

مقایسه نانورقه‌های کربن نیتريد سنتز شده به دو روش حرارتی و اولتراسونیک - حرارتی (ترکیبی)

محمد رضا کبیریان مقدم^۱، احمد صالحی^۱، سید خطیب الاسلام صدرنژاد^{۱*}

^۱ دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی شریف، تهران.

تاریخ ثبت اولیه: ۱۳۹۷/۱۱/۲۵، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۳۹۸/۰۵/۱۵، تاریخ پذیرش قطعی: ۱۳۹۸/۰۶/۱۱

چکیده در این پژوهش به منظور بررسی تاثیر اولتراسونیک کردن در سنتز کربن نیتريد نانورقه‌ای از پیش‌ماده ملامینی، از دو روش حرارتی و ترکیبی با شرایط و سیکل حرارت‌دهی یکسان استفاده شده است. ابتدا ملامین در مدت ۷۵ دقیقه به ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد رسید و برای مدت چهار ساعت در همین دما باقی ماند تا $g-C_3N_4$ به دست آید. در روش حرارتی، $g-C_3N_4$ به دست آمده در مدت ۱۰۰ دقیقه به ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد رسید و برای مدت سه ساعت در این دما نگهداری شد تا کربن نیتريد نانورقه‌ای به دست آید. در روش ترکیبی، ابتدا $g-C_3N_4$ به مدت ۱۳۰ دقیقه درون محلول آب و اتانول تحت امواج مافوق صوت قرار گرفت و روند روش حرارتی برای آن تکرار گردید. برای مشخصه‌یابی نانورقه‌های حاصل، آزمون‌های پراش اشعه ایکس (XRD)، میکروسکوپ الکترونی روبشی (FE-SEM)، طیف‌سنج مادون قرمز انتقالی (FTIR) و تعیین مساحت سطح برنر-امت-تلا (BET) انجام گرفت. خواص فتوکاتالیستی نمونه‌ها با استفاده از تجزیه رودامین بی بررسی شد. مشخص شد که هر دو روش، توانایی تولید کربن نیتريد نانورقه‌ای را دارند. در روش ترکیبی در مدت زمان یکسان می‌توان نانورقه‌هایی با ضخامت تقریباً ۳۰ درصد کمتر از نانورقه‌های تولید شده به روش حرارتی، تولید نمود. نمونه‌های تولید شده به روش ترکیبی در مقایسه با نمونه‌های حرارتی دارای فعالیت فتوکاتالیستی بیشتری بودند.

کلمات کلیدی: نانورقه، کربن نیتريد، $g-C_3N_4$ ، روش حرارتی، روش ترکیبی.

Comparison of Carbon Nitride Nanosheets Synthesized by Thermal and Ultrasonic Thermal (Combined) Methods

M.R Kabirian Moghaddam¹, A Salehi¹, S.K Sadrnezhad^{1*}

Department of Materials Science and Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran.

Abstract In this research, carbon nitride nanosheets were synthesized from melamine precursor by both thermal and combined methods. Melamine first reached 550 °C for 75 minutes and remained at this temperature for 4 hours until $g-C_3N_4$ was obtained. In the heating method, the produced $g-C_3N_4$ reached 500 °C for 100 minutes and stored at this temperature for 3 hours to obtain nanosheet carbon nitride. In the combined approach, $g-C_3N_4$ was first sonicated for 130 minutes in a solution of water and ethanol and then the heating process was repeated for it. Sample characterization by X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (FE-SEM), Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), and Brunauer-Emmett-Teller (BET) surface area analysis were done. The photocatalytic performance of the samples was evaluated by measuring the degradation of the rhodamine b. It was found that both methods are capable of producing carbon nitride of nanosheet shape. In the combined approach, over the same period, nanosheets of about 30% less thickness than the heating method can be made. Samples that were made by the combined way showed better photocatalytic activity than thermal samples.

Keywords: Nanosheet, Carbon Nitride, $g-C_3N_4$, Thermal Method, Combined Method.

۱- مقدمه

منظور دستیابی به سطح ویژه بزرگ و بافت بهینه ضروری است [۶]. افزایش سطح فعال چنین ماده‌ای، می‌تواند خواص مطلوب را به‌طور چشم‌گیری تقویت نماید. به همین دلیل امروزه دستیابی به ساختار دوبعدی، که در کنار افزایش سطح موجب ایجاد خواص جدیدی در ماده می‌گردد، بسیار مورد توجه قرار گرفته‌است [۷].

