

A Review of the Effect of Different Structures and Morphologies of g-C₃N₄ on Its Performance in Dyes Removal

Hajar Farhadi, Narjes Keramati*

Department of Nanotechnology, Faculty of New Sciences and Technologies, Semnan University, P. O. Code: 35131- 19111, Semnan, Iran.

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 14-12-2024

Accepted: 12-03-2025

Available online: 21-05-2025

Print ISSN: 2251-7278

Online ISSN: 2383-2223

DOI: 10.30509/jscw.2025.167430.1214

Keywords:

Graphitic carbon nitride (g-C₃N₄)

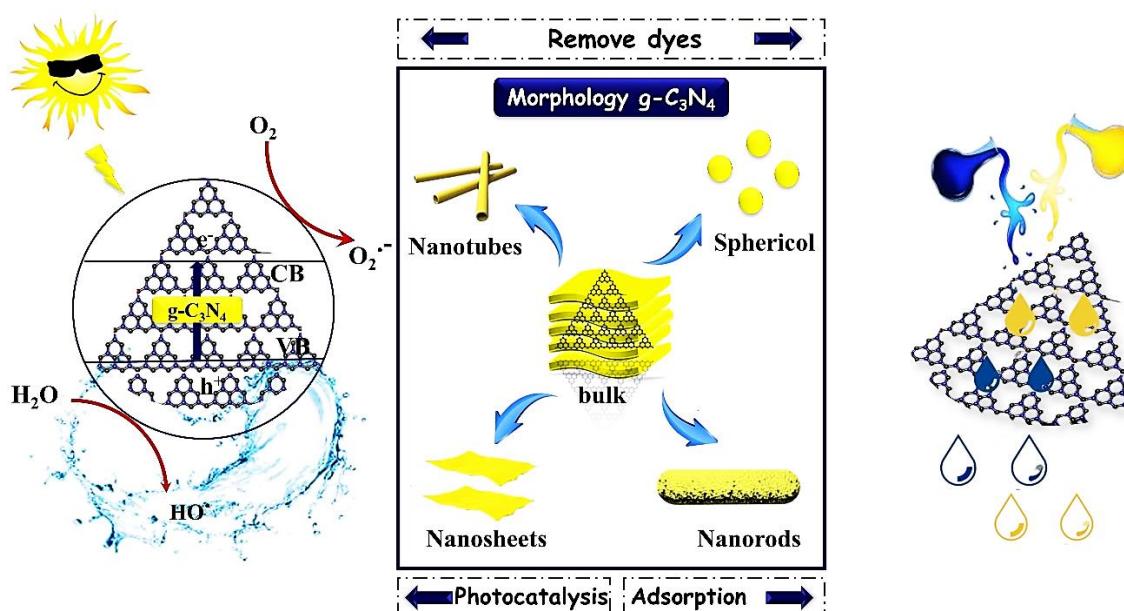
Pollutant

Nanostructure

Dye removal

ABSTRACT

Water pollution is becoming an unavoidable problem in today's world. Tons of dangerous pollutants are discharged into clean water every day. Pollutants in water have negative effects on both the natural environment and human health and are also a significant cause of death worldwide. In this regard, adsorbents and photocatalysts utilizing nanotechnology, such as organic, metallic, and non-metallic semiconductor photocatalysts, have garnered considerable attention over the past few decades. The objective of this study is to examine the impact of various nanostructures of graphitic carbon nitride (g-C₃N₄), including nanosheets, nanotubes, and nanorods, on their performance, as well as the effectiveness of certain g-C₃N₄-based composites as adsorbents and photocatalysts in adsorption and photocatalytic processes for dye removal from wastewater. Based on previous research findings, the dye removal efficiency of g-C₃N₄ nanostructures is significantly enhanced compared to their bulk counterparts due to their higher porosity and surface area, stronger electrostatic interactions, and a greater number of active sites.



Corresponding author: * narjeskeramati@semnan.ac.ir



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

مروری بر تاثیر ساختار و ریخت‌های متفاوت $g-C_3N_4$ بر عملکرد آن در حذف رنگزها

هاجر فرهادی^۱، نرجس کرامتی^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده نانوفناوری، پردیس علوم و فناوری‌های نوین، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران، کدپستی: ۳۵۱۳۱-۱۹۱۱۱.
۲- استادیار، دانشکده نانوفناوری، پردیس علوم و فناوری‌های نوین، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران، کدپستی: ۳۵۱۳۱-۱۹۱۱۱.

چکیده

آلودگی آب در حال تبدیل شدن به یک مشکل اجتناب‌ناپذیر در دنیای امروز است. هر روزه تن‌ها آلاینده خطرناک به آب پاک تخلیه می‌شود. آلاینده‌های موجود در آب‌ها اثرات منفی بر محیط طبیعی و سلامت انسان دارند و همچنین یکی از علت‌های مرگ و میر در جهان هستند. در این راستا، جاذب‌ها و فوتوکاتالیست‌ها با استفاده از فناوری نانو مانند استفاده از فوتوکاتالیست‌های نیمه‌رسانای آلی، فلزی و غیرفلزی در چند دهه اخیر توجه زیادی را به خود جلب کرده است. هدف از این مطالعه، بررسی تاثیر انواع نانو ساختارهای کربن نیتريد گرافیتی از جمله نانوصفحات، نانولوله‌ها و نانومیله‌ها بر عملکرد آن‌ها و برخی از کامپوزیت‌های کربن نیتريد گرافیتی به عنوان جاذب و فوتوکاتالیست در فرایندهای جذب سطحی و فوتوکاتالیزی جهت حذف رنگزها از پساب است. با توجه به نتایج تحقیقات پیشین، بازده حذف رنگزها در نانو ساختارهای $g-C_3N_4$ به دلیل داشتن تخلخل و مساحت سطح بیشتر، جاذبه الکتروستاتیکی و مکان‌های فعال فراوان نسبت به حالت توده افزایش داشته است.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۲۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۲۲

در دسترس به صورت الکترونیکی: ۱۴۰۴/۰۲/۳۱

شاپا چاپی: ۲۲۵۱-۷۲۷۸

شاپا الکترونیکی: ۲۲۲۳-۲۳۸۳

DOI: 10.30509/jscw.2025.167430.1214

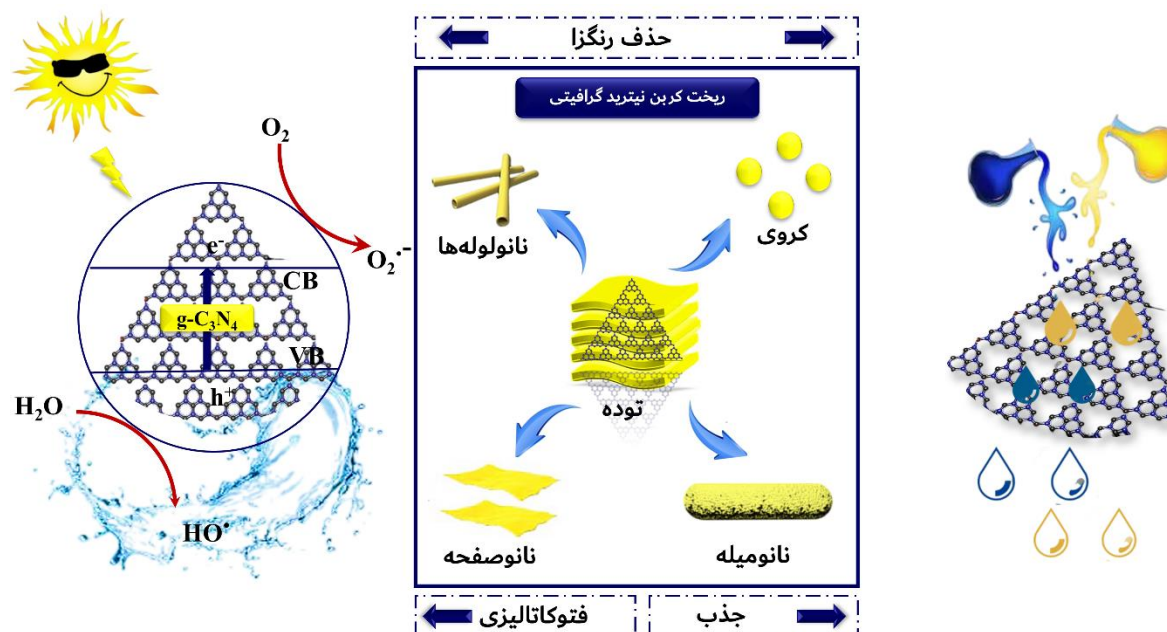
واژه‌های کلیدی:

کربن نیتريد گرافیتی ($g-C_3N_4$)

آلاینده

نانوساختار

حذف رنگز



۱- مقدمه

در سال‌های اخیر تلاش زیادی برای جلوگیری از آلودگی محیط‌زیست انجام شده است. از اولین مشکلاتی که برای رسیدن به این هدف می‌توان نام برد اثراتی است که مواد صنعتی بر محیط‌زیست دارند. با توجه به رشد صنایع و تولیدات صنعتی، ترکیب‌های جدید به عنوان آلاینده‌ها به محیط‌زیست وارد می‌شود (۱). آلاینده‌ها مشکلاتی مانند آسیب کبدی، کلیوی و سرطان در انسان به وجود می‌آورند (۲). رنگ‌ها بطور گسترده در صنایع مختلفی از جمله رنگ‌آمیزی، نساجی، چرم، صنایع غذایی و دارویی، لوازم آرایشی و بهداشتی، کاغذ و پلاستیک مورد استفاده قرار می‌گیرند (۳). مواد رنگ‌زا یکی از خطرهای جدی برای محیط‌زیست محسوب می‌شوند که به عنوان آلاینده به محیط‌زیست وارد شده و حجم زیادی از پساب‌های رنگ‌زا را تولید می‌کنند. بنابراین یکی از منابع اصلی آلودگی آب‌ها، رنگ‌ها هستند و در سال‌های اخیر توجه بسیاری از محققین در زمینه پاک‌سازی محیط‌زیست از جمله حذف آلاینده‌های آلی، معدنی و عوامل فیزیکی از پساب مورد توجه قرار گرفته است (۴-۷). روش‌های مختلفی برای حذف آلاینده‌ها از آب‌های آلوده از جمله: جذب سطحی، تبادل یونی، ته‌نشینی، اسمز معکوس، صافش غشایی، اکسایش و فوتوکاتالیز مورد استفاده قرار گرفته است (۸-۱۰). از میان آنها روش جذب، یکی از روش‌هایی است که به دلیل بازده بالا، هزینه کم، راحتی و سادگی، و روش تخریب فوتوکاتالیز به عنوان یکی از فناوری‌های پیشرفته تصفیه محیطی در ایجاد گزینه‌ای برای مشکلات آلودگی رنگ‌ها توجه بیشتری را به خود جلب کرده‌اند (۱۱-۱۵). وجود یک فوتوکاتالیست ایده‌آل که بتواند به طور موثر نور را جذب کند و از حامل‌های بار تولید شده برای واکنش کاهش استفاده کند، هنوز یک چالش است (۱۶، ۱۷). همچنین یک جاذب مناسب باید عوامل مطلوبی مانند مساحت سطح بزرگ، تخلخل بالا، پایداری فیزیکی، ظرفیت جذب بالا و گزینش‌پذیری خوب نسبت به آلاینده‌های هدف را داشته باشد. علاوه بر این، جاذب باید غیر سمی باشد و با حداقل هزینه و تلاش ممکن به راحتی تولید و احیا شود (۱۸، ۱۹). جداسازی جاذب از محلول‌های آبی نیز یک معیار مهم است.

