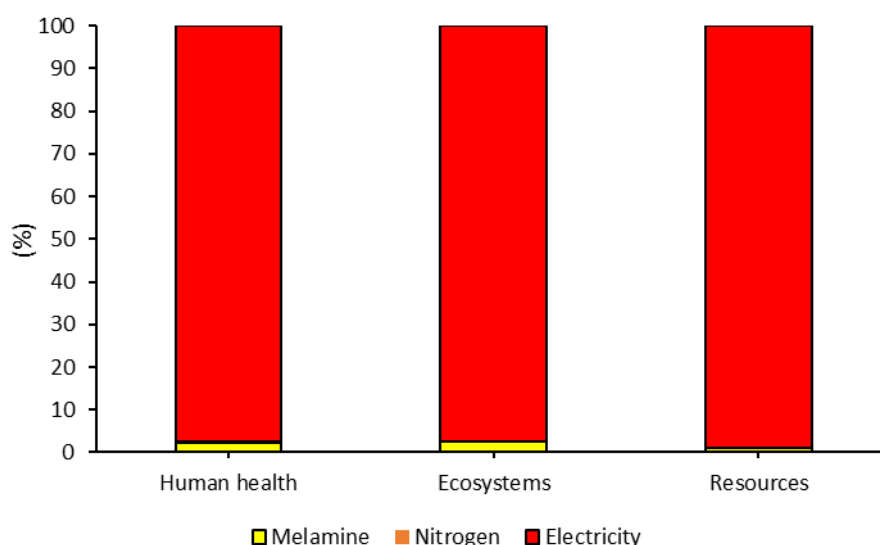
۲-۳- ارزیابی آثار سنتز فتوکاتالیست $g-C_3N_4$ در سطح نهایی

نتایج حاصل از ارزیابی آثار سنتز فتوکاتالیست $g-C_3N_4$ در سطح نهایی در ۳ حوزه اصلی شامل سلامت انسان، کیفیت اکوسیستم و منابع طبیعی در جدول (۳) و شکل (۲) ارائه شده است. نتایج تحلیل سطح نهایی، که اوج ارزیابی آثار محیط زیستی است، به صورت قاطع نشان می‌دهد که انرژی الکتریکی نیروی محرکه اصلی در تمام حوزه‌های آسیب نهایی است. سهم این ورودی در آسیب به منابع (Resources) به ۹۹/۷۹ درصد می‌رسد و در حوزه‌های سلامت انسان (Human Health) و بوم‌سازگان‌ها (Ecosystems) نیز سهمی در حدود ۹۷/۵ درصد دارد. این اعداد فراتر از یک سهم‌گذاری بالا هستند؛ آن‌ها نشان‌دهنده یک رابطه هم‌بستگی تقریباً مطلق میان فرآیند سنتز نانوماده و پروفایل محیط

جدول ۳. نتایج ارزیابی آثار سنتز فتوکاتالیست $g-C_3N_4$ در سطح نهایی

Table 3. Endpoint-level impact assessment results for the synthesis of the $g-C_3N_4$ photocatalyst

Damage category	Unit	Total	Melamine	Nitrogen	Electricity
Human health	%	100	2.3952249	0.010133	97.59464
Ecosystems	%	100	2.553358	0.006812	97.43983
Resources	%	100	1.0973212	0.001833	98.90085



شکل ۲. نتایج ارزیابی آثار سنتز فتوکاتالیست $g-C_3N_4$ در سطح نهایی

Fig. 2. Endpoint-level impact assessment results for the synthesis of $g-C_3N_4$ photocatalyst

دیگر، هزینه محیط زیستی تولید کاتالیست بر هزینه محیط زیستی کارکرد کاتالیست در مقیاس تخریب ۵۰ میلی گرم رنگ RhB از ۱ لیتر محلول آبی، غلبه کرده است. به عبارتی، بار محیط زیستی شدید فاز تولید کاتالیست به فاز استفاده منتقل شده است. تحلیل دقیق تر سهم گذاری در دسته بندی های کلیدی Midpoint، تأثیر شدید بار منتقل شده از فرآیند سنتز را به شرح ذیل اثبات می نماید:

۱- گرمایش جهانی (Global Warming): سهم $g-C_3N_4$ در هر سه زیردسته گرمایش جهانی (Human Health, Terrestrial, Freshwater) تقریباً ۷۸ درصد است. این سهم عظیم، پیامد مستقیم آن است که فرآیند سنتز نانوماده $g-C_3N_4$ (در بخش قبلی) خود یک فرآیند کربن-فشرده بود (نزدیک به ۹۸ درصد سهم کربن از برق داشت). اکنون این ردپای کربن در کاتالیست «بسته بندی» شده و به سیستم تصفیه تحمیل شده است.

۲- ذرات معلق و اسیدی شدن (Particulate Matter Formation & Acidification): سهم $g-C_3N_4$ در این دسته بندی ها (مانند Terrestrial Acidification با ۷۸/۴۱ درصد و Fine Particulate Matter Formation با ۷۸/۳۸ درصد) نیز غالب است. این آثار، ریشه در انتشار آلاینده های منطقه ای (مانند NO_x و SO_x) دارند که از سوزاندن سوخت های فسیلی در نیروگاه های تأمین کننده انرژی سنتز کاتالیست، نشأت گرفته اند.

۳- مصرف آب و سمیت محیطی (Water Use & Ecotoxicity): اگرچه فرآیند تصفیه، مصرف آب زیادی ندارد، اما سهم $g-C_3N_4$ در دسته بندی هایی مانند Marine Ecotoxicity به ۷۸/۴۱ درصد می رسد. این نشان دهنده آن است که آلودگی های شیمیایی و پساب های مرتبط با فرآیند ساخت نانوماده، حتی پس از تبدیل به محصول نهایی، بار محیط زیستی خود را در فاز کاربرد نیز حفظ کرده اند.