با الهام از ساختار لایه‌ای شبه‌گرافیتی $g-C_3N_4$ و پیوند کووالانسی قوی بین کربن و نیتروژن در راستای صفحه‌ای و پیوند ضعیف واندروالس بین لایه‌ها، تولید نانورقه‌های دوبعدی از پیش‌ماده آلی به روش لایه‌برداری از بالک جامد یا مونتاژ ناهمسانگرد^۵ کاملاً منطقی به‌نظر می‌رسد [۶].

در تحقیق حاضر، نانورقه‌های کربن نیتريد به دو روش حرارتی و ترکیبی از کربن نیتريد گرافیتی ساخته شد. برای تولید ماده اولیه لازم برای ساخت نانورقه‌ها، ابتدا کربن نیتريد گرافیتی از پیش‌ماده ملامینی به‌دست آمد و سپس به نانورقه ارتقا یافت. با استفاده از آزمون‌های متداول مشخصه‌یابی، خصوصیات نانورقه‌ها انجام شد. در نهایت فعالیت فتوکاتالیستی نمونه‌ها از طریق اندازه‌گیری میزان تجزیه رودامین بی مورد بررسی قرار گرفت و نتایج حاصل گزارش شد.

۲- روش تحقیق

۲-۱- سنتز

به منظور سنتز کربن نیتريد گرافیتی، ۱۰ گرم پودر ملامین درون بوته سرامیکی بدون درپوش ریخته شد و داخل کوره مدل YCF 1250-6 با هوای ساکن قرار گرفت. دمای کوره در مدت ۷۵ دقیقه به ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد رسانده شد و برای مدت چهار ساعت در همین دما باقی ماند. در ادامه، کوره با آهنگ تقریبی چهار درجه سانتی‌گراد بر دقیقه سرد گردید.

افزایش جمعیت کره زمین و بالا رفتن استانداردهای زندگی به‌طور مداوم، موجب افزایش روزافزون نیاز به انرژی شده است. از طرفی محدود بودن منابع سوخت‌های فسیلی و رشد آگاهی نسبت به مسائل زیست‌محیطی سبب جلب توجه محققین به سمت منابع انرژی پاک و تجدیدپذیر گردیده است. در این راستا، مواد زیادی با خواص منحصر به‌فرد برای استفاده در کاربردهای تبدیل و ذخیره انرژی پیشنهاد شده است. از جمله تجربه فتوکاتالیستی آب برای تولید هیدروژن به کمک نانوکامپوزیت کربن نیتريد / اکسید فلز را می‌توان نام برد [۱].

در ابتدای سال ۱۹۸۹ کوهن^۱ وجود ترکیب کربن نیتريد C_3N_4 دارای سختی بیش از الماس را پیش‌بینی کرد [۲]. در سال ۱۹۹۶ تتر^۲ و هملی^۳ با محاسبات تئوری، پنج ساختار بلوری برای C_3N_4 مشتمل بر $\beta-C_3N_4$ با سختی بالا، کربن نیتريد گرافیتی ($g-C_3N_4$)، $\alpha-C_3N_4$ ، C_3N_4 مکعبی و C_3N_4 شبه‌مکعبی^۴ را پیشنهاد کردند [۳].

نیمه‌هادی‌های غیرفلزی، غیرسمی و آلی بر پایه کربن نیتريد گرافیتی به سبب پاسخ به نور مرئی، ساختار نوار الکترونی منحصر به‌فرد، پایداری حرارتی و شیمیایی بالا و پیش‌ماده نیتروژنی کم هزینه [۴]، توجه زیادی را به منظور استفاده در تجزیه فتوکاتالیستی آب، تخریب عناصر آلاینده آلی محیط‌زیست و حسگرهای الکتروشیمیایی به خود جلب کرده‌اند. کربن نیتريد گرافیتی دارای ساختار لایه‌ای نظیر گرافیت است. این ماده گزینه جذابی برای استفاده در صنعت انرژی است [۵].

با وجود تمام ویژگی‌ها و کاربردهای مطلوب $g-C_3N_4$ ، تولید در دمای بالا، یک ماده بالک با سطح ویژه پایین، سینتیک واکنش کند و کارایی ضعیف به‌دست می‌دهد. پیشرفت روش‌های فیزیکی، شیمیایی یا ترکیبی برای اصلاح $g-C_3N_4$ به

¹ Cohen² Teter³ Hemley⁴ Pseudo cubic⁵ anisotropic assembly

قرارگیری در مقابل نور به مدت یک ساعت با استفاده از همزن مغناطیسی مخلوط شد تا به نقطه تعادل جذب- و جذب روی سطح فتوکاتالیست برسد. در حین تابش به فاصله ۳۰ دقیقه به ۳۰ دقیقه، ۲ mL از محلول برداشته شد و تحت آزمون UV-Vis قرار گرفت. بیشترین پیک جذب به عنوان معیار غلظت رودامین بی استفاده شد. برای رسم نمودار، داده‌ها نسبت به C_0 (غلظت رودامین بی در نقطه تعادل) نرمال شد.