کربن نیتريد گرافیتی ($g-C_3N_4$) به عنوان یک نیمه رسانای پلیمری (۲۰) بدون فلز به دلیل فعالیت در زیر نور مرئی با کاف نور مناسب (بین ۲/۸-۲/۶ eV)، غیرسمی بودن، پایداری شیمیایی بالا و روش‌های آماده‌سازی راحت به عنوان یکی از مواد جاذب (۲۱) و فوتوکاتالیزی (۲۲) منتخب شناخته می‌شود. کربن نیتريد گرافیتی، یک ماده پلیمری می‌باشد که به دلیل سنتز آسان، بزرگ بودن سطح، پایداری خیلی خوب و غیرسمی (۲۳) بودن مورد توجه قرار گرفته است. در ساختار این ماده، نیتروژن وجود دارد که دارای جفت الکترون غیریون‌دهی می‌باشد و توسط واحدهای s-تریازین (C_3N_3) یا s-تریازین (C_3N_7) تولید می‌شود (۲۴). اتم‌های

نیتروژن که غنی از الکترون هستند، برای جذب می‌توانند مانند داربست مولکولی عمل کنند. قابلیت هماهنگی بالا در ساختار کربن نیتريد گرافیتی فرایند جذب و فوتوکاتالیزی را افزایش می‌دهد. واحدهای تکرار شونده ۳-s-تریازین در ساختار کربن نیتريد گرافیتی، باعث پایداری این ماده می‌شوند. به دلیل هزینه پایین، دوست‌دار محیط‌زیست، پایداری حرارتی و شیمیایی بالا و خواص منحصر به فرد الکترونی به طور گسترده به عنوان جاذب مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین حضور جفت الکترون در اتم نیتروژن، تحرک حامل بار بیشتر و هدایت الکتریکی را فراهم می‌کند (۲۵).

در این مطالعه، تأثیر انواع ساختارهای کربن نیتريد گرافیتی، از جمله ریخت توده، نانوصفحه و نانولوله‌ها، بر عملکرد آن در حذف آلاینده‌های رنگ‌زا مورد بررسی قرار گرفته است. هدف این مطالعه، مرور و تحلیل پژوهش‌های انجام شده در زمینه عملکرد این ساختارها در فرایندهای جذب و فوتوکاتالیزی است. علاوه بر این، به بررسی برخی از کامپوزیت‌های کربن نیتريد گرافیتی و کارایی آن‌ها به عنوان جاذب و فوتوکاتالیست پرداخته شده است. کار حاصل می‌تواند فرصت جدیدی برای استفاده از نانو ساختارهای کربن نیتريد گرافیتی و یا کامپوزیت‌های کربن نیتريد گرافیتی به عنوان فوتوکاتالیست و جاذب و به‌خصوص جذب انتخابی برای حذف آلاینده‌های آبی ایجاد کند.

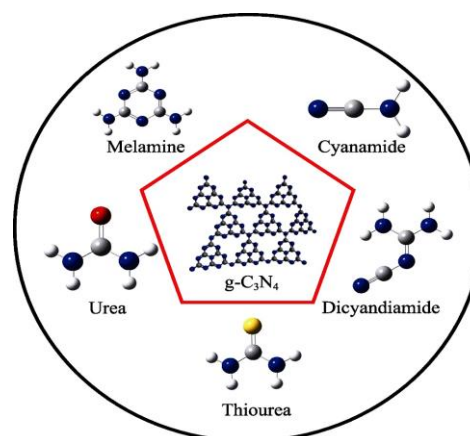
۲- کربن نیتريد گرافیتی

کربن نیتريد گرافیتی معمولاً با پساپاش حرارتی پیش ماده‌های متفاوتی از جمله اوره، تیواوره، سیانامید، دی‌سیانامید و ملامین در دماهای مختلف (۵۵۰-۴۵۰ درجه سانتی‌گراد) سنتز می‌شود. سنتز شامل اضافه شدن نوکلئوفیلی و پساپاش می‌باشد. ابتدا مولکول‌های اوره یا تیواوره توسط واکنش‌های تراکمی و اضافی به ملامین تبدیل شده و با افزایش دما، ملامین به کربن نیتريد گرافیتی تبدیل می‌گردد (۲۷-۳۰). ساختارهای مولکولی از پیش ماده‌های متداول $g-C_3N_4$ در شکل ۱ نشان داده شده است (۳۱).

کلودین^۲ و همکارانش در سال ۲۰۲۴ (۳۲)، از طریق پساپاش و با استفاده از پیش ماده اوره $g-C_3N_4$ را سنتز کردند. سپس با وارد کردن $g-C_3N_4$ توده‌ای آماده شده به محیط واکنش سنتز، (کربن نیتريد گرافیتی- بیسموت وانادات) $g-C_3N_4-BiVO_4$ تشکیل شد. نتایج مشخصه‌یابی نشان داد سنتز به خوبی و با توزیع و یکنواختی بالا انجام شده است. ترکیب $BiVO_4$ با $g-C_3N_4$ باعث تراز کردن سطوح انرژی و استفاده از خواص منحصر به فرد انتقال بار برای افزایش تخریب رنگ‌ها با نور مرئی، امیدوارکننده است.

^۱ Babd gap^۲ Claudino

نانومواد برپایه کربن نیتريد گرافیتی ساخته شدند تا محدودیت‌های حالت توده آن ماده را برطرف سازد. مواد نانوساختار با دو رویکرد بالا به پایین و پایین به بالا قابل ساخت می‌باشند. برای تولید محصول در رویکرد بالا به پایین، یک ماده در حالت توده را شکل‌دهی و اصلاح می‌کنند. در این روش، یک ماده در حالت توده، با کاهش ابعاد و شکل‌دهی آن، به یک محصول نانومتری رسانده می‌شود. روش‌های مختلفی برای تهیه و ساخت نانوذرات وجود دارد. از مهم‌ترین آنها می‌توان سازوکارهای تبخیر، واکنش‌های فاز گازی ایجاد شده توسط لیزر یا پلاسما و آسیاب کردن مکانیکی (۴۹-۵۲) را نام برد. برای طراحی ساختار نانو، روش قالب سخت و نرم مقدم‌تر است که ریخت‌های جدید ایجاد کرده و همچنین بصورت منظم متخلخل شده است. روش‌های قالب سخت به عنوان یک مسیر معمولی کار می‌کنند که عوامل هدایت ساختار سخت را با مواد اولیه در طول واکنش حرارتی ترکیب می‌کنند.



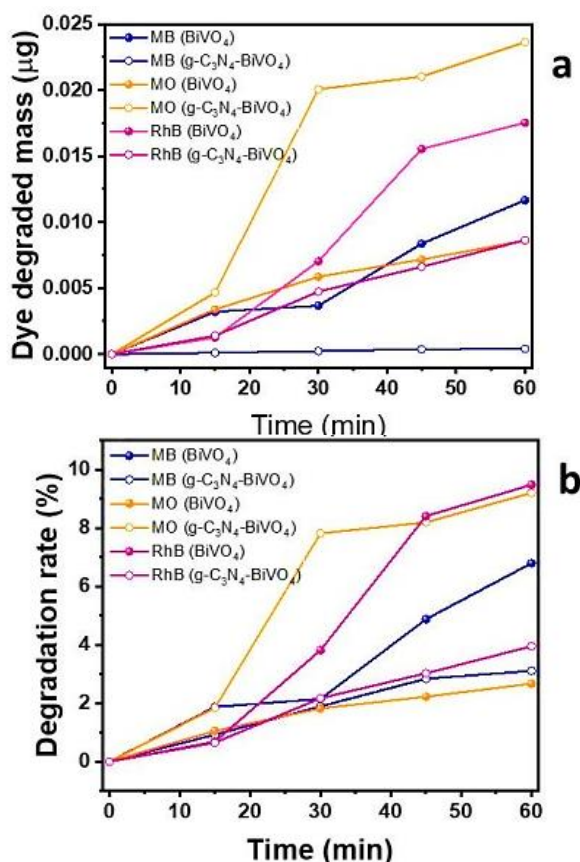
شکل ۱: نمایی از پیش‌ماده‌های متداول $g-C_3N_4$ (۳۱).

Figure 1: Schematic of common $g-C_3N_4$ precursors (31).

با توجه به نتایج طبق شکل ۲، بازده تخریب رنگ‌ها توسط $g-BiVO_4$ و C_3N_4 به ترتیب متیل اورانژ (MO) < رودامین بی (RhB) < متیلن بلو (MB) است. این مطالعه نشان داد که $g-C_3N_4/BiVO_4$ برای تخریب رنگ‌های آنیونی (مانند MO) عملکرد بهتری دارد (۳۲). با این حال، خاصیت ضعیف $g-C_3N_4$ در مقیاس توده (۳۳)، کاربردهای $g-C_3N_4$ را محدود می‌کند. به نوبه خود، روش‌های مختلفی مانند دوپ کردن (۳۴)، تغییر ریخت (۳۵) و ترکیب مواد (۳۶) برای غلبه بر این نقص‌ها اتخاذ شده‌اند. در هر لایه کربن نیتريد گرافیتی پیوندهای قوی کووالانسی (۳۷، ۳۸) بین اتم کربن و نیتروژن وجود دارد. اما لایه‌ها توسط پیوند ضعیف واندروالس (۳۸) به هم متصل شده‌اند. بنابراین با لایه‌برداری کربن نیتريد گرافیتی توده، به راحتی نانوساختارهای کربن نیتريد گرافیتی (۳۹، ۴۰) به دست می‌آید. از روش‌های لایه‌برداری می‌توان به لایه‌برداری اولتراسونیک (۴۱)، حرارتی (۴۲) و شیمیایی (۴۳) اشاره کرد. روش لایه‌برداری حرارتی را می‌توان به عنوان روشی با هزینه پایین، قابلیت اجرا در مقیاس بزرگ و روش سازگار با محیط‌زیست در نظر گرفت (۴۴-۴۶).

۳- پژوهش‌های پیش‌بین در زمینه ساخت نانوساختارهای کربن نیتريد گرافیتی

مواد در مقیاس نانو، خواص و ویژگی‌های جدید از خود نشان می‌دهند و این خواص و ویژگی‌ها در حالت توده وجود ندارد. از جمله خواص شیمیایی، فیزیکی، نوری، الکتریکی، حرارتی، مغناطیسی، واکنش‌پذیری و مکانیکی در ابعاد نانو تغییر می‌کنند. دو دلیل اصلی برای این تغییر خواص می‌تواند وجود داشته باشد. یکی از آنها اثرات سطحی و دیگری ورود به محدوده فیزیک کوانتوم می‌باشد. نانومواد به علت اندازه بسیار کوچک، دارای نسبت سطح به حجم بسیار بالایی هستند (۴۸، ۴۷، ۱).



شکل ۲: (a) جرم رنگ‌زای تخریب شده به عنوان تابعی از زمان، و (b) میزان تخریب به عنوان تابعی از زمان، با استفاده از $BiVO_4$ و $g-C_3N_4/BiVO_4$ به عنوان جاذب و رنگ‌زاهای متیلن بلو (MB)، متیل اورانژ (MO) و رودامین بی (RhB) با مقدار ۳۰ mg/L قبل از جذب (۳۲).

Figure 2: (a) Mass of dye degraded as a function of time and (b) degradation rate as a function of time, using $BiVO_4$ and $g-C_3N_4/BiVO_4$ as adsorbent and (Methylene blue) MB, (Methyl orange) MO, and (Rhodamine B) RhB as dyes at an initial concentration of 30 mg/L before the adsorption process (32).