این یافته ها یک الزام مهندسی محیط زیست را مشخص می کنند: پایداری نهایی این فرآیند فتوکاتالیستی به طور معکوس با طول عمر چرخه استفاده (Catalyst Lifespan) و قابلیت بازیابی (Recoverability) کاتالیست در ارتباط است. از آنجا که ۷۷ درصد بار محیط زیستی در هزینه ساخت کاتالیست نهفته است، مؤثرترین استراتژی کاهش آسیب صرفاً کاهش مصرف برق تصفیه (کاهش ۲۲ درصد) نیست. بلکه، حیاتی است که طول عمر چرخه استفاده

در رده های بعدی، آسیب به سلامت انسان (۹۷/۵۹ درصد) و بوم سازگان ها (۹۷/۴۴ درصد) قرار دارد که هر دو با مکانیسم های پویای انتشار آلاینده مرتبط هستند. آسیب به سلامت انسان عمدتاً از طریق تجمع آثار تشکیل ذرات معلق ریز (PM Formation) و سمیت انسانی (Human Toxicity) ناشی از انتشار آلاینده های نیروگاه های حرارتی اعمال می شود. در حوزه بوم سازگان ها نیز، آثار سطح میانی مرتبط با سمیت آبی (Ecotoxicity) و اسیدی شدن (Acidification) ناشی از آلودگی های شیمیایی، مسئول این آسیب هستند. این نشان می دهد که در سبد انرژی منطقه، آلاینده های منتشر شده، نه تنها منابع را تحلیل می برند، بلکه پیامدهای منطقه ای قابل توجهی بر کیفیت هوا و آب نیز دارند.

سهم مواد اولیه (ملازمین و نیتروژن) با حداکثر ۲/۵۵ درصد در حوزه بوم سازگان ها، بسیار ناچیز است. این میزان ناچیز نشان می دهد که تأثیر بار موجود در ساختار مولکولی نانوماده در مقایسه با بار محیط زیستی فرآیند تولید آن، قابل اغماض است.

۳-۳- ارزیابی آثار تخریب ۵۰ میلی گرم رنگ RhB از ۱ لیتر محلول آبی با استفاده از فتوکاتالیست $g-C_3N_4$ در سطح میانی

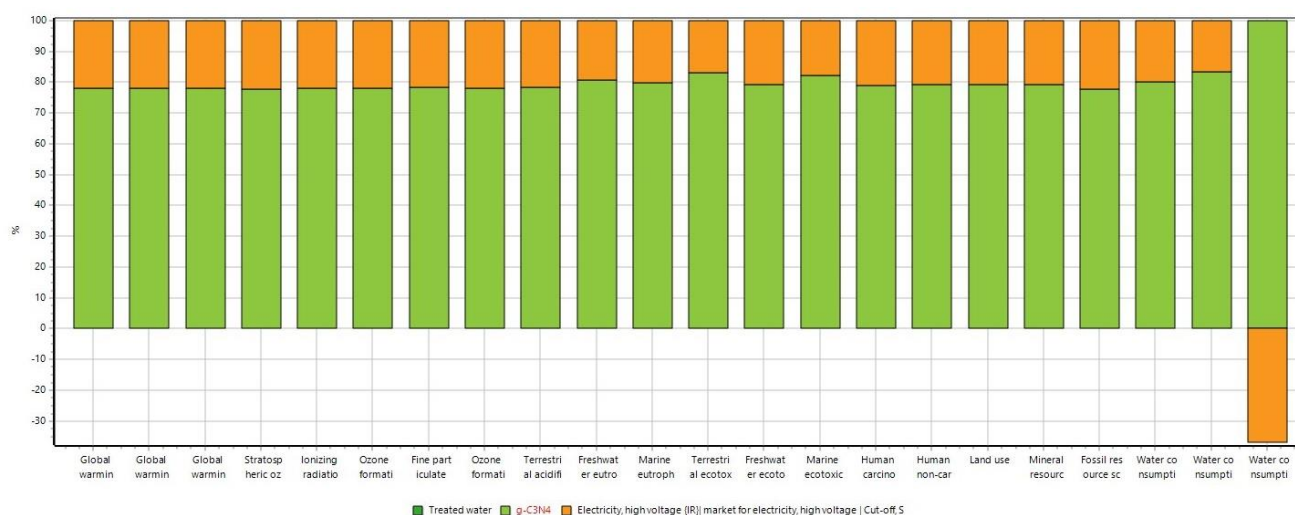
نتایج حاصل از ارزیابی آثار تخریب ۵۰ میلی گرم رنگ RhB از ۱ لیتر محلول آبی با استفاده از فتوکاتالیست $g-C_3N_4$ در سطح میانی برای ۲۲ پیامد محیط زیستی در جدول (۴) و شکل (۳) ارایه شده است. نتایج تحلیل Midpoint، یک الگوی جدید از نقطه داغ (Hotspot) محیط زیستی را در فاز کاربرد (تخریب آلاینده) نشان می دهد که به طور قاطع با فاز سنتز (ساخت نانوماده) متفاوت است. در این مرحله، بار محیط زیستی به شدت توسط نانوماده $g-C_3N_4$ غالب می شود، در حالی که سهم انرژی الکتریکی که فرآیند فتوکاتالیستی را هدایت می کند، نقش ثانویه پیدا می کند. سهم $g-C_3N_4$ در تقریباً تمام دسته بندی آثار (مانند Global Warming، Stratospheric Ozone Depletion و Ionizing Radiation) به طور متوسط بیش از ۷۷٪ است. در مقابل، سهم انرژی الکتریکی در تمام این دسته بندی ها به کمتر از ۲۳٪ کاهش یافته است. علت این تغییر بزرگ در تخصیص بار، این است که فرآیند تخریب فتوکاتالیستی، اگرچه نیاز به یک منبع نور دارد، اما در مقایسه با تولید پرانرژی خود نانوماده $g-C_3N_4$ (که قبلاً ثابت شد بیش از ۹۵ درصد بار آن از برق ناشی می شود)، مصرف انرژی نسبتاً کمتری دارد. به عبارت

و قابلیت بازیابی کاتالیست به حداکثر برسد. هرچه کاتالیست بتواند زیستی ۷۷ درصدی آن بر یک واحد حجم تصفیه شده، توزیع و تعداد چرخه‌ها یا حجم پساب بیشتری را تصفیه کند، بار محیط ترقیق می‌شود و تأثیر نسبی $g-C_3N_4$ کاهش می‌یابد.