۳- نتایج و بحث

پودر ملامین بعد از اعمال سیکل حرارتی به صورت یک آگلومره زرد رنگ در می‌آید که تصویر آن بعد از پودر کردن در شکل ۱- الف آورده شده است. همچنین تصویر نمونه حرارتی نیز در شکل ۱- ب آورده شده است. تبدیل کربن نیتريد گرافیتی به نانورقه، باعث تغییر رنگ پودر از زرد به سفید می‌شود. چون با کاهش ضخامت ورقه‌ها، ناحیه نور مرئی کاهش می‌یافت، لذا رنگ پودر به سفید تغییر پیدا می‌کرد.



شکل ۱. الف) کربن نیتريد گرافیتی و ب) نانورقه تولید شده به روش حرارتی.

الگوی پراش پرتو ایکس برای نمونه $g-C_3N_4$ سنتز شده در شکل ۲ آورده شده است. الگوی این ماده دارای دو پیک در زوایای 13.1° و 27.5° درجه می‌باشد. پیک پراش کم‌زاویه (13.1° درجه) که مربوط به انباشتگی ساختاری درون صفحه‌ای می‌باشد، به صفحه (۱۰۰) اختصاص دارد. پیک قوی‌تر با زاویه 27.5° درجه به صفحه (۰۰۲) اختصاص دارد و علت آن انباشتگی صفحات روی یکدیگر می‌باشد. نتایج به دست آمده

برای تولید نانورقه‌ها با روش حرارتی، ۰/۵ گرم پودر کربن نیتريد گرافیتی تولید شده در مرحله قبل، درون یک قایقک سرامیکی ریخته شد و درون کوره با هوای ساکن قرار گرفت. سپس، دمای کوره طی ۱۰۰ دقیقه به ۵۰۰ درجه سانتی-گراد رسانده شد و به مدت سه ساعت در این دما نگهداری شد و سپس با آهنگ تقریبی چهار درجه سانتی‌گراد بر دقیقه سرد شد.

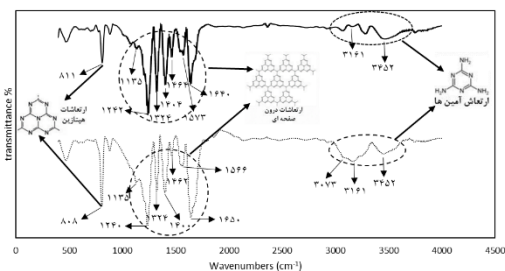
در روش دیگر، ابتدا یک گرم پودر کربن نیتريد گرافیتی به همراه ۲۰۰ میلی‌لیتر حلال که ترکیبی از آب و اتانول با نسبت‌های حجمی سه به یک است، درون یک بشر ریخته شد و سپس به مدت ۱۳۰ دقیقه درون دستگاه اولتراسونیک حمامی مدل PARSONIC 15s اولتراسونیک گردید. بعد از اتمام عملیات سونیکیت‌کردن، سوسپانسیون حاصل به مدت شش دقیقه و با سرعت ۵۰۰۰ دور بر دقیقه، با دستگاه *centurion* 1030 سانتریفیوژ گردید و سپس پودر حاصل به مدت ۷۲ ساعت درون آن با دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت تا خشک شود. سپس پودر حاصل مطابق سیکل دمایی روش قبل حرارت داده شد.

در این پژوهش، به منظور شناسایی فازهای موجود از آزمون XRD استفاده شد. این آزمون با استفاده از دستگاه پراش اشعه ایکس مدل PW1730 انجام شد. برای بررسی مورفولوژی و توپوگرافی نیز آزمون FE-SEM با استفاده از دستگاه Mira 3-XMU انجام شد. در ضمن به منظور شناسایی ساختار شیمیایی کربن نیتريد، آزمون طیف‌سنجی مادون قرمز به وسیله دستگاه طیف‌سنجی مادون قرمز مدل AVATAR انجام گردید. به علاوه برای بررسی سطح ویژه نمونه‌ها از آزمون BET بهره گرفته شد. این آزمون به کمک دستگاه NanoSORD 92 و به روش تک‌نقطه‌ای انجام گردید.