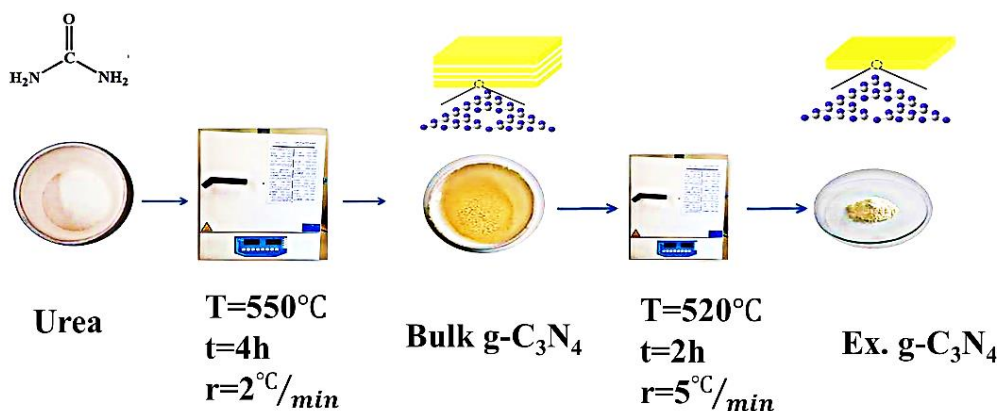
مزیت‌های مهم نانوصفحات کربن نیتريد گرافیتی سطح بالا برای ارائه مکان‌های جذب فراوان است، که موجب افزایش ظرفیت جذب و بهبود فرایند فوتوکاتالیزی جهت حذف رنگ‌ها می‌شود. بنابراین با لایه‌برداری کربن نیتريد گرافیتی توده، به راحتی نانوساختارهای کربن نیتريد گرافیتی به دست می‌آید (۵۹، ۵۸، ۴۴). در تحقیقاتی توسط فرهادی و کرامتی در سال ۲۰۲۳ (۱۸)، لی^۱ و همکارانش در سال ۲۰۱۸ (۶۰) و کای^۲ و همکارانش در سال ۲۰۱۷ (۶۱)، نانوصفحات کربن نیتريد گرافیتی به روش حرارتی سنتز شده است. شمایی از روش سنتز حرارتی در شکل ۳ مشاهده می‌شود. فرهادی و کرامتی، نانوصفحات کربن نیتريد گرافیتی را در دمای ۵۲۰ °C، لی و همکاران در دماهای ۵۲۵ °C، ۵۵۰ °C و ۵۷۵ °C و کای و همکاران در دماهای ۴۵۰ °C، ۵۰۰ °C، ۵۵۰ °C و ۶۰۰ °C سنتز کردند و جهت جذب آلاینده‌ها از جمله رنگ‌ها از آب مورد استفاده قرار دادند. با توجه به نتایج این تحقیقات که به ترتیب ظرفیت جذب را ۵۴/۳ mg/g، ۶۱/۹ و ۴۳/۱ گزارش کردند، نانوصفحات عملکرد بهتری از حالت توده داشته است. در تحقیق فرهادی و کرامتی، فرایند جذب متیلن بلو با غلظت اولیه ۱۰ mg/L در pH=۹، زمان ۱۲۰ دقیقه و مقدار جاذب ۰/۳ گرم بر لیتر، مدل سینتیک الویچ^۳ و ایزوترم لانگمویر را نشان داد. همچنین نتایج ترمودینامیکی نشان دادند که فرایند جذب متیلن بلو بر روی سطح جاذب به صورت خودبه خودی و شیمیایی است (۱۸). لی^۱ و همکارانش، سینتیک جذب متیلن بلو را در غلظت اولیه ۱۰ mg/L و pH=۶ مورد بررسی قرار دادند. همچنین ظرفیت جذب تعادلی CN-575 (کربن نیتريد گرافیتی لایه‌برداری شده) برای جذب متیلن بلو ۶۱/۹ mg/g به دست آمده، که در مقایسه با ظرفیت جذب CN-525 و CN-550 با مقادیر ۳۷/۷۶ mg/g و ۱۰/۳۲ بسیار بالاتر است. ظرفیت جذب بالاتر توسط CN-57 به اصلاح سطح و تخلخل و در نهایت سطح ویژه بیشتر CN-57، بلورینگی بالا و مکان‌های واکنش‌پذیرتر نسبت داده شده است (۶۰).

سپس نمونه توسط هیدروفلوئوریک اسید (HF)، آمونیوم هیدروژن فلوئوراید (NH₄HF₂) و محلول‌های قلیایی مختلف اچ می‌شود و نانو ساختار مورد نظر به دست می‌آید (۵۳). ساختار با تغییر گونه‌ها و غلظت پیش ماده کنترل می‌شود. همچنین برای عدم استفاده از قالب‌های سخت به دلیل هزینه بالا و خطرات آنها، از قالب‌های نرم استفاده می‌شود (۵۴). در مقایسه با کربن نیتريد گرافیتی توده، کربن نیتريد گرافیتی چند بعدی با اندازه و ریخت‌های مختلف طراحی شده‌اند. مانند نقاط کوانتومی، نانولوله‌ها، صفحات دوبعدی و غیره که نانوساختارهای متفاوت، مساحت سطح و تخلخل متفاوتی دارند (۱).

۳-۱- ساخت نانو ساختار دوبعدی (نانو صفحات) کربن نیتريد گرافیتی و تأثیر بر عملکرد آن در حذف رنگ‌ها

یکی از رایج‌ترین روش‌ها برای جستجوی مواد جدید دو بعدی، لایه‌برداری از ماده اصلی در حالت توده است (۵۵). این مواد از لایه‌های مسطح با پیوندهای شیمیایی قوی درون لایه‌ای تشکیل شده‌اند که این لایه‌ها توسط نیروی ضعیف واندروالس به هم متصل می‌شوند و به راحتی لایه‌لایه می‌شوند. پایه نانو صفحات کربن نیتريد گرافیتی، حلقه‌های s-۳-تریازین هستند که این حلقه‌ها باعث پایداری نانوصفحات می‌گردند. همچنین با توجه به ساختار نانو صفحات کربن نیتريد گرافیتی، به دلیل پیوند اتم کربن با سه اتم کربن مجاور خود در هر لایه از گرافیت و تشکیل یک پیوند دوگانه با یکی از اتم‌های کربن می‌توانند به عنوان نیمه هادی‌ها عمل کنند و دارای حفره، سطح کروی باز و خلل و فرج می‌باشد (۵۶).

نانوصفحات کربن نیتريد گرافیتی مزایایی زیادی نسبت به حالت توده خود دارند. نانوصفحات کربن نیتريد گرافیتی با بار منفی می‌توانند فعل و انفعالات الکترواستاتیک با یون‌های با بار مثبت ایجاد کنند. این ماده انتخاب مناسبی برای جذب آلاینده‌ها است (۵۷). یکی از



شکل ۳: شمایی از روش سنتز حرارتی نانوصفحات $g-C_3N_4$ (۱۸).

Figure 3: Schematic of $g-C_3N_4$ Nanosheets thermal synthesis method (18).

³ Elovich

⁴ Li

¹ Li

² Cai

نیز برای توضیح عملکرد نوری نمونه‌ها استفاده شد. با نسبت‌های مختلف بین اسید سولفوریک غلیظ و اتیل الکل، نانوصفات $g-C_3N_4$ با سطح ویژه بالا سنتز شد. نانوصفات بهینه شده $g-C_3N_4$ (1:10) به بالاترین فعالیت فوتوکاتالیزی با تابش نور UV دست یافتند بطوری که توانستند ۱۰ میلی گرم در لیتر رنگزا رودامین بی را در ۶۰ دقیقه، حدود ۹۸ درصد کاهش دهند، که ۶ برابر بیشتر از $g-C_3N_4$ توده است. مجیدی و همکارانش در سال ۲۰۲۳ (۶۵)، نانوصفات کربن نیتريد گرافیتی متخلخل با جای خالی کربن از طریق تکلیس $g-C_3N_4$ توده در یک کوره به مدت ۲ ساعت در دمای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد را سنتز کردند. محصول سنتز شده با استفاده از XRD، FESEM، FTIR، DRS، PL، EDX و BET-BJH مشخصه‌یابی شد. کارایی نوری و توانایی محصول سنتز شده با تجزیه دو رنگزا نساجی آنیونی سنگین، قرمز ۲۲۷ و سیاه ۱۶۶، با نور مرئی ارزیابی شد. برای انجام فرایند فوتوکاتالیزی ابتدا ۰/۰۳۵ گرم از فوتوکاتالیست در یک محلول ۵۰ mL از رنگزا قرمز ۲۲۷ و سیاه ۱۶۶ پراکنده شد. پس از تنظیم مقدار pH به ۱۱/۵ توسط ۰/۱ KOH، بر روی یک هم‌زن مغناطیسی قرار داده شد و به مدت ۳۰ دقیقه در تاریکی هم‌زده شد تا اطمینان حاصل شود که تعادل جذب - دفع قبل از تابش حاصل شده است. سپس از یک لامپ LED ۸ وات به عنوان منبع نور مرئی برای تابش سیستم استفاده شد. در طول تابش، ۵ میلی‌لیتر از سوسپانسیون در فواصل منظم (۳۰ دقیقه) گرفته و پس از جداسازی جاذب با گریزانه، مایع رویی توسط اسپکتروفتومتر اندازه‌گیری شد.

مجیدی و همکارانش نشان دادند بازده تخریب فوتوکاتالیزی را می‌توان با اصلاح ساختار فوتوکاتالیست با کنترل دما، زمان و نرخ حرارت‌دهی نمونه در طول تکلیس به طور قابل توجهی بهبود بخشید. علاوه بر این آنیون‌هایی مانند OH^- می‌توانند سرعت واکنش تخریب را تسریع کنند. همچنین استفاده از فوتوکاتالیست سنتز شده برای حذف رنگزا از پساب‌های نساجی با pH قلیایی می‌تواند مقرون به صرفه باشد. با توجه به نتایج، بازده‌های ۹۱/۵ و ۷۷/۶ درصد برای RCN و بازده‌های ۴۷ و ۴۵/۶ درصد برای نمونه توده به ترتیب برای رنگزاهای قرمز ۲۲۷ و سیاه ۱۶۶ حاصل شد. نتایج نشان داد که بازده تخریب فوتوکاتالیزی را می‌توان با اصلاح ساختار فوتوکاتالیست به طور قابل توجهی بهبود بخشید.

فرید و همکارانش در سال ۲۰۲۴ (۶۶)، با استفاده از روش هیدروترمال، نانومیله‌های N-ZnO را با نانوصفات $g-C_3N_4$ سنتز کردند و اثر هم‌افزایی آن‌ها را جهت افزایش فعالیت فوتوکاتالیزی مورد مطالعه قرار دادند. برای انجام آزمون ساختاری، ریخت و عنصر ماده سنتز شده از XPS، HR-TEM، TEM، EDX، FESEM، XRD استفاده شد. تصاویر میکروسکوپ الکترونی عبوری با وضوح بالا

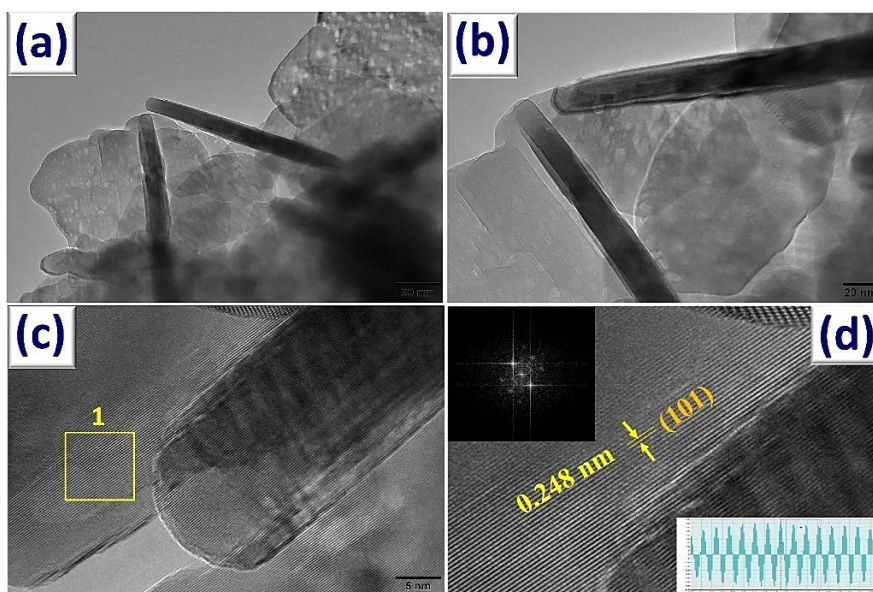
کای و همکارانش سینتیک شبه مرتبه دوم را گزارش کردند. همچنین عملکرد جذب بالای نانوصفات کربن نیتريد گرافیتی را به فراهم بودن مکان‌های جذب متعدد در جاذب سنتز شده و جاذبه‌های الکترواستاتیکی با آلاینده‌ها در آب نسبت دادند. نتایج آن‌ها نشان دادند برهم‌کنش مزدوج p-p و جاذبه الکترواستاتیکی سازوکارهای غالب برای جذب MB بر روی نانوصفات $g-C_3N_4$ هستند (۶۱).

