

## فرآوری نانوذرات کربنی به روش کندگی لیزری در محیط خلاء

فاطمه کاظمی زاده<sup>۱</sup>، رسول ملک فر<sup>۲</sup>، پرویز پروین<sup>۳</sup> و صمد مومن بالله<sup>۴</sup>

### چکیده

نانوذرات کربنی با ساختار بلوری به روش کندگی لیزری یک هدف گرافیتی با لیزر پالسی پرتوان Nd-YAG در مد اصلی، در محیط خلاء و تحت شارش آهسته گاز آرگون فرآوری شد. نتایج تصویرگیری میکروسکوپ الکترونی (FESEM) ساختار نانوذرات کربنی را نشان می‌دهد. تست‌های طیف سنجی پس پراکندگی رامان و پراش پرتو ایکس (XRD) تشکیل نانوذرات کربنی با ساختار بلوری را تایید می‌کنند. تست فوتولومینسانس (PL) و طیف سنجی جذبی UV/VIS نشان می‌دهند که این ذرات خواص اپتیکی منحصربه‌فرد و تابش در ناحیه مرئی دارند. همچنین بر روی نانوذرات کربنی فرآوری شده عملیات اصلاح سطح انجام شد. اصلاح سطحی به کمک اسید نیتریک و پلی اتیلن گلیکول آمین دار شده (PEG<sub>1000N</sub>) انجام شد. تصاویر میکروسکوپ الکترون عبوری (TEM) نانوذرات کربنی فرآوری شده ساختار بهم پیوسته‌ای را نشان می‌دهد. در صورتیکه نانوذرات کربنی بعد از عملیات اصلاح سطحی کاملاً مجزا از یکدیگر هستند. این مسأله حاکی از آن است که فرآیند اصلاح سطحی باعث جدا شدن ذرات شده و محصورشدگی کوانتومی ذرات را افزایش می‌دهد. علاوه بر آن نتایج تست PL بعد از اصلاح سطح نانوذرات کربنی نشان می‌دهد که این کار در نهایت موجب ارتقاء طیف فوتولومینسانس می‌شود که به دلیل قرار داشتن پیک فوتولومینسانس نانوذرات کربنی در ناحیه مرئی و کاربردهای زیاد آن حائز اهمیت می‌باشد.

### واژه های کلیدی

نانوذرات کربنی، کندگی لیزری، اصلاح سطحی

## Synthesis of Carbon Nanoparticles Using Laser Ablation Method in Vacuum

Fateme Kazemizadeh, Rasoul Malekfar, Parviz Parvin and Saman Moemen Bellah

### Abstract

Crystalline carbon nanoparticles were synthesized using Nd-YAG pulsed laser ablation of a graphite target by fundamental mode of a high intensity pulsed Nd-YAG laser in vacuum under a slow flow of argon gas. Field emission scanning electron microscopy (FESEM) of products indicates the formation of carbon nanoparticles. Back-scattering Raman spectroscopy and XRD results confirm the formation of crystalline nanoparticles. Moreover, photoluminescence (PL) and UV/VIS absorption of synthesized carbon nanoparticles show the excellent optical properties in visible range. Acid treatment and surface passivation were carried out on carbon nanoparticles. Nitric acid and amine terminated poly ethylene glycol (PEG<sub>1000N</sub>) were employed for this purpose. Transmission electron microscopy (TEM) of products indicates the formation of inter-connected structure of carbon nanoparticles. However, carbon nanoparticles after surface passivation are completely separated. This suggests that this process separates particles and increases quantum confinement. PL results of surface passivated carbon nanoparticles show that this process improves the photoluminescence spectrum that is important because of its various applications.

### Key words

Carbon nano particles, laser ablation, surface passivaion

<sup>۱</sup> گروه فیزیک اتمی و مولکولی، بخش فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، اتوبان جلال آل احمد، تهران  
f.kazemizadeh@modares.ac.ir

<sup>۲</sup> گروه فیزیک اتمی و مولکولی، بخش فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، اتوبان جلال آل احمد، تهران  
malekfar@modares.ac.ir

<sup>۳</sup> دانشکده مهندسی انرژی و فیزیک، دانشگاه امیرکبیر، تهران p.parvin@aut.ac.ir

<sup>۴</sup> پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی، تهران s.moemen@ippi.ac.ir