برای اندازه‌گیری خاصیت فتوکاتالیستی نمونه‌ها، از تجزیه رودامین بی تحت نور لامپ زنون ۲۴ w استفاده شد. ۱۵ mg از نمونه فتوکاتالیست به ۵۰ mL محلول آبی رودامین بی (با غلظت ۵ ppm) افزوده شد. محلول حاصل پیش از

است. تشابه بین این دو الگو نشان‌دهنده این است که نانورقه‌های تولیدشده، ساختار شیمیایی بالک $g-C_3N_4$ را حفظ کرده‌اند.

پیک 808 cm^{-1} الگوی پایین و پیک 811 cm^{-1} الگوی بالا مربوط به حالت ارتعاش تنفسی^۲ سیستم حلقه‌ای اس-تریازین^۳ می‌باشد. در بازه ۱۱۰۰ تا 1650 cm^{-1} ، پیک‌های 1135 cm^{-1} ، 1238 cm^{-1} ، 1324 cm^{-1} ، 1400 cm^{-1} ، 1462 cm^{-1} ، 1566 cm^{-1} و 1644 cm^{-1} در الگوی $g-C_3N_4$ و پیک‌های 1135 cm^{-1} ، 1242 cm^{-1} ، 1324 cm^{-1} ، 1404 cm^{-1} ، 1464 cm^{-1} ، 1573 cm^{-1} و 1640 cm^{-1} در الگوی نمونه‌ی نانورقه‌ای وجود دارد که مربوط به حالت لرزش کششی^۴ $C=N$ و $C-N$ می‌باشد. پیک‌های ملایم بازه ۳۰۰۰ تا 3500 cm^{-1} ، پیک‌های 3161 cm^{-1} و 3452 cm^{-1} برای الگوی بالا و پیک‌های 3073 cm^{-1} ، 3161 cm^{-1} و 3452 cm^{-1} در الگوی پایین مربوط به کشش پیوند $N-H$ می‌باشد که نشان‌دهنده وجود گروه‌های آمینی معلق روی سطح لایه‌ها است [۹]. ضعیف‌تر بودن پیک‌های مربوط به نمونه نانورقه‌ای نسبت به بالک $g-C_3N_4$ در این ناحیه می‌تواند نشان‌دهنده کاهش میزان هیدروژن در طی سیکل حرارتی باشد.



شکل ۳. الگو FTIR نمونه گرافیتی و نانورقه حرارتی.

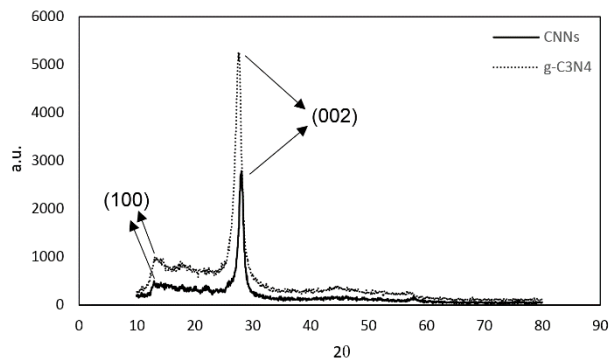
شکل‌های ۴ و ۵ به ترتیب نشان‌دهنده تصاویر FE-

SEM مربوط به نمونه‌های حرارتی و ترکیبی می‌باشد. در

مقایسه با $g-C_3N_4$ بالک که متشکل از آگلومره جامد و سفت

با ابعاد میکرومتری است، نانورقه‌های تولید شده، آگلومره‌های

در این تحقیق، با نتایج موجود در منابع مطابقت دارد [۷]. الگوی پراش پرتو ایکس نمونه نانورقه‌ای تولیدشده به روش حرارتی^۱ (CNNs) نیز در شکل ۲ رسم شده است. نانورقه حرارتی نیز دارای دو پیک با زاویه های 13.1° و 28.05° درجه است که مشابه با $g-C_3N_4$ بالک است. تشابه این دو الگو این مساله را مشخص می‌کند که نانورقه‌های تولیدشده دارای ساختار بلوری یکسان با $g-C_3N_4$ هستند.



شکل ۲. الگوی پراش پرتو ایکس نمونه گرافیتی و نانورقه حرارتی.

با مقایسه الگوهای پراش پرتو ایکس شکل ۲، مشخص

می‌شود که شدت پیک کم‌زاویه در نمونه‌ی نانورقه‌ای نسبت به $g-C_3N_4$ کاهش یافته است که علت آن کاهش ابعاد صفحات در طی سیکل حرارتی است. در مورد پیک قوی‌تر شاهد کاهش شدت پیک هستیم که نشان‌دهنده کاهش تعداد صفحات و تولید ساختار نانورقه‌ای است. همان‌طور که اشاره شد، پیک پراش کم‌زاویه در هر دو مورد در 13.1° درجه قرار دارد. ولی مشاهده می‌شود که زاویه پیک قوی‌تر در کربن نیتريد نانورقه‌ای از 27.5° به 28.05° درجه انتقال یافته است که نشان‌دهنده کاهش فاصله بین صفحات درون یک نانورقه می‌باشد به این علت که تک لایه‌ها در بالک $g-C_3N_4$ اندکی موج‌دار هستند، ولی سیکل حرارتی در این روش تولید، موجب تراکم‌تر شدن لایه‌های اتمی شده‌اند [۸].