در تحقیقی توسط یوسفی و همکارانش در سال ۲۰۱۹ (۶۲)، نانوصفات $g-C_3N_4$ را به روش هامرز سنتز کردند و سپس نمونه‌ها توسط آزمون‌های مختلف از جمله XPS، STEM، XRD، FTIR، SEM و UV-Vis بررسی شدند و پس از تایید سنتز، نانوصفات $g-C_3N_4$ را برای جذب رنگزاهای آلی (متیلن بلو (MB)، متیلن سبز (MG)، رزبنگال (RB)، رودامین B (RhB)، فوشین بازی (BF)، متیل اورانژ (MO)) و تتراساکلین مورد استفاده قرار دادند. برای اندازه‌گیری مقدار جذب رنگزاها و دارو ابتدا ۵ mg از $g-C_3N_4$ به ۵ mL آب اضافه شد و به مدت ۵ ساعت تحت امواج مافوق صوت قرار گرفت. سپس ۱۰ mg رنگزا/دارو اضافه شد و مخلوط به مدت ۱۰ دقیقه تحت امواج مافوق صوت قرار گرفت تا رنگزا/دارو در غلظت اولیه ۲ mg/ml حل شود. برای اطمینان از رسیدن به تعادل جذب، مخلوط به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق هم‌زده شد. پس از آن جاذب با گریزانه از محلول جدا شد. سپس مقادیر جذب شده از تفاوت بین غلظت اولیه و تعادلی رنگزا/دارو محاسبه شد. ظرفیت جذب نانوصفات $g-C_3N_4$ برای تتراساکلین ۸۹۵ mg/g و رنگزا آلی ۶۰۰-۷۰ mg/g حاصل شد. در صورتی که ظرفیت جذب $g-C_3N_4$ در حالت توده برای جذب تتراساکلین ۳۱۳ mg/g بوده است. بنابراین با ساخت نانوصفات کربن نیتريد گرافیتی ظرفیت جذب این ماده افزایش داده شده است. ژانگ^۱ و همکارانش در سال ۲۰۲۰ (۶۳)، ساختارهای متخلخل سه‌تایی نانوصفات $g-C_3N_4$ / نانوذرات طلا / مونت‌موریلونیت را برای تخریب رنگزاهای آلی سنتز کردند. در این تحقیق نانوصفات $g-C_3N_4$ به روش فراصوت سنتز شد. عملکرد نمونه را توسط رنگزاهایی از جمله متیلن بلو، رودامین 6G و قرمز کنگو مورد بررسی قرار دادند. بازده به‌دست‌آمده بیشتر از ۹۰ درصد حاصل شد و بازده نمونه پس از ۱۰ چرخه متوالی همچنان بیشتر از ۹۰ درصد به دست آمده است. این عملکرد می‌تواند به دلیل پایداری نانوصفات $g-C_3N_4$ و نانوذرات طلا بر روی مونت‌موریلونیت باشد. در تحقیقی دیگر توسط میا^۲ و همکارانش در سال ۲۰۱۷ (۶۴)، نانوصفات $g-C_3N_4$ را با لایه‌برداری از $g-C_3N_4$ توده با استفاده از روش شیمیایی توسط اسید سولفوریک غلیظ تهیه کردند. ساختارهای فازی، ریخت و ترکیبات عنصری به ترتیب با پراش پرتو ایکس، میکروسکوپ الکترونی روبشی، میکروسکوپ الکترونی عبوری و طیف‌سنج فوتوالکترون پرتو ایکس مشخص شدند. آنالیزهای جذب نوری و نورتایی

² Miao¹ Zhang

(BN)، نسبت جرم‌های متفاوت از نانوصفحه‌های CoAl-LDH کامپوزیت‌های CoAl-LDH@g-C₃N₄ (CACN) مورد استفاده قرار گرفت. تصاویر گرفته شده توسط FE-SEM در شکل ۵ نشان داده شده است. برای بررسی ظاهر و ریخت مواد نانوکامپوزیت CN، CoAl-LDH و CACN مورد استفاده قرار گرفت. CN دارای ساختار لایه‌ای دو بعدی است که در شکل ۵ (a-c) نشان داده شده است، با لایه‌های خاصی که برای ایجاد یک چارچوب نازک و صفحه مانند خم می‌شوند و مکان‌های فعال بیشتری را فراهم می‌کنند که فعالیت فوتوکاتالیزی را ممکن می‌سازد. CoAl-LDH در شکل ۵ (d-f) شکل صفحه مانند ناهموار با ابعاد میکرونی غیرهمگن را نشان می‌دهد. با این حال، صفحات CoAl-LDH به عنوان یک لنگر برای تجمع قابل توجه لایه به لایه عمل می‌کنند. ویژگی‌های ساختاری نانوکامپوزیت‌های CACN با نسبت‌های متغیر شکل ۵ (g-i) نشان می‌دهد که صفحات CoAl-LDH بر روی سطح ساختارهای صفحه مانند CN تعبیه شده‌اند. تجمع قابل توجهی از CoAl-LDH با افزایش بیشتر مقدار CoAl-LDH در ترکیب CACN به دست آمد، هنگامی که CoAl-LDH و CN با هم ترکیب می‌شوند، ریزساختار به دست آمده دارای یک شکل صفحه مانند ناسازگار و نامنظم است که مکان‌های فعال بسیاری را با سطح ویژه بیشتر برای فرایندهای فوتوکاتالیزی ارائه می‌دهد. علاوه بر این، ساختار تشکیل شده توسط CN و CoAl-LDH یک اتصال ناهمگون الکترونیکی مناسب را ارائه می‌دهد که می‌تواند به طور قابل توجهی نوترکیبی حامل‌های بار را سرکوب کند و پاسخ فوتوکاتالیزی را افزایش دهد (۶۷).

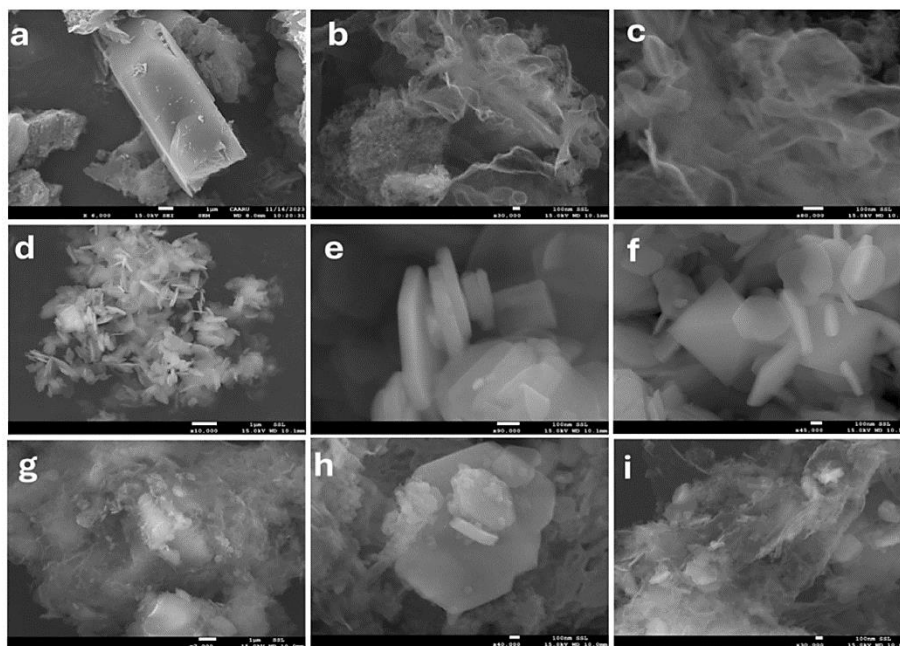
(HRTEM) از N-ZO/CN نیز برای درک بهتر به دست آمد. با توجه به تصاویر یک ساختار نانوصفحه متخلخل مانند را می‌توان در شکل ۴ (a و b) مشاهده کرد که به CN نسبت داده شده است. علاوه بر این، حاشیه‌های شبکه با ۰/۲۴۸ نانومتر در شکل ۴ (c)، الگوی تبدیل فوریه‌ی سریع (FFT) مرتبط و تصویر FFT معکوس در قسمت داخلی شکل ۴ (d) وصل شده است. این حاشیه‌های مربوط به صفحه (۱۰۱)، وجود نانومیل‌های N-ZO را تأیید می‌کند. طیف‌سنجی UV-Visible و فوتولومینسانس برای بررسی خواص نوری، محاسبه کاف نوار، توانایی تخریب فوتوکاتالیزی MB در اثر تابش خورشید برای ماده سنتز شده را نشان می‌دهد. نتیجه فوتوکاتالیزی در طول ۶۰ دقیقه، تخریب ۹۸، ۹۲/۵، ۷۹/۸، ۷۷/۶ درصد و ۳۵ درصد به ترتیب توسط N-ZO، N-ZO/CN، CN، ZO/CN و ZO را نشان داد. نتایج حاکی از آن است که تخریب با استفاده از N-ZnO/g-C₃N₄ ۲/۸ و ۱/۲ برابر بیشتر نسبت به ZnO و g-C₃N₄ است. این افزایش قابل توجه را می‌توان به اتصال ناهمگون N-ZnO/g-C₃N₄ نسبت داد، که جداسازی و انتقال بار کارآمد را تسهیل کرد. علاوه بر این، آزمون پایداری برای ۸ چرخه با تجزیه و تحلیل XRD و FTIR ارائه شده است. این آزمون‌ها پایداری استثنایی و قابلیت استفاده مجدد کامپوزیت N-ZnO/g-C₃N₄ را نشان داد. ماریدوارو و همکارانش در سال ۲۰۲۴ (۶۷)، یک فوتوکاتالیست متشکل از کربن نیتريد گرافیتی (CN) و CoAl-LDH در یک سوسپانسیون متانولی برای حذف آلاینده‌های آب را سنتز کردند. سپس برای بررسی تاثیر بر تخریب آلاینده رنگزای بریلیانت بلک



شکل ۴: تصاویر HRTEM از N-ZO/CN در (a) ۵۰ نانومتر، (b) ۲۰ نانومتر، (c) ۵ نانومتر با (d) FFT مربوطه و تصویر FFT معکوس در داخل (۶۶).
Figure 4: HRTEM images of N-ZO/CN at (a) 50 nm, (b) 20 nm, (c) 5 nm with (d) corresponding FFT and inverse FFT image inset (66).

² Maridevaru

¹ Fast Fourier Transform



شکل ۵: تصاویر FE-SEM از (a-c) نانوصفحات $g-C_3N_4$ ، (d-f) نانوصفحات CoAl-LDH، و (g-i) فوتوکاتالیست‌های نانوکامپوزیتی 5-CACN (۶۷).
Figure 5: FE-SEM images of (a-c) $g-C_3N_4$ nanosheets, (d-f) CoAl-LDH nanoplates, and (g-i) 5-CACN nanocomposite photocatalysts (67).

فوتوکاتالیست‌های فعال سنتز کردند. فازهای بلوری و بی‌شکل نانوکامپوزیت‌های حاوی MWCNTs و GCN هر دو با تجزیه و تحلیل XRD تأیید شدند، که همچنین نشان داد شدت الگوهای پراش MWCNT با افزایش غلظت GCN افزایش می‌یابد. با استفاده از طیف‌سنجی FT-IR، گروه‌های عاملی سطحی مواد مورد ارزیابی قرار گرفتند. با توجه به شکل ۷، تصاویر TEM تأیید کردند که نانوصفحات GCN به MWCNT‌ها متصل شده‌اند. رنگزا کریستال ویولت (CV) در حضور نور خورشید به صورت فوتوکاتالیزی تجزیه شد و اثرات هم‌افزایی GCN و MWCNT مورد بررسی قرار گرفت. MWCNTs/GCN NCs با بازده تخریب ۹۹/۳۲ درصد، بهترین فعالیت فوتوکاتالیزی با تابش نور خورشید را برای تخریب رنگزا کریستال ویولت (CV) نشان دادند.