## ۱. مقدمه

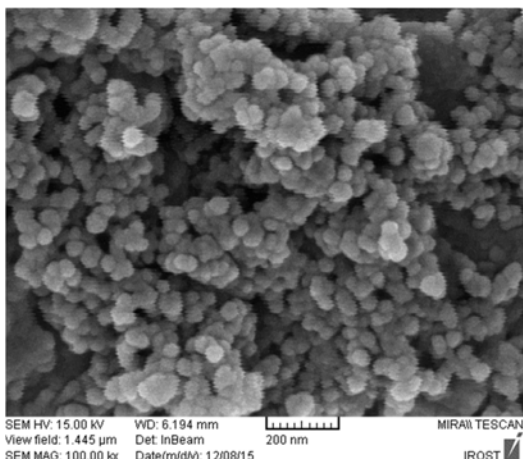
نانوذرات کربنی نسل جدیدی از اقسام نانومواد کربنی صفر بعدی هستند که در حالت کوانتومدات اندازه آنها از ۱۰ نانومتر کمتر است و اولین بار در سال ۲۰۰۴ در حین خالص سازی نانولوله های کربنی بدست آمدند [۱]. نانوذرات کربنی به دلیل خصوصیات ممتاز شیمیایی، اپتیکی، گرمایی، مکانیکی و الکتریکی و کاربردهای فراوانی که در این حوزه ها دارند توجه زیادی را به خود معطوف کردند. پایداری شیمیایی و سازگاری آنها با بدن، حلالیت ساده در آب و غیرسمی بودن آن زمینه کاربرد آن را در علوم مواد، بیوشیمی و پزشکی فراهم کرده است. اثبات شده است که این ماده برخلاف اقسام دیگر نانو ساختارهای کربنی هیچ گونه سمی در بدن تولید نمی کند و بنابراین می تواند جایگزین مناسبی برای دیگر آلوتروپ های کربن از جمله نانولوله های کربنی در حوزه پزشکی و بیوفیزیک باشد [۲]. همچنین به دلیل فلورسانس قوی در طیف مرئی و کوک پذیری آن در این محدوده در کاتالیست ها، حسگرها و تصویربرداری بایو، کاربرد فراوانی دارد [۳-۷].

روش های مختلف سنتز نانوذرات کربنی شامل رهیافت های بالا به پایین و بالا می شود. رهیافت های بالا به پایین شامل لیزری، تخلیه الکتریکی، دی هیدراته کردن اسیدی، و اکسایش الکتروشیمیایی از منابع کربنی است. در مقابل، کربنیزاسیون گرمایی، میکروموج و یا آلتراسونیک از پیش ماده ها از روش های پایین به بالا هستند [۳]. در رهیافت های پایین به بالا پیش مواد عالی به عنوان بذر اولیه برای رشد نانوذرات کربنی عمل می کنند، ولی در رهیافت های بالا به پایین، نانوذرات کربنی از فرآیند خرد کردن میکروساختارهای کربنی بدست می آیند که این فرآیندها می تواند شامل روشهای شیمیایی و یا فیزیکی باشد. روشهای فیزیکی عمدتاً شامل روش تخلیه الکتریکی [۸، ۹] و روش کندگی لیزری [۱۰-۱۲] می شود. در این مقاله از رهیافت کندگی لیزری در محیط گازی برای فرآوری نانوذرات کربنی استفاده شده است. در زمینه سنتز

نانوذرات کربنی به روش کندگی لیزری مطالعات بسیار کمی صورت گرفته است زیرا روش های شیمیایی به نسبت روش های فیزیکی ساده و به نسبت ارزان تر می باشند. با این وجود، روش های فیزیکی و بطور مشخص روش کندگی لیزری که در اینجا انجام شده است نسبت به روشهای شیمیایی مزایایی دارد که کنترل پذیری فرآیند سنتز، تولید ذرات بلوری و تک اندازه از جمله آن می باشد. بنابراین مطالعه بر این مقوله نتایج ارزشمندی را در فرآوری این نسل جدید مواد نانومواد کربنی در اختیار قرار می دهد.