الگوی FTIR مربوط به بالک $g-C_3N_4$ و نمونه

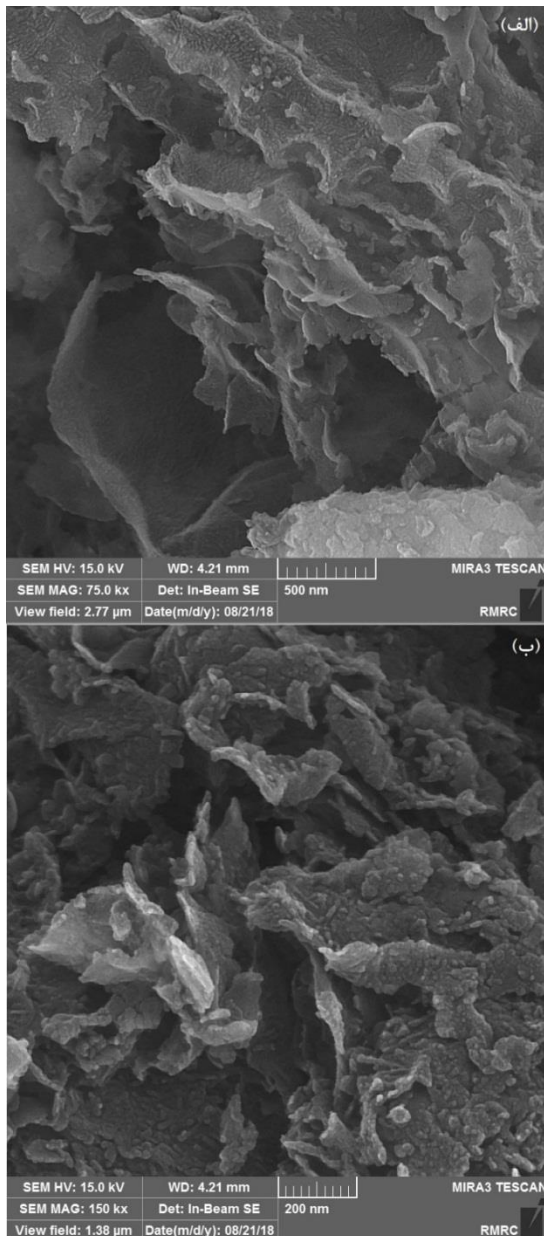
نانورقه‌ای تولیدشده به روش حرارتی در شکل ۳ آورده شده-