جدول ۴. نتایج ارزیابی آثار تخریب ۵۰ میلی گرم رنگ RhB از ۱ لیتر محلول آبی با استفاده از فتوکاتالیست $g-C_3N_4$ در سطح میانی

Table 4. Midpoint-level impact assessment results for the degradation of 50 mg of RhB dye from 1 liter of aqueous solution using the $g-C_3N_4$ photocatalyst

Impact category	Unit	Total	$g-C_3N_4$	Electricity
Global warming, Human health	%	100	77.99	22.01
Global warming, Terrestrial ecosystems	%	100	77.99	22.01
Global warming, Freshwater ecosystems	%	100	77.99	22.01
Stratospheric ozone depletion	%	100	77.83	22.17
Ionizing radiation	%	100	78.03	21.97
Ozone formation, Human health	%	100	78.12	21.88
Fine particulate matter formation	%	100	78.39	21.61
Ozone formation, Terrestrial ecosystems	%	100	78.10	21.90
Terrestrial acidification	%	100	78.42	21.58
Freshwater eutrophication	%	100	80.71	19.29
Marine eutrophication	%	100	79.75	20.25
Terrestrial ecotoxicity	%	100	83.08	16.92
Freshwater ecotoxicity	%	100	79.31	20.69
Marine ecotoxicity	%	100	82.35	17.65
Human carcinogenic toxicity	%	100	78.93	21.07
Human non-carcinogenic toxicity	%	100	79.30	20.70
Land use	%	100	79.16	20.84
Mineral resource scarcity	%	100	79.34	20.66
Fossil resource scarcity	%	100	77.89	22.11
Water consumption, Human health	%	100	80.07	19.93
Water consumption, Terrestrial ecosystem	%	100	83.35	16.65
Water consumption, Aquatic ecosystems	%	100	158.57	-58.57



شکل ۳. نتایج ارزیابی آثار تخریب ۵۰ میلی گرم رنگ RhB از ۱ لیتر محلول آبی با استفاده از فتوکاتالیست $g-C_3N_4$ در سطح میانی

Fig. 3. Midpoint-level impact assessment results for the degradation of 50 mg of RhB dye from 1 L of aqueous solution using the $g-C_3N_4$ photocatalyst

۷۸/۱۴۶ درصدی در میان حوزه‌های سه گانه، نشان‌دهنده انتقال حداکثری بارهای آلاینده و سمی از فاز تولید به ساختار کاتالیست است. از نظر علی، سهم ۷۸/۱۴۶ درصدی $g-C_3N_4$ در آسیب به بوم‌سازگان‌ها از تجمیع آثار Midpoint مرتبط با آلودگی‌های شیمیایی و فیزیکی، به‌ویژه سمیت آب‌های شیرین و شور (Ecotoxicity) و اسیدی شدن (Acidification) ناشی می‌شود. این بارها در طول فرآیند سنتز پرانرژی کاتالیست (که از یک شبکه برق آلاینده استفاده می‌کند) ایجاد شده‌اند. آلاینده‌هایی که منجر به باران اسیدی یا ورود مواد شیمیایی به آب‌ها می‌شوند، اکنون در ساختار نانوماده تثبیت شده و در فاز کاربرد، تأثیر مخرب محیطی خود را بر سلامت گونه‌های آبی، خاکی و پوشش گیاهی اعمال می‌کنند. این امر مؤید آن است که آلودگی‌های نهفته در تولید کاتالیست، اصلی‌ترین چالش پایداری زیست‌بوم در فرآیند تصفیه هستند.

۳-۴- ارزیابی آثار تخریب ۵۰ میلی‌گرم رنگ RhB از ۱ لیتر محلول آبی با استفاده از فتوکاتالیست $g-C_3N_4$ در سطح نهایی

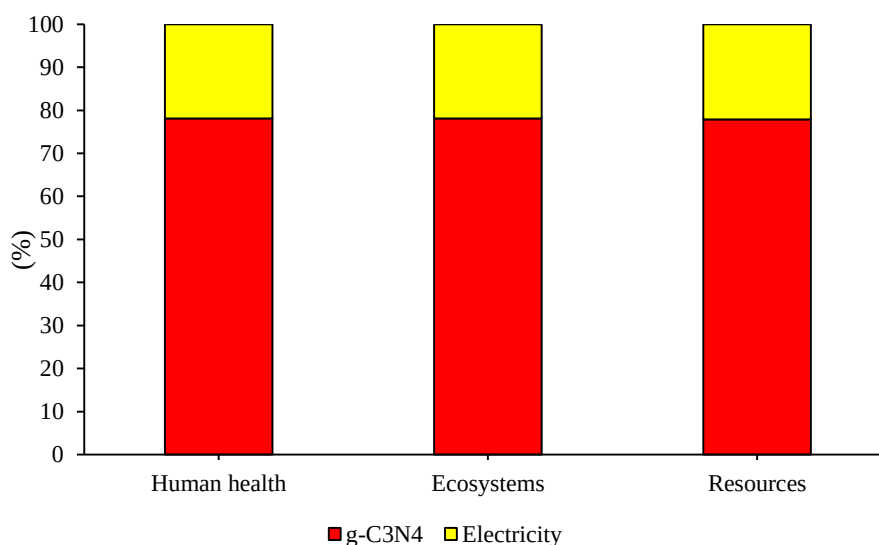
نتایج حاصل از ارزیابی آثار تخریب ۵۰ میلی‌گرم رنگ RhB از ۱ لیتر محلول آبی با استفاده از فتوکاتالیست $g-C_3N_4$ در سطح نهایی در ۳ حوزه اصلی شامل سلامت انسان، کیفیت اکوسیستم و منابع طبیعی در جدول (۵) و شکل (۴) ارایه شده است. تحلیل ارزیابی آسیب (Damage Assessment) برای این فرایند، یک بیش ساختاری راجع به توازن بار محیط زیستی فرآیند ارائه می‌دهد. این تحلیل به صورت قاطع نشان می‌دهد که کانون بار محیط زیستی در فاز کاربرد، به هزینه تولید کاتالیست منتقل شده است. به طوریکه در فاز کاربرد نانوماده، بیش از ۷۷ درصد از بار محیط زیستی در هر سه حوزه آسیب نهایی به‌طور قاطع توسط نانوماده $g-C_3N_4$ به شرح ذیل اعمال می‌گردد:

الف) آسیب به بوم‌سازگان‌ها (Ecosystems): این سهم بیشینه

جدول ۵. نتایج ارزیابی آثار تخریب ۵۰ میلی‌گرم رنگ RhB از ۱ لیتر محلول آبی با استفاده از فتوکاتالیست $g-C_3N_4$ در سطح نهایی

Table 5. Endpoint-level impact assessment results for the degradation of 50 mg of RhB dye from 1 liter of aqueous solution using the $g-C_3N_4$ photocatalyst

Damage category	Unit	Total	$g-C_3N_4$	Electricity
Human health	%	100	78.11	21.88
Ecosystems	%	100	78.14	21.85
Resources	%	100	77.89	22.10



شکل ۴. نتایج ارزیابی آثار تخریب ۵۰ میلی‌گرم رنگ RhB از ۱ لیتر محلول آبی با استفاده از فتوکاتالیست $g-C_3N_4$ در سطح نهایی

Fig. 4. Endpoint-level impact assessment results for the degradation of 50 mg of RhB dye from 1 L of aqueous solution using the $g-C_3N_4$ photocatalyst

طولانی مدت فراهم شده و هزینه ساخت به ازای هر واحد آب تصفیه‌شده، به حداقل برسد.

۲- لزوم سینتیک سبز و کربن‌زدایی ساختاری: برای ارتقاء این فناوری به یک راه‌حل واقعاً پایدار، لازم است که تحقیقات به سمت توسعه روش‌های سنتز با شدت کربن صفر (Zero-Carbon Intensity Synthesis) هدایت شود. این رویکرد، که می‌تواند شامل استفاده مستقیم از انرژی‌های تجدیدپذیر (مانند انرژی خورشیدی) در سینتیک تولید $g-C_3N_4$ باشد، وابستگی ساختاری فرآیند به منابع انرژی آلاینده (که منشأ بار ۷۸ درصدی هستند) را به‌طور کامل حذف خواهد کرد. این تحول، کارآمدی محیط‌زیستی ذاتی (Intrinsic Environmental Efficiency) کاتالیست را افزایش داده و آسیب‌های نهفته را در منبع اصلی خود خنثی خواهد نمود.

۳-۵- آنالیز حساسیت

$g-C_3N_4$ به عنوان یک فتوکاتالیست نسل جدید بدون فلز و فعال در ناحیه نور مرئی، به دلیل ترکیب منحصر به فردی از ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خود از جمله پایداری حرارتی و شیمیایی بالا، باند گپ مناسب ($\sim 2.7 \text{ eV}$)، سنتز مقرون به صرفه و مقیاس‌پذیر و سازگاری محیط‌زیستی، به عنوان یک راهکار حیاتی در فناوری‌های تصفیه آب و فاضلاب شناخته می‌شود. با این حال، تولید این فتوکاتالیست عمدتاً در مقیاس آزمایشگاهی (Laboratory Scale) محصور مانده است، وضعیتی که پتانسیل کاربرد گسترده آن‌ها را محدود می‌کند [25-27]. در این راستا، ارتقاء تولید این مواد به مقیاس صنعتی (Industrial Scale) یک ضرورت تلقی می‌شود. با این وجود، انتقال از محیط کنترل شده آزمایشگاه به یک فرآیند صنعتی، اغلب باعث واگرایی قابل توجهی در پروفایل چرخه حیات می‌شود که این تفاوت ناشی از تغییر در ماهیت جریان‌های انرژی، زنجیره تأمین مواد اولیه و الزامات زیرساختی است [28-30]. از این رو، تحلیل حساسیت می‌تواند در ارزیابی عدم قطعیت در آثار محیط زیستی برای افزایش مقیاس تولید (Scale-up) اهمیت داشته باشد. علاوه بر این، درک فرآیندهای اصلی سهم‌گذار در تولید مقیاس صنعتی می‌تواند تعداد آثار محیط زیستی نامعلوم را کاهش دهد [31]. با توجه به آثار محیط زیستی قابل توجه مرحله تأمین برق در فرآیند ساخت فتوکاتالیست $g-C_3N_4$ ، پارامتر کاهش مصرف برق (e95%) [32] در آنالیز حساسیت مورد بررسی قرار گرفت. زیرا

(ب) آسیب به سلامت انسان (Human Health): سهم ۷۸/۱۱۹ درصدی $g-C_3N_4$ در آسیب به سلامت عمومی، از انتقال بار آلودگی‌هایی با پتانسیل تأثیر مستقیم بر بدن انسان نشأت می‌گیرد. این آسیب‌ها ریشه در دسته‌بندی‌های Midpoint تشکیل ذرات معلق ریز (Fine Particulate Matter Formation) و سمیت انسانی (Human Toxicity) دارند. دلیل این سهم غالب آن است که ردپای آلودگی هوای فاز سنتز کاتالیست، که شامل انتشار آلاینده‌هایی چون $PM_{2.5}$ و پیش‌سازهای اسموگ از نیروگاه‌های حرارتی است، در ساختار $g-C_3N_4$ نهفته شده است.

ج) تحلیل آسیب به منابع (Resources): سهم ۷۷/۸۹۰ درصدی $g-C_3N_4$ در آسیب به منابع، نمایانگر انتقال بار مرتبط با استهلاك منابع پایه و تجدیدناپذیر به ساختار کاتالیست است. این سهم عمدتاً از دسته‌بندی‌های Midpoint مرتبط با کمیابی سوخت‌های فسیلی (Fossil Scarcity) نشأت می‌گیرد. توضیح علی این پدیده در این واقعیت نهفته است که فرآیند سنتز $g-C_3N_4$ یک فرآیند انرژی-فشرده است و تأمین این انرژی از شبکه‌ای متکی بر سوخت‌های فسیلی، یک تخریب ترمودینامیکی و غیرقابل بازگشت را در مقیاس منابع پایه سیاره تحمیل کرده است. در نتیجه، اصلی‌ترین هزینه ساخت کاتالیست، نه در مصرف عملیاتی انرژی برای تصفیه، بلکه در مصرف منابع اولیه برای تولید خود کاتالیست نهفته است که به صورت بار ۷۷ درصدی به سیستم تصفیه منتقل شده است.