۳-۲- ساخت نانومیل‌های کربن نیتريد گرافیتی و تاثیر بر عملکرد آن در حذف رنگزاهای

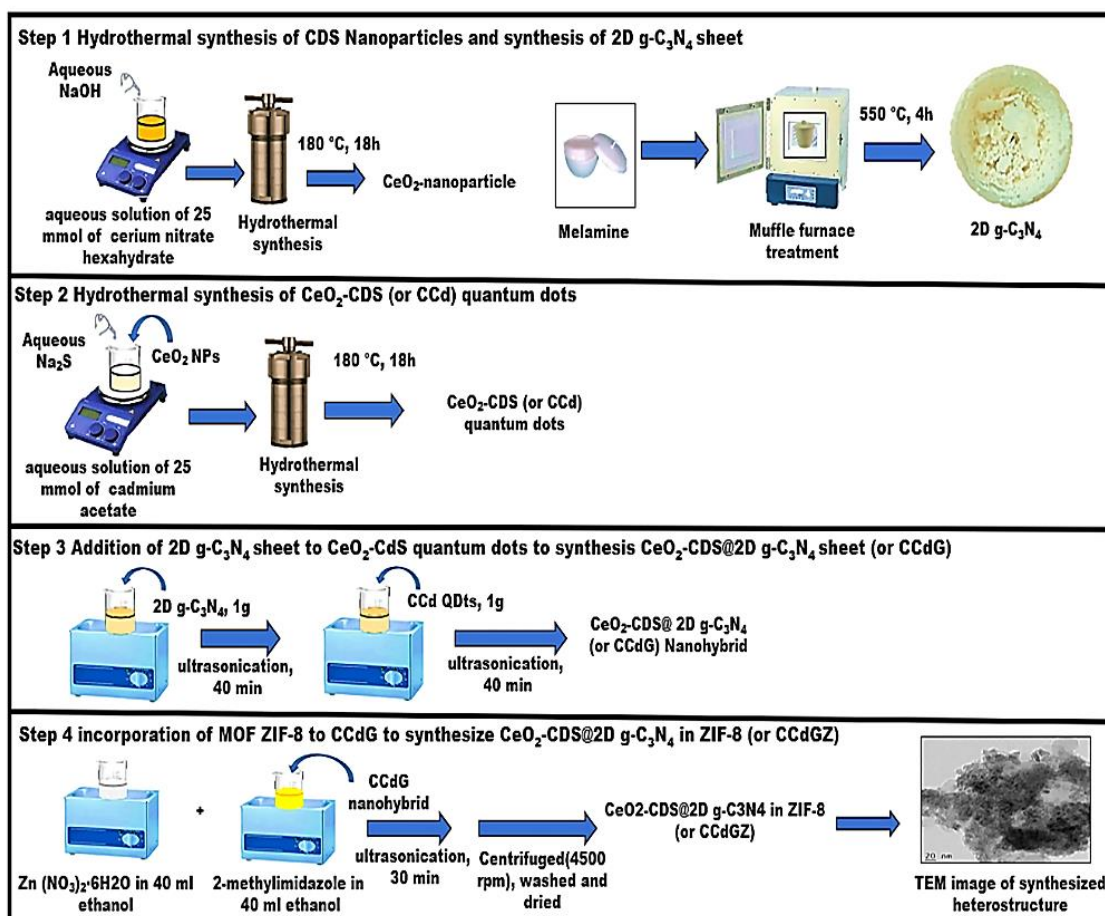
با توجه به کاف نوار مناسب و پایداری بالا، $g-C_3N_4$ می‌تواند گزینه امیدوار کننده برای تخریب فوتوکاتالیزی آلاینده‌ها باشد (۷۰). با این حال $g-C_3N_4$ ، اشکالات ذاتی از جمله ترکیب سریع بار و انتشار جرم ضعیفی را دارد (۷۱). برای افزایش کارایی $g-C_3N_4$ ، نانوساختارهای یک بعدی نقش مهمی در فعالیت فوتوکاتالیزی دارند.

نمونه با ۵ درصد وزنی CoAl-LDH@ $g-C_3N_4$ (5-CACN) به عنوان موثرترین کاتالیست شناخته شد و کارایی حذف رنگزا از طریق تخریب فوتوکاتالیزی را تا ۷۹ درصد نشان داد. گوپتا^۱ و همکارانش در سال ۲۰۲۴ (۶۸)، یک مسیر مصنوعی هیدروترمال طبق شکل ۶ را برای ساخت فوتوکاتالیست $CCdGZ @ ZIF8 / CeO_2 / CdS / g-C_3N_4$ (CCdGZ) که از نانوصفحات $g-C_3N_4$ استفاده شده است را انجام دادند تا مجموعه‌ای از رنگزاهای خطرناک را از جریان‌های پساب حذف کنند. آزمون‌های مربوط به ساختار، ریخت و عنصری، سنتز فوتوکاتالیست CCdGZ را مورد تأیید قرار دادند. پاسخ‌های نوری فوتوکاتالیست استفاده از طیف‌سنجی UV-vis و روش طیف‌سنجی بازتابش UV-DRS (Diffuse UV-DRS) مورد بررسی قرار گرفت. با تابش نور مرئی، فوتوکاتالیست CCdGZ رنگزا ویکتوریا آبی R (VBR) را در مدت ۵۵ دقیقه به میزان ۹۶/۵۴ درصد تخریب کرد. با نور، مقدار بالایی از رادیکال‌های $O_2^{\bullet-}$ و $OH^{\bullet}$ تولید شد، بنابراین کامپوزیت CCdGZ رنگزا VBR را سریع‌تر از $g-C_3N_4$ و CdS تجزیه کرد. همچنین CCdGZ قابلیت استفاده مجدد را تا ۹۰ درصد تا اجرای چرخه پنجم نشان داد.

هاریکریشن^۲ و همکارانش در سال ۲۰۲۴ (۶۹)، نانوکامپوزیت نانولوله‌های کربنی چند جداره (MWCNTs) / $g-C_3N_4$ (GCN) را توسط یک فرایند هیدروترمال به کمک فراصوت برای تولید

² Harikrishnan

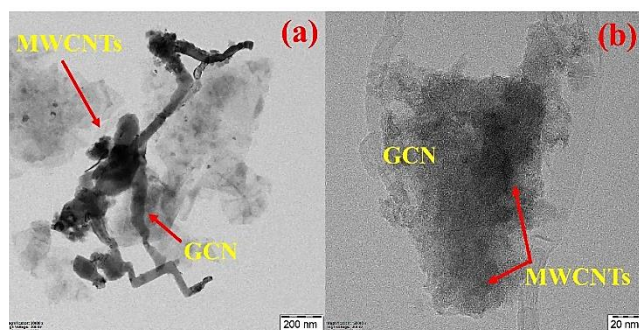
¹ Gupta



شکل ۶: مراحل ساخت $CeO_2-CdS@2D g-C_3N_4$ in ZIF8 (CCdGZ).

Figure 6: Stepwise fabrication of $CeO_2-CdS@2D g-C_3N_4$ in ZIF8 (or CCdGZ) heterostructure (68).

فریت نیکل ($NiFe_2O_4$)، فریت کبالت ($CoFe_2O_4$)، Fe_3O_4 و Fe_2O_3 به $g-C_3N_4$ به دلیل خاصیت مغناطیسی آنها، توجه زیادی را جلب کرده‌اند. رفتار مغناطیسی مواد به جداسازی آسان با یک میدان مغناطیسی خارجی کمک می‌کند و یک مزیت برای فرایند فوتوکاتالیزی محسوب می‌شود (۷۳، ۵۸). در تحقیقی، نبی و همکاران در سال ۲۰۲۰ (۷۴)، نانومیله‌های $g-C_3N_4$ را برای تجزیه فوتوکاتالیزی متیلن بلو، متیل اورانژ و رودامین-B با نور مرئی سنتز کردند. نانومیله‌های $g-C_3N_4$ با استفاده از ملامین و روش هیدروترومال سنتز شده‌اند و با طیف گسترده‌ای از روش‌های مشخصه‌یابی مانند XRD، SEM، EDX، PL و FTIR مورد بررسی قرار گرفتند. اثر آنها بر تخریب رنگ‌های آلی مذکور همراه با بررسی تاثیر عوامل pH مورد مطالعه قرار گرفت. بازده فعالیت فوتوکاتالیزی نمونه‌ها نشان داده است که در مقادیر pH از صفر تا پنج و از هشت تا دوازده، نانومیله‌های $g-C_3N_4$ کارایی بهتری برای تخریب رنگ‌های رودامین بی دارند. علاوه بر این، نشان دادند که $g-C_3N_4$ پایداری خوبی برای عملکرد فوتوکاتالیزی نسبت به رنگ‌های مذکور دارد. همچنین مشاهده شد که رادیکال سوپراکسید ($O_2^{\bullet-}$) و حفره‌ها (h^+)



شکل ۷: تصاویر TEM از NC های ترکیبی MWCNTs/GCN با

بزرگنمایی‌های مختلف (الف) ۲۰۰ نانومتر، (ب) ۲۰ نانومتر (۶۹).

Figure 7: TEM images of amphiphilic MWCNTs/GCN hybrid NCs with various magnifications (a) 200 nm, (b) 20 nm (69).

عملکرد فوتوکاتالیستی افزایش یافته نانومیله $g-C_3N_4$ ناشی از نرخ کم نوترکیبی جفت‌های الکترون/حفره می‌باشد. همچنین ریخت نانومیله‌های $g-C_3N_4$ برای بهبود مکان‌های فعال سطح مفید است (۷۲). افزودن مواد مغناطیسی از جمله فریت مس ($CuFe_2O_4$)، فریت روی ($ZnFe_2O_4$)،

درصد حذف رنگزا متیل اورانژ را نشان داد. جانگ^۴ و همکاران در سال ۲۰۱۹ (۸۰)، طی یک واکنش پلیمریزاسیون حرارتی یک مرحله‌ای، نانولوله‌های $g-C_3N_4$ را با استفاده از بلورهای ملامین سنتز کردند. یون‌های فلزات واسطه (Fe^{+3} , Co^{+2} , Ni^{+2} و Mn^{+2}) برای اولین بار برای رشد بلورهای ملامین استفاده شدند. نمونه (Fe^{+3} -R-650 CN) به عنوان نانولوله‌های $g-C_3N_4$ با یون‌های Fe^{+3} بهترین عملکرد فوتوکاتالیزی را در تخریب فوتوکاتالیزی رودامین B نشان داد. نتایج نشان داد که مقدار تخریب رنگزا توسط نمونه مذکور دو برابر بیشتر از $g-C_3N_4$ توده بوده است. چانگ^۵ و همکاران در سال ۲۰۱۹ (۸۱)، یک فوتوکاتالیست مبتنی بر نانولوله متخلخل $g-C_3N_4$ که با نانوذرات سولفید کادمیوم (CdS) اصلاح شد را توسط روش هیدروترمال ساختند. ساختار متخلخل یک بعدی $g-C_3N_4$ با سطح ویژه بالاتر، جذب نور را افزایش داده و عملکرد جداسازی و انتقال بهتر حامل‌های بار را فراهم می‌کند، که همگی به طور هم‌افزایی به فعالیت فوتوکاتالیزی برتر مشاهده شده کمک کرد. نانولوله‌های $g-C_3N_4$ تقریباً ۵۹/۲ درصد از رنگزا را در مدت ۶۰ دقیقه پس از تابش تخریب کرد. لیا^۶ و همکارانش در سال ۲۰۲۱ (۸۲)، طی یک روش ساده تک‌مرحله‌ای رسوب شیمیایی بخار به $g-C_3N_4$ لوله‌ای اجازه دادند تا بر روی چارچوب کربن رشد کند. با توجه به سطح ویژه بالای $g-C_3N_4$ لوله‌ای، افزایش جذب نور مرئی مشاهده شد. اثرات دوگانه جذب استاتیک و تجزیه نوری، چارچوب $g-C_3N_4$ / کربن را قادر می‌سازد تا به سرعت حدود ۹۸ درصد متیلن بلو را در مدت زمان ۱۸۰ دقیقه حذف کند. زی^۷ و همکارانش در سال ۲۰۱۹ (۸۳)، ابتدا نانولوله‌های هیبریدی $g-C_3N_4$ را ساختند و سپس ذرات کلرید نقره ($AgCl$) را با اندازه متوسط ۲۰ نانومتر به طور یکنواخت بر روی سطح نانولوله $g-C_3N_4$ به استفاده از رسوب فراصوت درج‌اقرار دادند. عملکرد فوتوکاتالیزی آن جهت تخریب رنگزا رودامین بی تحت تابش نور مرئی مورد بررسی قرار داده و بازده تخریب تا ۹۲/۲ درصد حاصل شد. علاوه بر این، مدل سینتیک شبه مرتبه اول برای تجزیه نوری رنگزا به دست آمد. حبیبی و کریمی در سال ۲۰۲۳ (۸۴)، برای تقویت تخریب نوری آلاینده‌های آلی از جمله متیلن بلو و متیل اورانژ، نانوکامپوزیت لوله‌ای مزوحفره (FCN) ($g-C_3N_4/\gamma-Fe_2O_3$) را سنتز کردند. داده‌های FTIR و XRD وجود نانوذرات ($\gamma-Fe_2O_3$) روی نانولوله‌های $g-C_3N_4$ را ثابت کردند. FCN بالاترین نرخ فعالیت را نسبت به تخریب نوری متیلن بلو و متیل اورانژ با بازده ۹۶/۱ و ۹۸/۳ به ترتیب نشان داد که نشان‌دهنده مکان‌های فعال بیشتر و افزایش جذب مولکول‌های هدف است.