² Breathing vibration mode

³ s-triazine

⁴ Stretching vibration mode

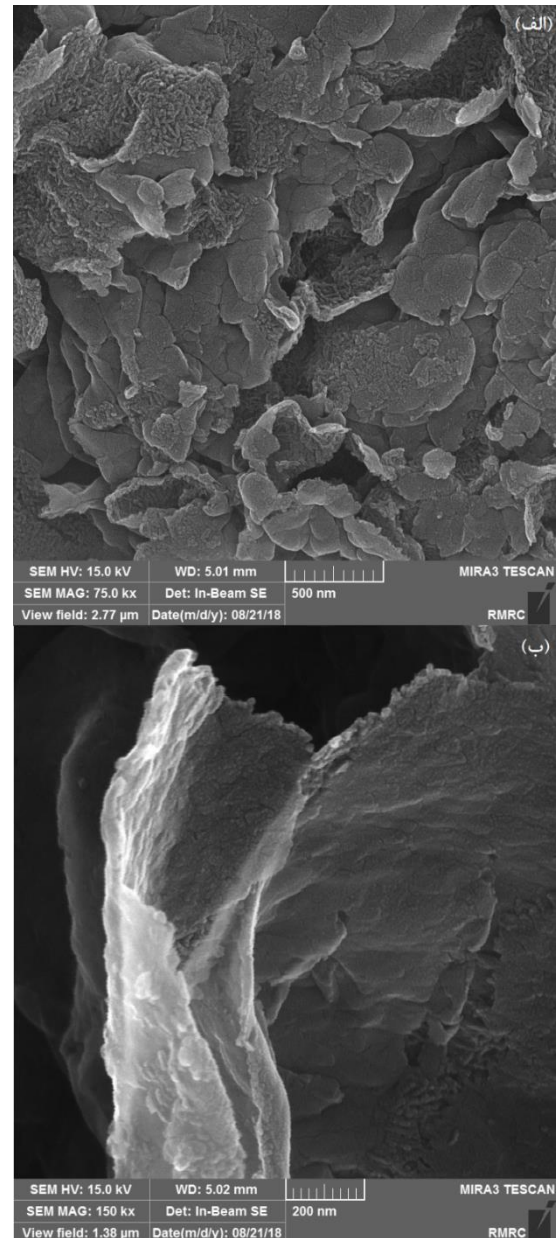
¹ Carbon nitride nanosheets



شکل ۵. تصاویر FE-SEM مربوط به نمونه ترکیبی: (الف) بزرگنمایی ۵۰۰۰۰ و (ب) بزرگنمایی ۱۰۰۰۰۰.

در شکل ۶ تصاویر FE-SEM تک ورقه‌های نمونه‌های حرارتی و ترکیبی به منظور اندازه‌گیری ضخامت ورقه‌ها دیده می‌شود. تصاویر نشان می‌دهد که ضخامت ورقه‌ها به ابعاد نانومتری رسیده و فرآیند تولید نانورقه‌ها موفقیت‌آمیز بوده است. همچنین دیده می‌شود که ضخامت ورقه‌های تولید شده با روش ترکیبی از روش حرارتی کمتر می‌باشد.

بازتری دارند و دیده می‌شود که ساختار نانورقه‌ها به صورت ورقه‌ای می‌باشد که این امر موجب نرم‌تر شدن آنها می‌گردد (با توجه به بخش الف شکل‌های ۴ و ۵).



شکل ۴. تصاویر FE-SEM مربوط به نمونه حرارتی: (الف)

بزرگنمایی ۵۰۰۰۰ و (ب) بزرگنمایی ۱۰۰۰۰۰.

در بزرگنمایی‌های بالاتر صفحات این ساختار ورقه‌ای که دارای ابعاد متفاوتی می‌باشند، به وضوح دیده می‌شود. علاوه بر این صفحات تمایل به موج‌دار شدن دارند و در لبه صفحات بریدگی ایجاد شده است (با توجه به بخش ب شکل‌های ۴ و ۵). دلیل این تغییر شکل ورقه‌ها و لبه‌ها، کمینه کردن انرژی سطحی ورقه‌ها می‌باشد.

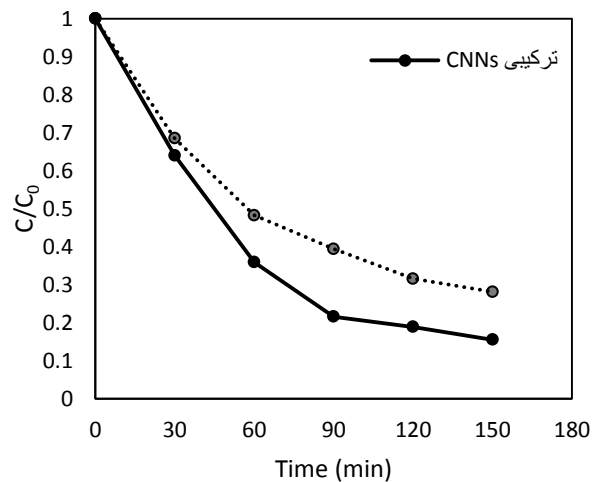
بیشتری دست یافت که نشان‌دهنده تولید نانورقه‌هایی با ضخامت کمتر است.

جدول ۱. سطح ویژه نمونه‌های ساخته شده در این تحقیق در مقایسه با g-C₃N₄ بالک.