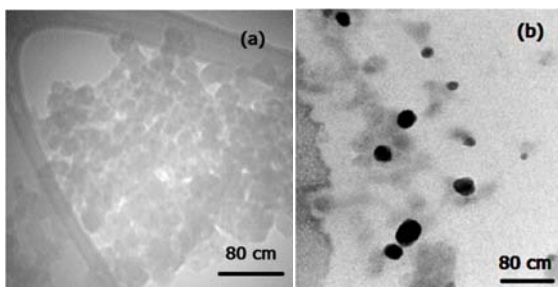
## ۲. چیدمان آزمایشگاهی

شماتیک چیدمان آزمایشگاهی سنتز نانوذرات کربنی با روش لیزری در شکل (۱) نمایش داده شده است. در ابتدا پودر گرافیت با فشار  $1000 \text{ kg cm}^{-2}$  تحت فشار سرد به قرص تبدیل می شود. هدف گرافیتی در یک لوله کوارتز به قطر ۵ و طول ۸۰ سانتی متر که درون یک کوره به دمای ۹۰۰ درجه سانتی گراد قرار گرفته است جاسازی می شود. در ابتدا لوله کوارتز تا ۰/۱ میلی بار خلأ شده و فشار آن با عبور گاز آرگون در ۴۰۰ میلی بار ثابت نگه داشته می شود. پرتو لیزر Nd-YAG در فرکانس هماهنگ اصلی  $1064 \text{ nm}$  و با پهنای زمانی ۱۰ نانوثانیه و نرخ تکرار ۵ هرتز بر روی هدف کانونی می شود به طوری که شارگی (فلوئنس) لیزر در حدود ۱ ژول بر سانتی متر مربع است. اتم های کربن و پلاسمای تولید شده حاصل از کندگی لیزری توسط گاز آرگون از اطراف هدف گرافیتی بلند شده و بر روی جمع کننده (کالکتور) جمع می شود. جمع کننده باید با آب خنک شود تا چگالی دمایی مناسب ایجاد شده و نانوذرات کربنی بتوانند در آن قسمت رشد کنند. دبی آب وارد شده به جمع کننده باید بگونه ای باشد که دمای صفحه جمع کننده را تا دمای اتاق پایین آورد. بنابراین سرعت آب نباید بیش از حد زیاد باشد. از طرف دیگر سرعت آب نباید به حدی کم باشد که هنگام خارج شدن از جمع کننده به دمای جوش برسد. در انتها محصول جمع شده و آنالیز می شود.



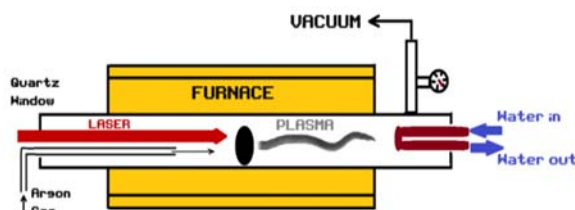
شکل ۲. تصویر FESEM ساختار نانوذرات کربنی قبل از اصلاح سطحی.

در شکل (۳) تصاویر بدست آمده از میکروسکوپ الکترون عبوری TEM از نانوذرات کربنی فرآوری شده، قبل و بعد از عملیات اصلاح سطحی نمایش داده شده است. همانطور که در این شکل دیده می‌شود ساختار یکپارچه و متخلخل کربنی (شکل ۳-ا) با برگشت در اسید نیتریک به نانوذرات کربنی با اندازه‌های ۳۰، ۲۰ و ۱۰ نانومتر تقلیل یافته است (شکل ۳-ب). با وجود سانتریفیوژ و حذف پلی‌اتیلن گلیکول هنوز مقداری از این ماده در پیش‌زمینه دیده می‌شود که با تکرار پخش کردن محلول در آب و سانتریفیوژ همچنین استفاده از صافی‌های مناسب زیر میکرومتری قابل برطرف کردن است.



شکل ۳. تصویر TEM ساختار نانوذرات کربنی (a) قبل و (b) بعد از عملیات اصلاح سطحی.

برای بررسی میزان بلورینگی این نانوذرات، تست مشخصه‌یابی پراش پرتو ایکس XRD با آند کبالت (طول موج ۱/۷۹ آنگستروم) گرفته شد (شکل ۴). در منحنی XRD دو پیک مشاهده می‌شود که محل آنها در زوایای



شکل ۱. طرحی از چیدمان آزمایشگاهی سنتز نانوذرات کربنی به روش کندگی لیزری در محیط خلاء.