خلاصه نتیجه تحقیقات پیشین در زمینه حذف رنگزا توسط نانوساختارهای $g-C_3N_4$ با استفاده از فرایندهای فوتوکاتالیزی و جذب سطحی در جداول ۱ و ۲ ارائه شده است.

نقش عمده‌ای در تخریب رنگزاها ایفا کرده‌اند. در تحقیقی دیگر توسط لو^۱ و همکارانش در سال ۲۰۱۹ (۵۸)، جهت سنتز نانومیله‌های $g-C_3N_4$ ، ۳۰ میلی‌لیتر از محلول $g-C_3N_4$ به ۷۵ میلی‌لیتر محلول KOH اضافه شد. سپس ۵ mol/L اسید نیتریک اضافه شد تا pH به ۵ برسد. پیش‌ماده به دست آمده را با آب دیونیزه شده شسته‌شده و آن را خشک کردند. سپس نانومیله‌های $g-C_3N_4$ پس از گرم کردن پیش‌ماده در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴ ساعت سنتز شد. با توجه به نتایج، سطح ویژه نانومیله $g-C_3N_4$ برابر با $60/95 \text{ m}^2/\text{g}$ و سطح ویژه $g-C_3N_4$ در حالت توده برابر با $18/22 \text{ m}^2/\text{g}$ است. سطح ویژه $g-C_3N_4$ در حالت نانومیله $7/4$ برابر بیشتر از سطح ویژه در حالت توده می‌باشد. با توجه به نتایج عملکردی، ظرفیت جذب متیلن‌بلو توسط $g-C_3N_4$ توده برابر با mg g^{-1} و $2/64 \text{ g}^{-1}$ توسط نانومیله‌های $g-C_3N_4$ برابر با $17/71 \text{ m}^2/\text{g}$ بوده است. ظرفیت جذب نانومیله $g-C_3N_4$ برابر نسبت به $g-C_3N_4$ توده بیشتر است. بنابراین ظرفیت جذب به دلیل افزایش سطح ویژه نانومیله‌ها بیشتر شده است.

اخیراً، نانوصفحات دو بعدی به دلیل ویژگی‌های ساختاری منحصر به فرد خود مانند سطح ویژه بالا و فاصله کوتاه برای انتقال بار، پتانسیل زیادی در تجزیه و تحلیل فوتوکاتالیزی نشان داده‌اند. با در نظر گرفتن ساختار گرافیتی لایه‌ای $g-C_3N_4$ توده، لایه‌برداری $g-C_3N_4$ برای تشکیل نانوصفحات $g-C_3N_4$ راهی امیدوارکننده برای بهبود فعالیت فوتوکاتالیزی آن است (۷۵). نانوصفحات $g-C_3N_4$ با فعالیت فوتوکاتالیزی برجسته حاصل از سطح منحصربه‌فرد و خصوصیات الکترونیکی آن، توسط لایه‌برداری فاز مایع، حرارتی و قلیایی به دست آمده است (۷۶). با این وجود، نانوصفحات $g-C_3N_4$ محدودیت‌هایی دارند، از جمله توانایی جذب نور ضعیف آن به دلیل اثر حبس کوانتوم در واکنش فوتوکاتالیزی، که کاربرد عملی آنها برای تبدیل انرژی خورشیدی را مهار می‌کند. بنابراین، بهینه‌سازی خصوصیات نوری و فیزیکی و شیمیایی نانوصفحات $g-C_3N_4$ برای به دست آوردن فعالیت تکامل فوتوکاتالیزی بالاتر H_2 بسیار مطلوب است. نانولوله‌های $g-C_3N_4$ به دلیل توانایی جلوگیری از تجمع کنترل نشده نانوصفحات، توجهات بیشتری را به خود جلب کرده است. علاوه بر این، ساخت نانولوله‌های $g-C_3N_4$ دارای برخی مزایای منحصر به فرد، از جمله افزایش جذب نور مرئی و توانایی پراکندگی، مسیرهای انتقال بار بهتر در واکنش فوتوکاتالیزی است (۷۷، ۷۸). در تحقیقی توسط همتی و همکارانش در سال ۲۰۲۱ (۷۹)، فوتوکاتالیست دی‌آنتیوان مولیبدات (Sb_2MoO_6) با نانولوله‌های $g-C_3N_4$ (GCN) (نانولوله) با روش تقطیر برگشتی ساده گزارش شد. از آن برای تخریب رنگزاهای رودامین بی، فوشین و متیل اورانژ استفاده شد. با تحریک نور مرئی، نانولوله GCN / Sb_2MoO_6 نسبت به $g-C_3N_4$ فعالیت بیشتری نشان داد. نانولوله‌های $g-C_3N_4$ با فرایند فوتوکاتالیزی ۵۳

⁴ Li⁵ Xie⁶ In-situ ultrasonic precipitation¹ Luo² Jiang³ Chong

جدول ۱: خلاصه نتیجه تحقیقات پیشین در زمینه حذف رنگ‌ها توسط نانوساختارهای $g-C_3N_4$ با استفاده از فرایند فوتوکاتالیزی.

Table 1. Summary results of previous research in the field of dyes removal by $g-C_3N_4$ nanostructures using the photocatalytic process.

NO	Year	$g-C_3N_4$ Structure	Synthesis method	Pollutant	Efficiency	Ref.
1	2017	Nanosheet	Chemical	Rhodamine B	98%	(64)
2	2018	Nanosheet	Thermal	Methylene blue	61.9 mg/g	(60)
3	2018	Nanotubes	Ultrasonication	Rhodamine B	92.2%	(83)
4	2019	Nanotubes	Thermal polymerizing	Rhodamine B	2 times $g-C_3N_4$	(80)
5	2019	Nanotubes	Hydrothermal	Rhodamine B	59.2%	(81)
6	2020	Nanosheet	Ultrasonication	Organic Dyes	90% <	(63)
7	2020	Nanorod	Hydrothermal	Methylene blue, Methylene orange and Rhodamine B	97% 99% 99.9%	(74)
8	2021	Nanotubes	Reflux	Methylene orange	53%	(79)
9	2021	Nanotubes	CVD	Methylene blue	98%	(82)
10	2023	Nanotubes	Thermal polymerizing	Methylene blue and Methylene orange	96.1% 98.3%	(84)
11	2023	Nanosheet	Thermal	Red 227 and Black 166	91.5% 77.6%	(65)
12	2024	Nanosheet	Hydrothermal	Methylene blue	98%	(66)
13	2024	Nanosheet	sonicating	Brilliant Black	79%	(67)
14	2024	Nanosheet	Hydrothermal	Victoria blue R	96.54%	(68)
15	2024	Nanosheet	Hydrothermal	Crystal violet	99.32%	(69)
16	2024	bulk	Thermal	MB RhB MO	MB < RhB < MO	(32)

جدول ۲: خلاصه نتیجه تحقیقات پیشین در زمینه حذف رنگ‌ها توسط نانوساختارهای $g-C_3N_4$ با استفاده از فرایند جذب سطحی.

Table 2. Summary results of previous research in the field of dyes removal by $g-C_3N_4$ nanostructures using the adsorption process.

NO	Year	$g-C_3N_4$ Structure	Synthesis method	Pollutant	Adsorption Capacity	Ref.
1	2017	Nanosheet	Thermal	Methylene blue and Cd^{2+}	42.1 mg/g	(61)
2	2018	Nanosheet	Thermal	Methylene blue	61.9 mg/g	(60)
3	2019	Nanosheet	Hummers	Organic dyes and Tetracycline	70-600 mg/g	(62)
4	2019	Nanorod	Thermal	Methylene blue	17.71 mg/g	(58)
5	2023	Nanosheet	Thermal	Methylene blue	54.3 mg/g	(18)
6	2024	bulk	Thermal	MB RhB MO	MB < RhB < MO	(32)

۴- نتیجه‌گیری

ته‌نشینی، تبادل یونی و جذب سطحی صورت می‌گیرد. در میان روش‌های مختلف حذف آلاینده‌ها، جذب سطحی و تخریب فوتوکاتالیزی به دلیل بازده بالا، سادگی و قابلیت استفاده گسترده،

ورود آلاینده‌های آلی، به‌ویژه مواد رنگ‌زا، به محیط‌زیست چالش بزرگی برای سلامت انسان و اکوسیستم‌ها ایجاد کرده است. حذف آلاینده‌ها توسط فرایندهای متفاوتی از جمله فوتوکاتالیزی، اسمز معکوس،

جهت توسعه راهکارهای کارآمدتر برای حذف آلاینده‌های مقاوم و بررسی تأثیر شرایط عملیاتی (شدت نور، نوع آلاینده‌ها و pH) بر عملکرد نانوساختارهای $g-C_3N_4$ تمرکز کنند. این پژوهش، با ارائه درکی جامع از مزایا و چالش‌های $g-C_3N_4$ ، مسیر را برای طراحی و توسعه نانومواد نوین با کارایی بالاتر در حذف آلاینده‌های محیطی هموار می‌کند.

تشکر و قدردانی

بدینوسیله از حمایت‌های دانشگاه سمنان که ما را در انجام این تحقیق یاری کردند، صمیمانه تشکر می‌کنم.

تعارض منافع:

هیچ گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

مورد توجه ویژه قرار گرفته‌اند. کربن نیتريد گرافیتی ($g-C_3N_4$) به عنوان یک نیمه رسانای پلیمری بدون فلز، به دلیل فعالیت در زیر نور مرئی با کاف نوار مناسب، غیر سمی بودن، پایداری شیمیایی بالا و روش‌های آماده‌سازی راحت به عنوان یکی از مواد جاذب و فوتوکاتالیزی منتخب شناخته می‌شود و به دلیل سنتز آسان، بزرگ بودن مساحت سطح و پایداری خیلی خوب مورد توجه قرار گرفته است. با این حال، خاصیت ضعیف $g-C_3N_4$ در مقیاس توده، کاربرد های آن را محدود می‌کند. روش‌های مختلفی مانند دوپ کردن، تغییر ریخت و ترکیب مواد برای غلبه بر این نقص‌ها اتخاذ شده‌اند. نتایج تحقیقات پیشین نشان دادن که نانوساختارهای (نانوصفحات، نانولوله‌ها، نانومیله‌ها و غیره) کربن نیتريد گرافیتی و همچنین ترکیب نانوساختارهای کربن نیتريد گرافیتی یا کربن نیتريد گرافیتی توده با مواد دیگر باعث بهبود و افزایش عملکرد فرایندهای جذب و فوتوکاتالیزی نسبت به حالت توده شده است. با توجه به یافته‌های این مطالعات، تحقیقات آینده می‌توانند بر مواردی از جمله: مطالعه برهم‌کنش نانوساختارهای $g-C_3N_4$ با آلاینده‌های پیچیده‌تر