S _{BET} (m ² /g)	نمونه
۱۲٫۵	بالک g-C ₃ N ₄
۸۴٫۳۱۹	حرارتی
۱۱۵٫۵۸۰	ترکیبی

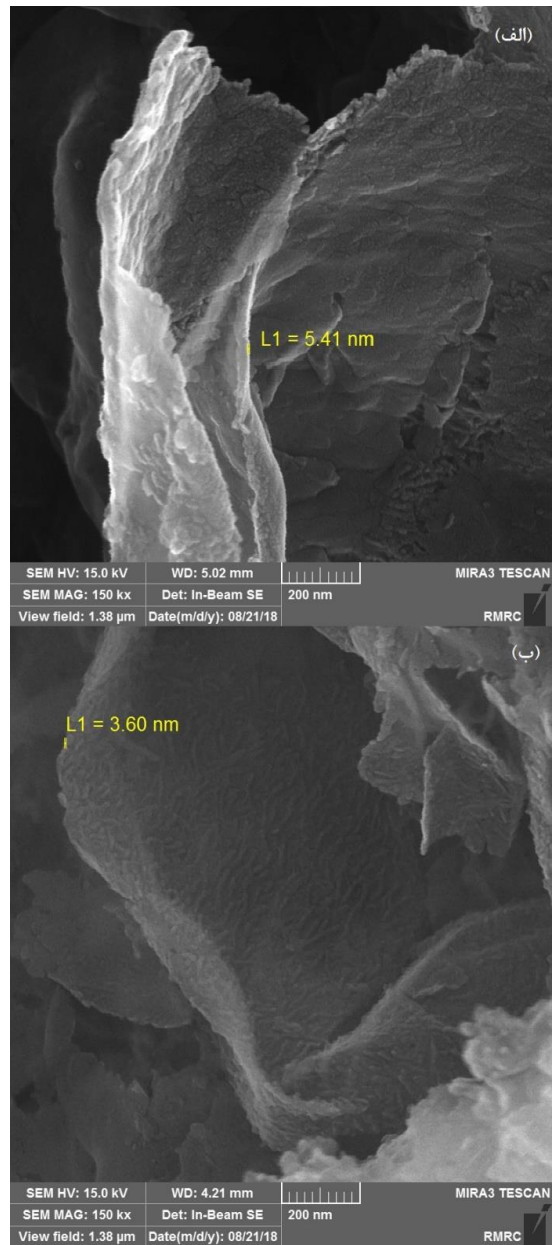
به علاوه انتظار می‌رود مورفولوژی دوبعدی ناهمسانگرد باعث شود که نانورقه‌ها دارای مزایای مواد دوبعدی و متفاوت از بالک g-C₃N₄ باشد. نانورقه‌ها دارای سطح بیشتر با جایگاه‌های فعال فراوان، شکاف باند بزرگ‌تر به دلیل اثر اندازه کوانتومی^۱ و قابلیت جابجایی تقویت‌شده الکترون‌ها در راستای صفحه‌ای هستند.

نتایج حاصل از ارزیابی خاصیت فتوکاتالیستی نمونه‌ها که از طریق تجزیه رودامین بی به دست آمد، در شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل ۷. نمودار غلظت نرمال رودامین بی بر حسب زمان.

همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، پس از ۱۵۰ دقیقه تابش در حضور نمونه حرارتی و ترکیبی به ترتیب ۷۲٪ و ۸۵٪ از رودامین بی تجزیه شده است. بنابراین نمونه ترکیبی نسبت به نمونه حرارتی، ۱۳٪ بیشتر تجزیه رودامین بی را پیش می‌برد



شکل ۶. تعیین ضخامت نانورقه‌ها به کمک آزمون FE-SEM. (الف) نمونه حرارتی، (ب) نمونه ترکیبی.

مقدار سطح ویژه (S_{BET}) نمونه‌ها در جدول ۱ آورده شده است. با توجه به این‌که مقدار سطح ویژه نمونه گرافیتی در حدود ۱۲٫۵ m²/g است، می‌توان گفت که مقدار سطح ویژه نانورقه تولید شده به روش حرارتی در حدود هفت برابر نمونه گرافیتی است که این افزایش چشم‌گیر نشان‌دهنده تحقق هدف ما به منظور افزایش سطح ویژه برای استفاده در کاربردهای فتوکاتالیستی بوده است. به علاوه از مقایسه مقدار سطح ویژه نمونه‌های حرارتی و ترکیبی این نتیجه به دست می‌آید که با استفاده از روش ترکیبی می‌توان به سطح ویژه بسیار

¹ Quantum size effect

سیاسگزاری

از صندوق حمایت از پژوهشگران کشور و آزمایشگاه بیونانومواد پیشرفته دانشگاه صنعتی شریف به سبب حمایت و کمک به انجام تحقیق قدردانی می‌شود.