### ۳. اصلاح سطحی

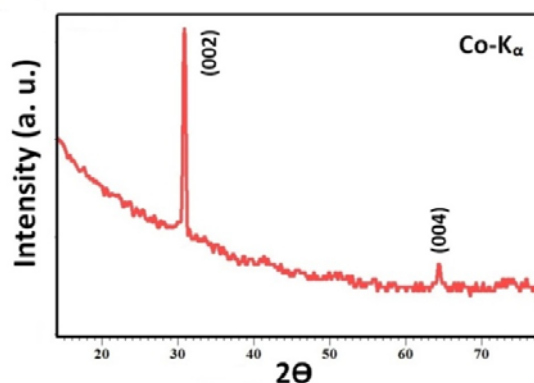
عملیات اصلاح سطحی شامل دو مرحله می‌شود. در مرحله اول محصول فرآوری شده با ۷ میلی لیتر اسید نیتریک ۲ مولار مخلوط شده و به مدت ۲۰ دقیقه با آلتراسونیک پخش (دیسپرس) می‌شود. پس از آن نانوذرات کربنی به مدت ۴ ساعت در دمای ۱۱۰ درجه در اسید برگشت (رفلاکس) می‌شود. سپس محلول حاوی نانوذرات عمل آمده با اسید در دمای محیط قرار می‌گیرد تا خنک شود. برای اصلاح سطحی نانوذرات باید از مولکول‌های آلی مانند هگزادسیل‌آمین، پلی اتیلن‌ایمین و یا پلی اتیلن گلیکول استفاده شود [۴] که در اینجا از پلی اتیلن گلیکول آمین دار شده (PEG<sub>1000N</sub>) استفاده شده است. حدود ۱۵ میلی‌گرم پلی اتیلن گلیکول با محلول اسیدی حاوی نانوذرات مخلوط شده و به مدت ۷۲ ساعت تحت گاز نیتروژن و در دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده می‌شود. پس از خنک شدن، محلول بدست آمده با آب پخش می‌شود و در دو مرحله سانتریفیوژ می‌شود تا پلی‌اتیلن گلیکول از محلول جدا شود. محلول نهایی یک سوسپانسیون زرد رنگ شفاف و زلال است که حاوی نانوذرات کربنی با پلی‌اتیلن گلیکول‌های متصل به آن می‌باشد.

### ۴. مشخصه‌یابی و بحث بر روی نتایج

تصاویر بدست آمده از محصول فرآوری شده قبل از اصلاح سطحی که با میکروسکوپ الکترونی FESEM گرفته شده است (شکل ۲) به خوبی تشکیل نانوذرات کربنی با متوسط قطر نانوذرات فرآوری شده ۵۰ نانومتر را نشان می‌دهد.