۵- مراجع

- Chen Z, Zhang S, Liu Y, Alharbi NS, Rabah SO, Wang S, et al. Synthesis and fabrication of $g-C_3N_4$ -based materials and their application in elimination of pollutants. *Sci Total Environ*. 2020;731:139054. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139054>.
- Lanjwani MF, Tuzen M, Khuhawar MY, Saleh TA. Trends in photocatalytic degradation of organic dye pollutants using nanoparticles: A review. *Inorg Chem Commun*. 2024;159: 111613. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2023.111613>.
- Sumethra R, Jayakumari T, Anuradha N, Ravichandran K, Varshini M, Ayyanar M, et al. Effect of nanocomposite partnering of $g-C_3N_4$ with Morinda pubescens leaf extract mediated Sr doped Ni/NiO on the photocatalytic dye detoxification: Confirmation by seed germination test. *Diam Relat Mater*. 2024;150: 111716. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2024.111716>.
- Jalalian T, Keramati N, Fallah N. A review of reduced electron/hole recombination in coupled photocatalysts for dyes degradation. *J Stud Color World*. 2023;12(4): 293–314. <https://doi.org/10.1001.1.22517278.1401.12.4.1.2> [In Persian].
- Gharagozlou M, Mohammadsadegh A. Smart nanocomposites of metal-organic framework (mof) and their applications in removing dye and environmental pollutants. *J Stud Color World*. 2024;14(2): 87–101. <https://doi.org/10.30509/jscw.2023.81974> [In Persian].
- Shiri M, Hosseinzadeh M, Javanshir S, Shiri S. Synthesis of MOF-5 / cellulose aerogel composite and investigation of its performance in removing methylene blue dye. *J Stud Color World*. 2024;14(3):193–203. <https://doi.org/10.30509/jscw.2024.167288.1188> [In Persian].
- Hosseini Naeini A, Kalaei MR, Moradi O, Mahmoodi NM. Investigating factors affecting the removal of dyestuff from wastewater using different nanocomposites: a review Study. *J Stud Color World*. 2023;12(4):343–368. <https://doi.org/10.1001.1.22517278.1401.12.4.4.5> [In Persian].
- Keerthana S, Yuvakkumar R, Ravi G, Kungumadevi L, Ravi Sankar V. Hydrothermal synthesis of $CeVO_4/g-C_3N_4$ Z-scheme photocatalyst for removal of dyes under photocatalysis. *Inorg Chem Commun*. 2024;168:112928. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2024.112928>.
- Khezami L, Bessadok A, Ali Ben Aissa M, Ahmed AH, Modwi A, Benhamadi N, et al. Revolutionizing dye removal: $g-C_3N_4$ -Modified ZnO nanocomposite for exceptional adsorption of basic fuchsin dye. *Inorg Chem Commun*. 2024;164: 112413. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2024.112413>.
- Upadhyay GK, Purohit LP, Sharma H, Jain N, Sharma SK. Z-scheme based photoactive $ZnO:TiO_2: CdO:g-C_3N_4$ nanocomposites for advance oxidation process. *J Mol Struct*. 2025;1319:139366. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2024.139366>.
- YarAhmadi G, Keramati N. Reduced electron/hole recombination in Z-scheme nanostructure of zeolitic imidazolate framework-11/graphitic carbon nitride as photocatalyst under visible light. *Sci Rep*. 2023;13(1): 22547. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-49315-7>.
- Lakayan S, Baharlouei A, Jalilnejad E. Application of Agricultural Wastes as Natural Adsorbent for Removal of Industrial Dyes Graphical abstract. *J Stud Color World*. 2016;6(4): 27–43. <https://doi.org/10.1001.1.22517278>.

- 1395.6.4.4.3[In Persian].
13. karimi zahra, Allahverdi A, Oshani F. Investigation on the Removal of Dyes from Wastewater Using Alumina Composite Nano Adsorbent. *J Stud Color World*. 2020;10(2): 41–59. <https://doi.org/20.1001.1.22517278.1399.10.2.4.7>[In Persian].
 14. Mortazavi Milani SH, Sabbagh Alvani AA, Salimi R, Sameie H. The Study of Methods for the Degradation of Organic Dyes by Photocatalytic Nanoparticles Using Plasmonic Property. *J Stud Color World*. 2019;9(2): 1–8. <https://doi.org/20.1001.1.22517278.1398.9.2.2.8>[In Persian].
 15. Farzaneh Kondori F, Badii K, Masoomi M. Study of Dyes Removal from Industrial Wastewaters by Nano Adsorbents. *J. Stud. Color World*. 2012;2(1): 1. <https://doi.org/https://dorl.net/dor/20.1001.1.22517278.1391.2.1.6.1>[In Persian].
 16. Saadati F, Keramati N, Ghazi MM. Influence of parameters on the photocatalytic degradation of tetracycline in wastewater: A review. *Crit Rev Environ Sci Technol*. 2016;46(8):757–782. <https://doi.org/10.1080/10643389.2016.1159093>.
 17. Hassan AE, Elewa AM, Hussien MSA, EL-Mahdy AFM, Mekhemer IMA, Yahia IS, et al. Designing of covalent organic framework/2D $g-C_3N_4$ heterostructure using a simple method for enhanced photocatalytic hydrogen production. *J. Colloid Interface Sci*. 2024;653: 1650–1661. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2023.10.010>.
 18. Farhadi H, Keramati N. Investigation of kinetics, isotherms, thermodynamics and photocatalytic regeneration of exfoliated graphitic carbon nitride/zeolite as dye adsorbent. *Sci Rep*. 2023;13(1): 14098. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-41262-7>.
 19. Al-Zawahreh K, Barral MT, Paradelo R. Overview of factors to take into account when selecting high-grade dye adsorbents. *Environ. Technol. Rev*. 2024;13(1): 597–613. <https://doi.org/10.1080/21622515.2024.2404650>.
 20. Sakkaki M, Arab SM. Non-catalytic applications of $g-C_3N_4$: A brief review. *Synth Sinter*. 2022;2(4): 176–180. <https://doi.org/10.53063/synsint.2022.24126>.
 21. Barveen NR, Parasuraman B, Wang PY, Zeng CW, Cheng YW, Thangavelu P. Facile construction of $ZnWO_4/g-C_3N_4$ heterojunction for the improved photocatalytic degradation of MB, RhB and mixed dyes. 2024;53(2): 105039. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2024.105039>.
 22. Akram MY, Ashraf T, Tong L, Yin X, Dong H, Lu H. Architecting high-performance photocatalysts: A review of modified 2D/2D graphene/ $g-C_3N_4$ heterostructures. *J. Environ. Chem. Eng*. 2024;12(5): 113415. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.113415>.
 23. Baran NY, Çalışkan M, Kızılbulut N, Baran T. Pd@Na-CMC/ $g-C_3N_4$: A nanostructured catalyst system based on sodium carboxymethyl cellulose/graphitic carbon nitride hydrogel beads and its performance in the treatment of organic and inorganic pollutants in water. *Int. J. Biol. Macromol*. 2024;276: 134001. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.134001>.
 24. Zhang H, Zhang J, Chen W, Tao M, Meng X, Zhang Y, et al. Insight into structure evolution of carbon nitrides and its energy conversion as luminescence. 2024;6(2): 134001. <https://doi.org/10.1002/cey2.463>.
 25. Yurova VY, Potapenko KO, Aliev TA, Kozlova EA, Skorob E V. Optimization of $g-C_3N_4$ synthesis parameters based on machine learning to predict the efficiency of photocatalytic hydrogen production. *Int J Hydrogen Energy*. 2024;81: 193–203. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.07.245>.
 26. Khan MA, Mutahir S, Shaheen I, Qunhui Y, Bououdina M, Humayun M. Recent advances over the doped $g-C_3N_4$ in photocatalysis: A review. *Coord. Chem. Rev*. 2025;522: 216227. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2024.216227>.
 27. Joy J, George E, Poornima Vijayan P, Anas S, Thomas S. An overview of synthesis, morphology, and versatile applications of nanostructured graphitic carbon nitride ($g-C_3N_4$). *J Ind Eng Chem*. 2024;133: 74–89. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2023.12.016>.
 28. Gaddam SK, Pothu R, Boddula R. Graphitic carbon nitride ($g-C_3N_4$) reinforced polymer nanocomposite systems—A review. *Polym. Compos*. 2020;41(2): 430–442. <https://doi.org/10.1002/pc.25410>.
 29. Kumar R, Gokul S, Ran F, Sambasivam S, Alrashidi KA, Thangappan R. Green synthesis of $g-C_3N_4$ decorated with SnO_2 nanocomposites using a novel Ananas comosus crown extract for boosted performance of asymmetric supercapacitors. *J Energy Storage*. 2024;98: 113231. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.113231>.
 30. Saman F, Se Ling CH, Ayub A, Rafeny NHB, Mahadi AH, Subagyo R, et al. Review on synthesis and modification of $g-C_3N_4$ for photocatalytic H_2 production. *Int. J. Hydrogen Energy*. 2024;77: 1090–1116. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.06.212>.
 31. Xiang-Xue W, Xing L, Jia-Qi W, Hong-Tao Z. Recent Advances in Carbon Nitride-Based Nanomaterials for the Removal of Heavy Metal Ions from Aqueous Solution. *J Inorg Mater*. 2019;35(3): 436. <https://doi.org/10.15541/jim20190436>.
 32. Claudino CH, Scola Rodrigues B, Marinho Factori I, dos Santos de Souza J. Microwave Synthesis of ($g-C_3N_4$)- $BiVO_4$: Selective Adsorption and Photocatalytic Activity Towards Dye Degradation. 2024;9(12): e202400076. <https://doi.org/10.1002/slct.202400076>.
 33. Ismael M. Construction of novel Ru-embedded bulk $g-C_3N_4$ photocatalysts toward efficient and sustainable photocatalytic hydrogen production. *Diam Relat Mater*. 2024;144: 111024. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2024.111024>.
 34. Kalidasan K, Mallapur S, Munirathnam K, Nagarajaiah H, Reddy MBM, Kakarla RR, et al. Transition metals-doped $g-C_3N_4$ nanostructures as advanced photocatalysts for energy and environmental applications. *Chemosphere*. 2024;352: 141354. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141354>.
 35. Dong Z, Yang T, Ullah I, Irshad N, Xue S. The influence of morphological changes on the physicochemical and optical properties of $g-C_3N_4$. *Ceram Int*. 2024;50(10): 17882–17889. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.02.276>.
 36. Malebadi KA, Seheri NH, Ojelere O, Onwudiwe DC. ZnO nanoparticles modified with $g-C_3N_4$: Optical and structural properties. *Mater. Sci Eng. B*. 2024;310: 117676. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2024.117676>.
 37. Swathi S, Yuvakkumar R, Ravi G, Arunmetha S, Arun A, Velauthapillai D. Bayberry-like Cu_3BiS_3 with 2D layered nanosheets of rGO and $g-C_3N_4$ for effective electrochemical HER activity. *Int J Hydrogen Energy*. 2024;49: 295–308. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.07.279>.
 38. Drdanová AP, Krajčovičová TE, Gál M, Nemčková K, Imreová Z, Ryba J, et al. Unveiling Versatile Applications and Toxicity Considerations of Graphitic Carbon Nitride. *Int J Mol Sci*. 2024;25(14): 7634. <https://doi.org/10.3390>