نتایج به دست آمده در این قسمت نشان می‌دهند که پایداری نهایی این فناوری، وابسته به مدیریت بار ساختاری و غالب (حدود ۷۸ درصد) است که در هزینه تولید کاتالیست نهفته است. بر این اساس، دو جهت‌گیری استراتژیک برای بهبود محیط‌زیستی فرآیند مورد نیاز است:

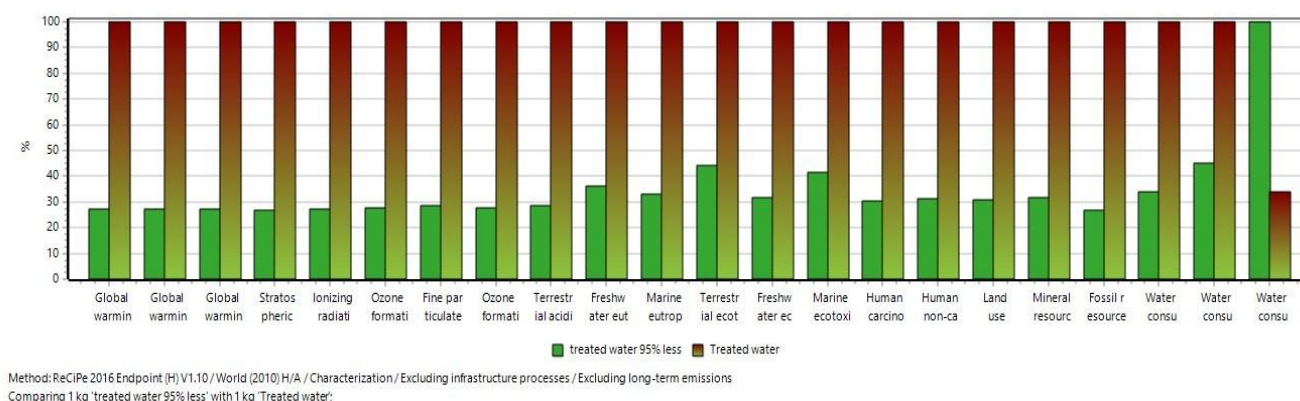
۱- اولویت‌دهی به دوام کاتالیست و قابلیت استفاده مجدد:

پایداری نهایی فرآیند تصفیه به‌طور مستقیم با طول عمر چرخه استفاده (Catalyst Lifespan) و قابلیت بازیابی (Recoverability) نانوماده $g-C_3N_4$ در ارتباط است. از آنجایی که بیش از سه‌چهارم (۷۸٪) بار محیط زیستی در فاز تولید کاتالیست متمرکز شده، ضروری است که این بار بر یک حجم عملیاتی بزرگتر توزیع و رقیق شود. بنابراین، هدف تحقیقات مهندسی باید بر افزایش عدد تناوب استفاده کاتالیست و بهبود پایداری ساختاری آن در برابر تخریب مکانیکی و شیمیایی متمرکز شود تا امکان استفاده مجدد

بار محیط زیستی را به خود اختصاص داده بود، به طور چشمگیری خنثی شده است. به عنوان مثال، در دسته‌بندی‌هایی مانند Global Warming، سهم $g-C_3N_4$ از ۷۸ درصد به کمتر از ۷ تا ۱۰ درصد کاهش یافته است. این امر یک تغییر قاطع در کانون آسیب (Hotspot) سیستم را رقم زده است. انرژی الکتریکی عملیاتی فرآیند تصفیه (تأمین نور)، که در سناریوی پایه تنها ۲۲ درصد سهم داشت، با حذف بار ساختاری کاتالیست، تبدیل به عامل غالب جدید شده و سهم آن در اکثر دسته‌بندی‌ها به بیش از ۹۰ درصد افزایش یافته است. این امر اثبات نمود که هزینه محیط‌زیستی نهفته (Embodied Cost) کاتالیست، مستقیماً تابعی از شدت کربن (Carbon Intensity) برق مصرفی در مرحله تولید آن است. با کاهش ۹۵ درصدی برق آلاینده، وابستگی ساختاری به زیرساخت فسیلی منطقه از بین رفته و تنها بار محیط زیستی مواد اولیه باقی می‌ماند که اکنون در برابر بار عملیاتی، ناچیز محسوب می‌شود.

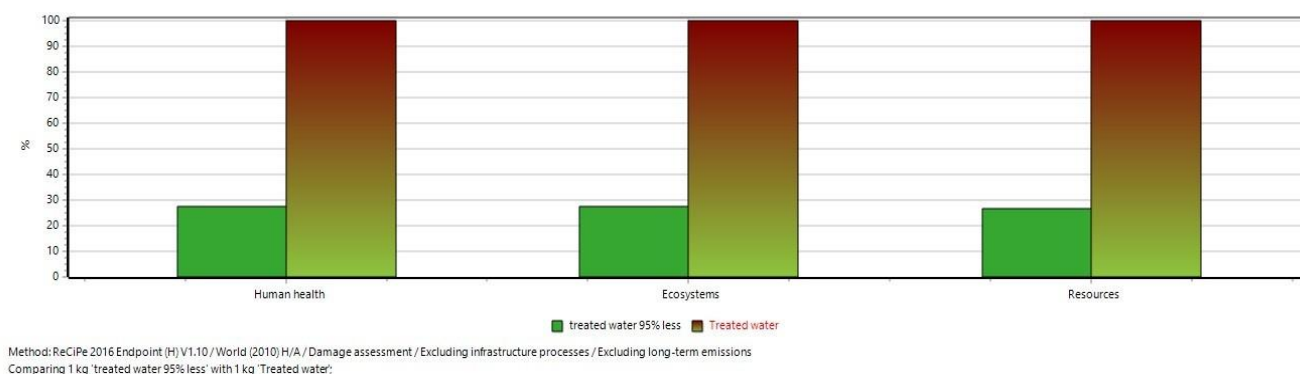
هدف اصلی این سناریو، استفاده از یک ابزار متدولوژیک در چارچوب LCA برای تعیین آستانه‌های بحرانی پایداری و ارزیابی حساسیت ساختاری مطلق فرایند بود. شبیه‌سازی کاهش شدید و تقریباً نزدیک به صفر بار کربن ناشی از مصرف انرژی در سنتز، امکان بررسی این مسئله را فراهم کرد که آیا فتوکاتالیست مورد مطالعه می‌تواند حتی در شرایط ایده‌آل کربن‌زدایی، به برتری محیط زیستی نسبت به گزینه‌های مرجع دست یابد یا خیر.