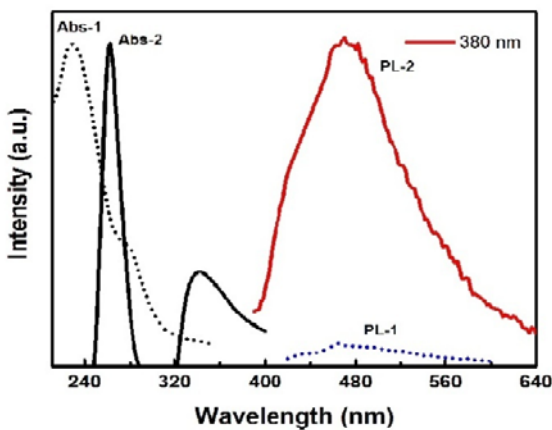
گرافیتی جابه‌جایی به آبی دارد. زیرا در حالت کلی فرکانس ارتعاشی به اندازه ذرات وابسته بوده و هرچه اندازه ساختار کوچکتر باشد فرکانس ارتعاشی بزرگتر است [۱۳]. انتقال این دو پیک به محدوده فرکانسی بزرگتر نسبت به گرافیت که در شکل (۵) دیده می‌شود دلیلی بر تشکیل نانوذرات کربنی می‌باشد. همچنین پیک 2D که در فرکانس  $\text{cm}^{-1}$  ۲۶۹۶ در گرافیت وجود دارد در ساختارهای نانوذرات کربنی ظاهر نمی‌شود [۱۴]. پیک دیگری که در فرکانس  $\text{cm}^{-1}$  ۱۱۷۰ ملاحظه می‌شود مربوط به ارتعاشات کششی پیوندهای C=C و C-C است. همچنین صفر نبودن شدت رامان در فرکانس  $\text{cm}^{-1}$  ۱۵۰۰ دلیل دیگری بر شکل‌گیری نانوذرات کربنی است. نسبت شدت پیک رامان باند D به باند G یعنی  $I_D/I_G$  در منحنی رامان ساختارهای کربنی از اهمیت زیادی برخوردار بوده و نشان‌دهنده نسبت پیوندهای  $sp^3/sp^2$  است. البته در مورد رامان مرئی به دلیل اینکه سطح مقطع پراکندگی  $sp^2$  نسبت به  $sp^3$  بسیار بالاتر و در حدود ۵۰ تا ۲۳۰ برابر است [۱۵] نمی‌توان بطور مستقیم این نسبت را برای تخمین فراوانی پیوندهای  $sp^3$  بکار برد [۱۶] ولی می‌توان برای مقایسه از آن استفاده کرد. تصاویر میکروسکوپ الکترون عبوری با وضوح بالا (HRTEM) در برخی گزارشات [۱۷] حاکی از آن است که هسته مرکزی نانوذرات کربنی را بیشتر اتم‌های کربن هیبرید شده  $sp^2$  تشکیل می‌دهند، درحالی‌که قسمتهای خارجی آن شامل اتم‌های کربن هیبریدی  $sp^3$  می‌باشد. شکل (۵) نشان می‌دهد که نانوذرات کربنی شدت  $I_D$  بزرگی دارند بطوریکه نسبت  $I_D/I_G$  برای آنها بزرگتر از ۱ و برابر با ۱/۳ می‌باشد. بزرگتر از ۱ شدن این نسبت در نمودار پراکندگی رامان مرئی که سطح مقطع پراکندگی  $sp^2$  به  $sp^3$  آن بسیار بالا است حاکی از آن است که قسمت عمده‌ای از ساختار نانوذرات کربنی سنتز شده در اینجا بیشتر از پیوندهای  $sp^3$  تشکیل شده است.

$30/77$  و  $64/37$  درجه (مطابق با زوایای  $26/4$  و  $54/60$  آند مس) است. این دو پیک به ترتیب مربوط به صفحات  $(002)$  و  $(004)$  گرافیت می‌باشد. عدم وجود پیک‌های دیگر گرافیت در منحنی XRD به دلیل محصورشدگی ساختار در ابعاد نانو می‌باشد. همچنین باریک بودن FWHM پیک  $(002)$  نشان‌دهنده وجود صفحات گرافنی در ساختار است درحالی‌که کربن بی‌شکل (آمورف) پیک پهنی از خود نشان می‌دهد که نشأت گرفته از رندوم بودن توزیع سلول‌های واحد در کل ساختار می‌باشد. بنابراین این تست به خوبی دلالت بر بلور بودن ساختار نانوذرات کربنی سنتز شده دارد. اندازه بدست آمده برای ذرات که از رابطه شرر محاسبه می‌شود  $60$  نانومتر است که با عکس‌های بدست آمده از میکروسکوپ FESEM مطابق است.



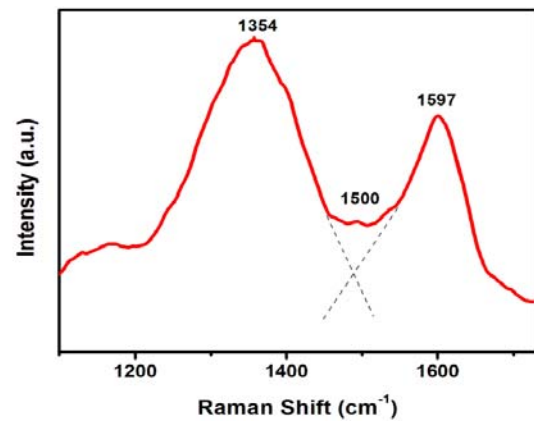
شکل ۴. منحنی XRD نانوذرات کربنی فرآوری شده. طیف سنجی رامان برای تعیین جزییات بیشتر در مورد ساختار نانوذرات کربنی بکار گرفته شد. شکل (۵) طیف رامان نانوذرات کربنی سنتز شده که با طول‌موج برانگیختگی  $532$  نانومتر انجام شده را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، دو پیک اصلی مربوط به ساختارهای کربنی یعنی باند D و باند G به ترتیب در فرکانس‌های  $1354$  و  $1597 \text{ cm}^{-1}$  قرار دارد. این دو باند که به ترتیب به بی‌نظمی‌های ساختار و ارتعاشات شبکه با تقارن  $E_{2g}$  مربوط می‌شوند در مورد گرافیت خالص به مرکزیت  $1350$  و  $1580 \text{ cm}^{-1}$  در طیف رامان ظاهر می‌شوند ولی برای نانوساختارهای بلوری