مراجع

1. A. Seza, F. Soleimani, N. Naseri, M. Soltaninejad, S.M. Montazeri, S.K. Sadrnezhaad, M.R. Mohammadi, H. Asgari Moghadam, M. Forouzandeh, M.H. Amin, "Novel microwave-assisted synthesis of porous g-C₃N₄/SnO₂ nanocomposite for solar water-splitting," *Appl. Surf. Sci.*, vol. 440, pp. 153–161, 2018.
2. D.M. Teter and R.J. Hemley, "Low-Compressibility Carbon Nitrides," *Science.*, vol. 271, no. 5245, pp. 53 – 55, Jan. 1996.
3. S. Yang, Y. Gong, J. Zhang, L. Zhan, L. Ma, Z. Fang, R. Vajtai, X. Wang, P.M. Ajayan, "Exfoliated Graphitic Carbon Nitride Nanosheets as Efficient Catalysts for Hydrogen Evolution Under Visible Light," *Adv. Mater.*, vol. 25, no. 17, pp. 2452–2456, May 2013.
4. X. She, H. Xu, Y. Xu, J. Yan, J. Xia, L. Xu, Y. Song, Y. Jiang, Q. Zhang, H. Li, "Exfoliated graphene-like carbon nitride in organic solvents: Enhanced photocatalytic activity and highly selective and sensitive sensor for the detection of trace amounts of Cu²⁺," *J. Mater. Chem. A*, 2014.
5. H.S. Zhai, L. Cao, and X.-H. Xia, "Synthesis of graphitic carbon nitride through pyrolysis of melamine and its electrocatalysis for oxygen reduction reaction," *Chinese Chem. Lett.*, vol. 24, no. 2, pp. 103–106, Feb. 2013.
6. H. Xu, J. Yan, X. She, L. Xu, J. Xia, Y. Xu, Y. Song, L. Huang, H. Li, "Graphene-analogue carbon nitride: novel exfoliation synthesis and its application in photocatalysis and photoelectrochemical selective detection of trace amount of Cu²⁺," *Nanoscale*, vol. 6, no. 3, pp. 1406–1415, 2014.
7. P. Niu, L. Zhang, G. Liu, H.M. Cheng, "Graphene-Like Carbon Nitride Nanosheets for Improved Photocatalytic Activities," *Adv. Funct. Mater.*, vol. 22, no. 22, pp. 4763–4770, Nov. 2012.
8. M. Groenewolt, M. Antonietti, "Synthesis of g-C₃N₄ nanoparticles in mesoporous silica host matrices," *Adv. Mater.*, vol. 17, no. 14, pp. 1789–1792, 2005.
9. Q. Lin, L. Li, S. Liang, M. Liu, J. Bi, and L. Wu, "Efficient synthesis of monolayer carbon nitride 2D nanosheet with tunable concentration and enhanced visible-light photocatalytic activities," *Appl. Catal. B Environ.*, vol. 163, pp. 135–142, Feb. 2015.

که نشان‌دهنده خواص فتوکاتالیستی برتر نمونه ترکیبی است. این بهبود را می‌توان با دو دلیل توجیه کرد. اول سطح افزایش یافته که در ارتباط با ساختار مسطح باز، یک مزیت بزرگ برای جذب نور و انتقال جرم است که به‌طور موثر دسترسی سطح به زمینه واکنش‌گر را افزایش می‌دهد. دوم اینکه ساختار ناهمسانگرد با ضخامت کاهش‌یافته، مسافت مهاجرت عمودی حامل‌های بار از بالک به سطح ماده را کاهش می‌دهد و جابجایی الکترون‌ها در راستای صفحه‌ای را سرعت می‌بخشد، که در کنار هم باعث کاهش اتلاف انرژی بر اثر بازترکیب بارها تحت تابش می‌شود.

۴- نتیجه‌گیری

روش حرارتی استفاده شده در این تحقیق می‌تواند نمونه نانورقه‌ای را با موفقیت سنتز نماید. روش حرارتی برای تولید کربن نیتريد نانورقه‌ای، روشی سریع و مقرون به صرفه است اما بازدهی پایینی دارد. نانورقه‌های سنتز شده با این روش دارای سطح ویژه ۸۴/۳۱۹ m²/g می‌باشد که نشان‌دهنده کاهش اندازه ذرات و ضخامت لایه‌ها است. هم‌چنین مقدار سطح ویژه نشان‌دهنده ۷۰۰ درصد رشد نسبت به ماده بالک است. از آنجایی که مقدار سطح ویژه در کاربردهای کاتالیستی دارای اهمیت زیادی است، این میزان رشد بازده ماده فتوکاتالیستی را به مقدار چشم‌گیری افزایش می‌دهد. روش ترکیبی نیز می‌تواند نمونه نانورقه‌ای با موفقیت تولید نماید. با وجود اینکه این روش در مقایسه با روش حرارتی زمان‌بر است، ولی می‌تواند نانورقه‌هایی با ضخامت ۳۰ درصد کمتر و سطح ویژه ۳۵ درصد بیشتر تولید نماید. در نهایت با مقایسه خواص فتوکاتالیستی نمونه ترکیبی و حرارتی، مشخص شد که توانایی فتوکاتالیستی نمونه ترکیبی بالاتر از نمونه حرارتی است.