نتایج حاصل از آنالیز حساسیت، با اعمال سناریوی کاهش ۹۵ درصدی مصرف برق در مرحله سنتز فتوکاتالیست $g-C_3N_4$ در سطح میانی، یک تحول ساختاری و بنیادین را در توزیع بار محیطی فرآیند تصفیه آشکار ساخت. این یافته‌ها به طور مستقیم، فرضیه غلبه هزینه ساختاری کاتالیست را تأیید نمودند. همان‌طور که در شکل (۵) مشخص است، در این سناریوی جایگزین، سهم $g-C_3N_4$ (به عنوان حامل بار تولید) که در سناریوی پایه حدود ۷۸ درصد از



شکل ۵. نتایج آنالیز حساسیت در دو سناریو پایه و کاهش ۹۵ درصدی مصرف برق در مرحله سنتز فتوکاتالیست $g-C_3N_4$ ، در سطح میانی

Fig. 5. Sensitivity analysis results for two scenarios: baseline and 95% reduction in electricity consumption during the synthesis of $g-C_3N_4$ photocatalyst, at the midpoint level



شکل ۶. نتایج آنالیز حساسیت در دو سناریو پایه و کاهش ۹۵ درصدی مصرف برق در مرحله سنتز فتوکاتالیست $g-C_3N_4$ ، در سطح نهایی

Fig. 6. Sensitivity analysis results for two scenarios: baseline and 95% reduction in electricity consumption during the synthesis of $g-C_3N_4$ photocatalyst, at the endpoint level

سناریوی کاهش ۹۵ درصدی برق مصرفی در سنتز اعمال شد. نتایج این تحلیل، فرضیه وابستگی مستقیم آسیب کاتالیست به شدت کربن تولید آن را به صورت قاطع تأیید نمود؛ به طوری که سهم $g-C_3N_4$ در آسیب‌های سطح نهایی بیش از ۹۲ درصد کاهش یافت (به زیر ۶ درصد رسید). این کاهش شدید نشان داد که حذف تقریباً کامل بار آلاینده در تولید کاتالیست، خشی سازی مؤثر هزینه ساختاری آن را در پی خواد داشت. با برداشته شدن بار ساختاری کاتالیست، انرژی الکتریکی عملیاتی تصفیه به کانون آسیب جدید تبدیل شد که این امر، اولویت‌های مهندسی را به طور بنیادین تغییر خواهد داد.

در نهایت، این پژوهش نتیجه‌گیری کرد که دستیابی به یک راهکار فتوکاتالیستی پایدار، مستلزم یک استراتژی دوگانه و جامع است. نخست، الزامی است که تحقیقات بر توسعه روش‌های سنتز با شدت کربن صفر متمرکز شود تا وابستگی ساختاری به زیرساخت انرژی آلاینده کاملاً حذف گردد. دوم، مدیریت بار ساختاری باقی مانده نیازمند افزایش دوام و قابلیت استفاده مجدد کاتالیست است. پایداری فرآیند به طور مستقیم به طول عمر چرخه استفاده و عدد تناوب استفاده وابسته است تا هزینه ساخت به ازای هر واحد آب تصفیه شده، به حداقل برسد و پتانسیل کامل این فناوری اکسیداسیون پیشرفته محقق گردد.

قدردانی

نویسنده از حمایت معنوی دانشگاه شهید بهشتی، پژوهشکده علوم محیطی تشکر می‌نماید.

تعارض منافع

هیچ تعارض منافی برای نویسنده این مقاله در انتشار آن وجود ندارد.

سهم نویسندگان

افسانه شهبازی ۱۰۰ درصد مسئولیت تمامی مراحل پژوهش، شامل طراحی مطالعه، انجام پژوهش، تحلیل و تفسیر داده‌ها و نگارش و ویرایش نهایی مقاله را بر عهده داشته است.

منابع مالی

در این تحقیق از هیچ منابع مالی کمک گرفته نشد.

بیانیه هوش مصنوعی

در این مقاله از ابزارهای هوش مصنوعی استفاده نشده است.

تحلیل نتایج حاصل از آنالیز حساسیت، با اعمال سناریوی کاهش ۹۵ درصدی مصرف برق در مرحله سنتز فتوکاتالیست $g-C_3N_4$ در سطح نهایی به وضوح نشان داد که با کاهش ۹۵ درصدی برق مصرفی در سنتز، سهم $g-C_3N_4$ در هر سه حوزه آسیب نهایی به کمتر از ۶ درصد تنزل یافت (شکل ۶). به طور مشخص، سهم $g-C_3N_4$ در حوزه منابع (Resources) به حدود ۴/۸ درصد رسید که نشان‌دهنده یک کاهش تقریباً ۹۳ درصدی نسبت به حالت پایه (۷۷/۸۹ درصد) بود. به همین ترتیب، در حوزه بوم‌سازگان‌ها (Ecosystems)، سهم $g-C_3N_4$ به حدود ۵/۵ درصد و در حوزه سلامت انسان (Human Health) به حدود ۵/۷ درصد کاهش یافت که در هر دو مورد، کاهشی بیش از ۹۲ درصد را نشان داد. این کاهش شدید و یکنواخت، به صورت قاطع نشان داد که تخریب ساختاری منابع، سلامت و اکوسیستم‌ها که در ابتدا توسط هزینه تولید $g-C_3N_4$ هدایت می‌شد، قابل اجتناب بود. با فرض دستیابی به تولیدی با شدت کربن بسیار پایین، بار محیط زیستی نهفته کاتالیست عملاً به صفر می‌رسید. در نتیجه، در این سناریوی ایده‌آل، چالش پایداری به حوزه عملیات تصفیه (مصرف برق باقی‌مانده) محدود می‌شود که این امر، اولویت‌های مهندسی محیط‌زیست را به طور کامل از تولید کاتالیست به بهینه‌سازی فرآیند تصفیه تغییر می‌دهد.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش ارزیابی جامع چرخه حیات (LCA) برای بررسی آثار محیط زیستی فرآیند تخریب فتوکاتالیستی RhB توسط $g-C_3N_4$ انجام شد. تحلیل‌ها یک انتقال ساختاری و حیاتی در بار محیطی سیستم را آشکار ساخت. در حالی که در فاز سنتز، انرژی الکتریکی پرکربن شبکه منطقه‌ای با سهمی بیش از ۹۷ درصد به عنوان کانون آسیب اصلی شناخته شد، در فاز کاربرد (تصفیه)، این بار به صورت کامل به ساختار $g-C_3N_4$ منتقل شد. در این مرحله، هزینه محیط زیستی نهفته کاتالیست با سهمی حدود ۷۸ درصد، عامل غالب در تمام آسیب‌های سطح نهایی (به منابع، سلامت انسان و بوم‌سازگان‌ها) تعیین گردید. این امر مؤید آن بود که بار محیطی غالب فرآیند تصفیه، نه از مصرف انرژی عملیاتی آن، بلکه از سرمایه‌گذاری محیط‌زیستی اولیه و سنگین برای ساخت خود کاتالیست نشأت گرفته بود.