تابش می‌کنند. به دلیل اینکه نسبت نانوذرات کوچکتر از ۱۰ نانومتر در کل ساختار فرآوری شده کم می‌باشد گسیل نانوذرات به نسبت کم است. ولی همانطور که در شکل دیده می‌شود ذرات اصلاح سطحی شده طیف PL بسیار قوی‌تر (در حدود هزار برابر) نسبت به ذرات کربنی دیگر را دارند. طیف فوتولومینسانس مشاهده شده در دیگر طول‌موج‌های برانگیختگی بسیار ضعیف بود. از آنجاییکه اندازه ذرات عامل اصلی گسیل نانوذرات کربنی با طول‌موج‌های برانگیختگی مختلف است [۱۸]، می‌توان نتیجه گرفت که نانوذرات فرآوری شده در اینجا تقریباً تک اندازه هستند.



شکل ۶. نمودار تابش فوتولومینسانس PL نانوذرات کربنی قبل (منحنی آبی رنگ نقطه‌چین) و بعد (منحنی قرمز رنگ) از اصلاح سطحی و نمودار جذب UV/VIS نانوذرات کربنی فرآوری شده قبل (منحنی مشکی نقطه‌چین) و بعد از اصلاح سطحی.

به اثبات رسیده است که مولکول آلی پلی‌اتیلن گلیکول باعث حذف ترازهای میانی اتمهای سطحی کربن شده و مانع از فروافت غیرتابشی می‌شود [۱۱]. بنابراین پایدارسازی و گسیلنده کردن سطوح انرژی با PEG<sub>1000N</sub> مهمترین دلیل افزایش طیف PL بعد از اصلاح سطحی است. همچنین درحالت کلی هرچقدر محصورشدگی نانوذرات بیشتر باشد به دلیل افزایش سطح به حجم و محصورشدگی کوانتومی بیشتر سطوح انرژی، طیف فوتولومینسانس قوی‌تر می‌شود. در این مقاله نشان داده شد که برگشت در اسید موجب افزایش محصورشدگی



شکل ۵. منحنی رامان نانوذرات کربنی. پیک‌های ظاهر شده در ۱۳۵۴ و ۱۵۹۷ به ترتیب مربوط به باند G و باند D هستند.

به منظور بررسی خصوصیات اپتیکی نانوذرات کربنی فرآوری شده، مطالعات گسیل فوتولومینسانس PL و جذب UV/VIS بر روی نمونه‌ها انجام شد. شکل (۶) طیف جذبی UV/VIS و PL قبل و بعد از اصلاح سطحی را با طول موج برانگیختگی ۳۸۰ نانومتر نشان می‌دهد. نمودار نشان داده شده با Abs-1 و Abs-2 به ترتیب مربوطه به طیف جذبی نانوذرات کربنی قبل و بعد از اصلاح سطحی و نمودارهای PL-1 و PL-2 به ترتیب مربوط به طیف فوتولومینسانس نانوذرات قبل و بعد از اصلاح سطحی می‌باشد. نانوذرات کربنی که با روشهای بالا به پایین فرآوری می‌شوند معمولاً جذب نوری با قله‌ای در ناحیه فرابنفش دارند که طیف جذبی آنها تا محدوده مرئی کشیده می‌شود [۱]. این رفتار در منحنی جذبی UV/VIS شکل (۶) نیز مشاهده می‌شود. همانطور که در شکل دیده می‌شود بعد از اصلاح سطحی قله طیف جذبی از ۲۴۰ نانومتر به طول موج‌های بلندتر (۲۷۰ نانومتر) منتقل شده و جابه‌جایی به قرمز دارد. باریک بودن این نوار جذبی دلیلی بر کوچک بودن گستره توزیع اندازه ذرات در نمونه است. نوار جذبی دیگری با شدت بسیار کمتر با پیک ۳۴۰ نانومتر نیز مشاهده می‌شود که مربوط به ذرات با اندازه‌های متفاوت است. این نتایج با شکل (۳) و تصاویر TEM ذرات تطابق دارد.