- /ijms25147634.
39. Huang J, Klahn M, Tian X, Dai X, Rabeah J, Aladin V, et al. Exfoliated Polymeric Carbon Nitride Nanosheets for Photocatalytic Applications. *ACS Appl. Nano Mater.* 2024;7(7): 7442–7452. <https://doi.org/10.1021/acsanm.4c00133>.
40. Pei J, Li H, Zhuang S, Zhang D, Yu D. Recent Advances in $g-C_3N_4$ photocatalysts: a review of reaction parameters, structure design and exfoliation methods. *Catalysts.* 2023;13(11):1402. <https://doi.org/10.3390/catal13111402>.
41. Michalska M, Pavlovsky J, Simha Martynkova G, Kratosova G, Hornok V, Nagy PB, et al. Comparative study of photocatalysis with bulk and nanosheet graphitic carbon nitrides enhanced with silver *Sci Rep.* 2024;14(1): 11512. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-62291-w>.
42. Zhao X, Yu J, Meng T, Luo Y, Fu Y, Li Z, et al. Modulation of the microstructure and enhancement of the photocatalytic performance of $g-C_3N_4$ by thermal exfoliation. *Bull. Chem. React. Eng. Catal.* 2024;19(3): 442–454. <https://doi.org/10.9767/bcrec.20189>.
43. Jiang X, Li X, Liu Y, Zhai H, Wang G. The oxidative thermal exfoliation-dependent microstructure and photocatalytic performance of $g-C_3N_4$ nanosheets. *Diam Relat Mater.* 2024;143: 110918. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2024.110918>.
44. Chegeni M, Mousavi Z, Soleymani M, Dehdashtian S. Removal of aspirin from aqueous solutions using graphitic carbon nitride nanosheet: Theoretical and experimental studies. *Diam Relat Mater.* 2020;101: 107621. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2019.107621>.
45. Ganesan S, Kokulnathan T, Sumathi S, Palaniappan A. Efficient photocatalytic degradation of textile dye pollutants using thermally exfoliated graphitic carbon nitride (TE- $g-C_3N_4$). *Sci Rep.* 2024;14(1): 2284. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-52688-y>.
46. Plaza J, Arencibia A, López-Muñoz MJ. Optimization of thermal exfoliation of graphitic carbon nitride for methylparaben photocatalytic degradation under simulated solar radiation. *J Mater Chem. A.* 2023;11(18): 9922–9930. <https://doi.org/10.1039/D3TA01109G>.
47. Schiavo L, Cammarano A, Carotenuto G, Longo A, Palomba M, Nicolais L. An overview of the advanced nanomaterials science. *Inorganica Chim. Acta.* 2024;559: 121802. <https://doi.org/10.1016/j.ica.2023.121802>.
48. Mahi K, Elasad Zemallach Ouari K, Mostefa R. Synthesis of nanoscale spinel aluminates powder and studies of their optical and structural properties. *Phys Scr.* 2024;99(9): 95982. <https://doi.org/10.1088/1402-4896/ad6e37>.
49. Escorcia-Díaz D, García-Mora S, Rendón-Castrillón L, Ramírez-Carmona M, Ocampo-López C. Advancements in nanoparticle deposition techniques for diverse substrates: a review. 2023;13(18): 2586. <https://doi.org/10.3390/nano13182586>.
50. Altammar KA. A review on nanoparticles: characteristics, synthesis, applications, and challenges. *Front Microbiol.* 2023;14(18): 2586. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1155622>.
51. Kumari S, Raturi S, Kulshrestha S, Chauhan K, Dhingra S, Andrés K, et al. A comprehensive review on various techniques used for synthesizing nanoparticles. *J. Mater. Res. Technol.* 2023;27: 1739–1763. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.09.291>.
52. Vijayaram S, Razafindralambo H, Sun YZ, Vasantharaj S, Ghafarifarsani H, Hoseinifar SH, et al. Applications of Green Synthesized Metal Nanoparticles- a Review. *Biol Trace Elem Res.* 2024;202(1):360–386. <https://doi.org/10.1007/s12011-023-03645-9>.
53. Škriniarová J, Andok R, Kadlečíková M, Nevřela J. Problems concerning the demolding process of nano imprint lithography. In: *AIP Conf. Proc.* AIP Publishing; 2023. p. 30011. <https://doi.org/10.1063/5.0136329>.
54. Kang H, Lee D, Yang Y, Kyo Oh D, Seong J, Kim J, et al. Emerging low-cost, large-scale photonic platforms with soft lithography and self-assembly. *Photon Insight.* 2023;2(2): R04. <https://doi.org/10.3788/PI.2023.R04>.
55. Yang M, Schoop LM. Friends not foes: exfoliation of non-van der waals materials. *Acc Chem. Res.* 2024;57(17): 2490–2499. <https://doi.org/10.1021/acs.accounts.4c00295>.
56. Vega MF, Olivas C, Díaz-Faes E, Barriocanal C. Evaluation of water splitting efficiency of $g-C_3N_4$ thermally etched/exfoliated under air and CO_2 atmospheres. *Catal Today.* 2024;427: 114412. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2023.114412>.
57. Rasool Z, Athar MS, Muneer M. Construction of flake ball-shaped Bi_2WO_6 embedded on phenyl functionalized $g-C_3N_4$ nanosheet for efficient degradation insight of colorless pollutants and its biological application. *Environ Sci Pollut Res.* 2024;31(21): 31259–31272. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-33294-x>.
58. Luo W, Chen X, Wei Z, Liu D, Yao W, Zhu Y. Three-dimensional network structure assembled by $g-C_3N_4$ nanorods for improving visible-light photocatalytic performance. *Appl Catal B Environ.* 2019;255: 117761. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2019.117761>.
59. Yan Y, Meng Q, Tian L, Cai Y, Zhang Y, Chen Y. Engineering of $g-C_3N_4$ for Photocatalytic Hydrogen Production: A Review. *Int J Mol Sci.* 2024;25(16): 8842. <https://doi.org/10.3390/ijms25168842>.
60. Li DF, Huang WQ, Zou LR, Pan A, Huang GF. Mesoporous $g-C_3N_4$ Nanosheets: Synthesis, Superior Adsorption Capacity and Photocatalytic Activity. *J Nanosci Nanotechnol.* 2018;18(8): 5502–5510. <https://doi.org/10.1166/jnn.2018.15441>.
61. Cai X, He J, Chen L, Chen K, Li Y, Zhang K, et al. A 2D- $g-C_3N_4$ nanosheet as an eco-friendly adsorbent for various environmental pollutants in water. *Chemosphere.* 2017;171: 192–201. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.12.073>.
62. Yousefi M, Villar-Rodil S, Paredes JI, Moshfegh AZ. Oxidized graphitic carbon nitride nanosheets as an effective adsorbent for organic dyes and tetracycline for water remediation. *J. Alloys Compd.* 2019;809: 151783. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.151783>.
63. Zhang P, Wang F, Qin Y, Wang N. Exfoliated Graphitic Carbon Nitride Nanosheets/Gold Nanoparticles/Spherical Montmorillonite Ternary Porous Heterostructures for the Degradation of Organic Dyes. *ACS Appl. Nano Mater.* 2020;3(8): 7847–7857. <https://doi.org/10.1021/acsanm.0c01355>.
64. Miao J, Xu G, Liu J, Lv J, Wu Y. Synthesis and photocatalytic performance of $g-C_3N_4$ nanosheets via liquid phase stripping. *J. Solid State Chem.* 2017;246: 186–193. <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2016.11.028>.
65. Majidi M, Givianrad MH, Saber-Tehrani M, Azar PA. Synthesis of porous $g-C_3N_4$ nanosheets with carbon vacancies for photodegradation of direct red 227 and direct black 166 dyes in aqueous solutions. *Diam Relat Mater.* 2023;137: 110163. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2023.137>.

- 2023.110163.
66. Fareed I, Farooq M ul H, Khan MD, Yunas MF, Sandali Y, Ali Z, et al. Comprehensive investigations into the synergy of S-scheme heterojunction between nitrogen-doped ZnO nano-rods and g-C₃N₄ nanosheets for improved photocatalytic degradation. *Mater Chem Phys*. 2024;316: 129062. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2024.129062>.
 67. Maridevaru MC, Nagaveni M, Kumari MM, Shankar MV, Khraisheh M, Selvaraj R. Unravelling the efficiency of CoAl-LDH / g-C₃N₄ nanosheets: Type-II heterojunction for photocatalytic hydrogen production and dye degradation under solar light irradiation. *Int J Hydrogen Energy*. 2024;89: 1112–1125. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.09.286>.
 68. Gupta SV, Kulkarni VV, Ahmaruzzaman M. ZIF-8 incorporated CeO₂-CdS quantum dots @ 2D g-C₃N₄ nanosheets as a staggered type II heterojunction for decolouration of a set of dyes. *J Environ Chem Eng*. 2024;12(1): 111642. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.111642>.
 69. Hari Krishnan L, Alwar K, Rajaram A. Structural and morphological studies of g-C₃N₄-functionalized MWCNTs nanocomposite for sunlight-responsive photocatalytic activity. 2024;54: 105238. <https://doi.org/10.1016/j.surf.2024.105238>.
 70. Gao H, Yao Z, Chen X, Zhu M, Zhao G, Zhang S, et al. Oxygen doping induced intramolecular electron acceptor system in red g-C₃N₄ nanosheets with remarkably enhanced photocatalytic performance. 2024; <https://doi.org/10.1016/j.chphma.2024.09.001>.
 71. Surana M, Pattanayak DS, Singh VK, Pal D. g-C₃N₄ based Z-scheme photocatalysts for tetracycline degradation: A comprehensive review. *J Hazard Mater Lett*. 2024;5: 100116. <https://doi.org/10.1016/j.hazl.2024.100116>.
 72. Nguyen TB, Sherpa K, Chen CW, Chen L, Thao Ho PN, Dong CD. Enhancing photocatalytic reduction of Cr(VI) in water through morphological manipulation of g-C₃N₄ photocatalysts: A comparative study of 1D, 2D, and 3D structures. *Chemosphere*. 2024;362: 142787. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.142787>.
 73. Shanmugam P, Gopalakrishnan M, Smith SM, Luengnaruemitchai A, Kheawhom S, Boonyuen S. Enhanced photocatalytic performance of magnetically reclaimable N-doped g-C₃N₄/Fe₃O₄ nanocomposites for efficient tetracycline degradation. *Nano-Struct Nano-Objects*. 2024;40: 101392. <https://doi.org/10.1016/j.nanoso.2024.101392>.
 74. Nabi G, Malik N, Tahir MB, Tanveer M, Rafique R, Rehman S, et al. Synthesis of g-C₃N₄ nanorods for visible-light photocatalytic degradation of methylene blue, methylene orange and rhodamine-B. *Int J Environ Anal Chem*. 2022;102(19): 8503–8518. <https://doi.org/10.1080/03067319.2020.1849666>.
 75. Vijayarangan R, Mohan S, Selvaraj M, Assiri MA, Ilangoan R. Surface-engineered anisotropic g-C₃N₄ photocatalysts via green-exfoliation for visible light-driven water remediation. *Surf Interfaces*. 2024;44: 103782. <https://doi.org/10.1016/j.surf.2023.103782>.
 76. Wang J, Ren P, Zhao X, Chen Z, Jin Y, Zhang Z. Acid-alkali assisted synthesis of white tremella-like g-C₃N₄ homojunction for photocatalytic degradation under visible light. *Mater Res Bull*. 2024;171: 112619. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2023.112619>.
 77. Li S, Peng Y, Hu C, Chen Z. Self-assembled synthesis of benzene-ring-grafted g-C₃N₄ nanotubes for enhanced photocatalytic H₂ evolution. *Appl. Catal. B Environ*. 2020;279: 119401. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2020.119401>.
 78. He X, Wang L, Sun S, Guo X, Tian H, Xia Z, et al. Photodeposition synthesis of hollow g-C₃N₄/Ag nanotubes with high oxidation properties to enhance visible-light photocatalytic performance. *Mater Res Bull*. 2024;172: 112658. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2023.112658>.
 79. Hemmati-Eslamlu P, Habibi-Yangjeh A, Asadzadeh-Khaneghah S, Chand H, Krishnan V. Integration g-C₃N₄ nanotubes and Sb₂MoO₆ nanoparticles: Impressive photoactivity for tetracycline degradation, Cr (VI) reduction, and organic dyes removals under visible light. *Adv Powder Technol*. 2021;32(7): 2322–2335. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2021.05.007>.
 80. Jiang Z, Zhang X, Chen H, Hu X, Yang P. Formation of g-C₃N₄ Nanotubes towards Superior Photocatalysis Performance. *Chem Cat Chem*. 2019;11(18): 4558–4567. <https://doi.org/10.1002/cctc.201901038>.
 81. Chong B, Chen L, Han D, Wang L, Feng L, Li Q, et al. CdS-modified one-dimensional g-C₃N₄ porous nanotubes for efficient visible-light photocatalytic conversion. *Chinese J Catal*. 2019;40(6): 959–968. [https://doi.org/10.1016/S1872-2067\(19\)63355-3](https://doi.org/10.1016/S1872-2067(19)63355-3).
 82. Li H, Zang L, Shen F, Wang L, Sun L, Yuan F. Tubular g-C₃N₄/carbon framework for high-efficiency photocatalytic degradation of methylene blue. *RSC Adv*. 2021;11(30): 18519–18524. <https://doi.org/10.1039/D1RA02918E>.
 83. Xie J, Wu C, Xu Z, Tian C, Li M, Huang J. Novel AgCl/g-C₃N₄ heterostructure nanotube: Ultrasonic synthesis, characterization, and photocatalytic activity. *Mater Lett*. 2019;234: 179–182. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2018.09.089>.
 84. Habibi Lisar S, Karimi G. Synthesis of novel maghemite (γ -Fe₂O₃)-decorated g-C₃N₄ nano-tubes (g-C₃N₄ NTs/ γ -Fe₂O₃) photocatalytic nano-composite for ultrafast degradation of organics in wastewater: Insight into the mechanism of photoexcited charge separation. *Appl Surf Sci Adv*. 2023;18:100515. <https://doi.org/10.1016/j.apsadv.2023.100515>.

How to cite this article:

Farhadi H, Keramati N. A review of the effect of different structures and morphologies of g-C₃N₄ on its performance in dyes removal. *J Stud Color World*. 2025;15(2):227-241. <https://doi.org/10.30509/jscw.2025.167430.1214> [In Persian].