برای مقابله با این چالش ساختاری، یک تحلیل حساسیت با

References

- [1] Oladoye, P.O., Kadhom, M., Khan, I., Aziz, K.H.H. and Alli, Y.A., 2024. Advancements in adsorption and photodegradation technologies for Rhodamine B dye wastewater treatment: fundamentals, applications, and future directions. *Green Chemical Engineering*, 5(4), pp.440–460. doi: [10.1016/j.gce.2023.12.004](https://doi.org/10.1016/j.gce.2023.12.004).
- [2] Islam, T., Repon, M.R., Islam, T., Sarwar, Z. and Rahman, M.M., 2023. Impact of textile dyes on health and ecosystem: a review of structure, causes, and potential solutions. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(4), pp.9207–9242. doi: [10.1007/s11356-022-24398-3](https://doi.org/10.1007/s11356-022-24398-3).
- [3] Pavithra, K.G., Kumar, P.S., Jaikumar, V. and Sundar Rajan, P., 2019. Removal of colorants from wastewater: A review on sources and treatment strategies. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 75, pp.1–19. doi: [10.1016/j.jiec.2019.02.011](https://doi.org/10.1016/j.jiec.2019.02.011).
- [4] Kumar, A. and Pandey, G., 2017. A review on the factors affecting the photocatalytic degradation of hazardous materials. *Material Science & Engineering International Journal*, 1(3), pp.106–114. doi: [10.15406/mseij.2017.01.00018](https://doi.org/10.15406/mseij.2017.01.00018).
- [5] Rawal, J., Lee, S.-Y. and Park, S.-J., 2023. Facile synthesis of a GO-g-C₃N₄/BaTiO₃ ternary nanocomposites for visible-light-driven photocatalytic degradation of rhodamine B. *Chemosphere*, 345, p.140479. doi: [10.1016/j.chemosphere.2023.140479](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.140479).
- [6] Gaikwad, R.P., Naikwadi, D.R., Biradar, A.V. and Gawande, M.B., 2023. Photocatalytic one-pot conversion of aldehydes to esters and degradation of rhodamine B dye using mesoporous graphitic carbon nitride. *ACS Applied Nano Materials*, 6(3), pp.1859–1869. doi: [10.1021/acsanm.2c04846](https://doi.org/10.1021/acsanm.2c04846).
- [7] Mishra, P.P., Behera, D., Suman, S., Das, N., Tripathy, B.C., Kumar, J. and Behera, A.K., 2025. Synergistic efficiency of modified banana leaf derived cellulose-g-C₃N₄ hybrid composite: a sustainable approach for visible-light-driven photodegradation of dyes. *RSC Advances*, 15(17), pp.13712–13727. doi: [10.1039/D5RA01156F](https://doi.org/10.1039/D5RA01156F).
- [8] Song, P., Sun, S., Cui, J., Zheng, X. and Liang, S., 2021. Organic dye-reformed construction of porous-defect g-C₃N₄ nanosheet for improved visible-light-driven photocatalytic activity. *Applied Surface Science*, 568, p.150986. doi: [10.1016/j.apsusc.2021.150986](https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2021.150986).
- [9] Barjoveanu, G., Teodosiu, C., Bucatariu, F. and Mihai, M., 2020. Prospective life cycle assessment for sustainable synthesis design of organic/inorganic composites for water treatment. *Journal of Cleaner Production*, 272, p.122672. doi: [10.1016/j.jclepro.2020.122672](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122672).
- [10] Bartolozzi, I., Daddi, T., Punta, C., Fiorati, A. and Iraldo, F., 2020. Life cycle assessment of emerging environmental technologies in the early stage of development: a case study on nanostructured materials. *Journal of Industrial Ecology*, 24(1), pp.101–115. doi: [10.1111/jiec.12959](https://doi.org/10.1111/jiec.12959).
- [11] Ramadan, B.S., Wibowo, Y.G., Anwar, D. and Maryani, A.T., 2024. A review of life cycle assessment of nanomaterials-based adsorbent for environmental remediation. *Global NEST Journal*, 26(7), 06216. doi: [10.30955/gnj.06216](https://doi.org/10.30955/gnj.06216).
- [12] Rashid, S.S., Harun, S.N., Hanafiah, M.M., Razman, K.K., Liu, Y.-Q. and Tholibon, D.A., 2023. Life cycle assessment and its application in wastewater treatment: a brief overview. *Processes*, 11(1), p.208. doi: [10.3390/pr11010208](https://doi.org/10.3390/pr11010208).
- [13] Popowicz, M., Katzer, N.J., Kettele, M., Schöggel, J.-P. and Baumgartner, R.J., 2025. Digital technologies for life cycle assessment: a review and integrated combination framework. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 30(3), pp.405–428. doi: [10.1007/s11367-024-02409-4](https://doi.org/10.1007/s11367-024-02409-4).
- [14] Luo, Y. and Su, R., 2024. Environmental impact of waste treatment and synchronous hydrogen production: based on life cycle assessment method. *Toxics*, 12(9), p.652. doi: [10.3390/toxics12090652](https://doi.org/10.3390/toxics12090652).
- [15] Sendão, R.M., da Silva, J.C.E. and da Silva, L.P., 2025. Comparative life cycle assessment of the fabrication of visible-light-driven photocatalytic TiO₂–carbon dots nanocomposites for wastewater treatment. *NanoImpact*, 38, p.100556. doi: [10.1016/j.impact.2025.100556](https://doi.org/10.1016/j.impact.2025.100556).
- [16] Ogbu, C.A., Alexiou Ivanova, T., Ewemoje, T.A., Alabi, H.A. and Roubík, H., 2025. Towards environmentally sustainable water management in Africa: a comprehensive review of life cycle assessment studies in water and wastewater treatment. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 30, pp.956–979. doi: [10.1007/s11367-025-02434-x](https://doi.org/10.1007/s11367-025-02434-x).
- [17] Aquino de Carvalho, N. and Gilbertson, L.M., 2023. Comparative life cycle assessment of graphitic carbon nitride synthesis routes. *Journal of Industrial Ecology*, 27(3), pp.1008–1020. doi: [10.1111/jiec.13390](https://doi.org/10.1111/jiec.13390).
- [18] Sahoo, S., Mahamallik, P., Das, R. and Panigrahi, S., 2024. A critical review on non-metal doped g-C₃N₄ based photocatalyst for organic pollutant remediation with sustainability assessment by life cycle analysis. *Environmental Research*, 258, p.119390. doi: [10.1016/j.envres.2024.119390](https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119390).
- [19] Veiga-del-Baño, J.M., Pérez-Lucas, G., Andreo-Martínez, P. and Navarro, S., 2025. Bibliometric analysis on graphitic carbon nitride (g-C₃N₄) as photocatalyst for the remediation of water polluted with contaminants of emerging concern. *Catalysts*, 15(2), p.115. doi: [10.3390/catal15020115](https://doi.org/10.3390/catal15020115).
- [20] Rajaeifar, M.A., Akram, A., Ghobadian, B., Rafiee, S., Heijungs, R. and Tabatabaei, M., 2016. Environmental impact assessment of olive pomace oil

- biodiesel production and consumption: a comparative lifecycle assessment. *Energy*, 106, pp.87–102. doi: 10.1016/j.energy.2016.03.010.
- [21] Bijari, M. and Shahbazi, A., 2025. Flow-driven engineering of g-C₃N₄ nanosheet for additive-free, one-step, and sustainable synthesis of high-efficiency photocatalysts. *Materials Today Communications*, 49, p.114208. doi: 10.1016/j.mtcomm.2025.114208.
- [22] Charpentier Poncelet, A., Helbig, C., Loubet, P., Beylot, A., Muller, S., Villeneuve, J., Laratte, B., Thorenz, A., Tuma, A. and Sonnemann, G., 2021. Life cycle impact assessment methods for estimating the impacts of dissipative flows of metals. *Journal of Industrial Ecology*, 25(5), pp.1177–1193. doi: 10.1111/jiec.13136.
- [23] van Zelm, R., Hennequin, T. and Huijbregts, M.A.J., 2025. Performing life cycle impact assessment with the midpoint and endpoint method ReCiPe. *Nature Protocols*, 20, pp.3400–3411. doi: 10.1038/s41596-025-01207-y.
- [24] Nizam, N.U.M., Hanafiah, M.M. and Woon, K.S., 2021. A content review of life cycle assessment of nanomaterials: current practices, challenges, and future prospects. *Nanomaterials*, 11(12), p.3324. doi: 10.3390/nano11123324.
- [25] Bhandari, D., Lakhani, P. and Modi, C.K., 2024. Graphitic carbon nitride (g-C₃N₄) as an emerging photocatalyst for sustainable environmental applications: a comprehensive review. *RSC Sustainability*, 2(2), pp.265–287. doi: 10.1039/D3SU00382E.
- [26] Faccani, L., 2022. *Nano-photocatalysts: design, up-scale and characterisation models*. PhD thesis, University of Parma.
- [27] Patra, R., Dash, P., Panda, P.K. and Yang, P.-C., 2023. A breakthrough in photocatalytic wastewater treatment: the incredible potential of g-C₃N₄/titanate perovskite-based nanocomposites. *Nanomaterials*, 13(15), p.2173. doi: 10.3390/nano13152173.
- [28] Arvidsson, R., Nguyen, D. and Svanström, M., 2015. Life cycle assessment of cellulose nanofibrils production by mechanical treatment and two different pretreatment processes. *Environmental Science & Technology*, 49(11), pp.6881–6890. doi: 10.1021/acs.est.5b00888.
- [29] Gavankar, S., Suh, S. and Keller, A.A., 2015. The role of scale and technology maturity in life cycle assessment of emerging technologies: a case study on carbon nanotubes. *Journal of Industrial Ecology*, 19(1), pp.51–60. doi: 10.1111/jiec.12175.
- [30] Kim, H.C. and Fthenakis, V., 2013. Life cycle energy and climate change implications of nanotechnologies. *Journal of Industrial Ecology*, 17(4), pp.528–541. doi: 10.1111/j.1530-9290.2012.00538.x.
- [31] Arvidsson, R., Kushnir, D., Sandén, B.A. and Molander, S., 2014. Prospective life cycle assessment of graphene production by ultrasonication and chemical reduction. *Environmental Science & Technology*, 48(8), pp.4529–4536. doi: 10.1021/es405338k.
- [32] Kazemi, A., Bahramifar, N., Heydari, A. and Olsen, S.I., 2018. Life cycle assessment of nanoadsorbents at early stage technological development. *Journal of Cleaner Production*, 174, pp.527–537. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.10.245.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم؟

Shahbazi, A., 2026. Life Cycle Analysis of the Synthesis and Photocatalytic Application of Non-Metallic Semiconductor Nanosheets for Rhodamine B Removal with an Environmental Sustainability Approach. *Modares Civil Engineering journal*, 26(5), pp.81-96.