با برانگیخته کردن نمونه با طول موج ۳۸۰ نانومتر، نانوذرات کربنی در ناحیه مرئی طول موج ۴۸۰ نانومتر



- fluorescence imaging agents," *J. Phys. Chem. C*, vol. 113, pp. 18110-18114, 2009.
- [3] M. L. Bhaisare, A. Talib, M. S. Khan, S. Pandey, and H.-F. Wu, "Synthesis of fluorescent carbon dots via microwave carbonization of citric acid in presence of tetraoctylammonium ion, and their application to cellular bioimaging," *Microchimica Acta*, vol. 182, pp. 2173-2181, 2015.
- [4] K. Dimos, "Carbon Quantum Dots: Surface Passivation and Functionalization," *Curr. Org. Chem.*, vol. 20, pp. 682-695, 2016.
- [5] P. Zhang, Z.-A. Qiao, and S. Dai, "Recent advances in carbon nanospheres: synthetic routes and applications," *Chemical Communications*, vol. 51, pp. 9246-9256, 2015.
- [6] L. Cao, X. Wang, M. J. Meziani, F. Lu, H. Wang, P. G. Luo, *et al.*, "Carbon dots for multiphoton bioimaging," *J. Am. Chem. Soc.*, vol. 129, pp. 11318-11319, 2007.
- [7] S.-T. Yang, L. Cao, P. G. Luo, F. Lu, X. Wang, H. Wang, *et al.*, "Carbon dots for optical imaging in vivo," *J. Am. Chem. Soc.*, vol. 131, pp. 11308-11309, 2009.
- [8] X. Xu, R. Ray, Y. Gu, H. J. Ploehn, L. Gearheart, K. Raker, *et al.*, "Electrophoretic analysis and purification of fluorescent single-walled carbon nanotube fragments," *Journal of the American Chemical Society*, vol. 126, pp. 12736-12737, 2004.
- [9] J. Shen, Y. Zhu, X. Yang, and C. Li, "Graphene quantum dots: emergent nanolights for bioimaging, sensors, catalysis and photovoltaic devices," *Chemical Communications*, vol. 48, pp. 3686-3699, 2012.
- [10] X. Li, H. Wang, Y. Shimizu, A. Pyatenko, K. Kawaguchi, and N. Koshizaki, "Preparation of carbon quantum dots with tunable

کوانتومی می‌شود. بنابراین دو سازوکار اصلی که برای افزایش فوتولومینسانس نانوذرات کربنی بعد از اصلاح سطحی پیشنهاد می‌شود گسیل تابشی در اثر حذف ترازهای میانی با مولکول‌های آلی و همچنین محصورشدگی کوانتومی با برگشت در اسید است.

## ۵. نتیجه گیری

نانوذرات کربنی به روش کندگی لیزری در محیط خلاء و تحت جریان گاز آرگون فرآوری شد. در این تحقیق با استفاده از مشخصه‌یابی‌های انجام شده نشان داده شد که تک‌اندازه و بلوری بودن محصول فرآوری شده از مزایای روش لیزری می‌باشد. عکس‌های تصویربرداری FESEM و منحنی رامان تشکیل نانوذرات را تأیید کرد. نمودار XRD نشان داد که ساختار نانوذرات کربنی بلوری می‌باشد. سپس نانوذرات کربنی با فرآیند برگشت در اسید و با مولکول‌های آلی پلی اتیلن گلیکول اصلاح سطحی شدند. نتایج تصاویر میکروسکوپ TEM نشان داد برگشت نانوذرات در اسید باعث جدا شدن ذرات از یکدیگر در ساختار پیوسته کربنی می‌شود. همچنین طیف فوتولومینسانس ذرات نشان داد که اصلاح سطح نانوذرات کربنی با PEG<sub>1000N</sub> باعث افزایش محصورشدگی کوانتومی ذرات و افزایش سطح به حجم ساختار شده، ترازهای میانی از سطح نانوذرات را حذف کرده و در نتیجه طیف PL را ارتقاء می‌دهد. افزایش نهایی تابش فوتولومینسانس نانوذرات کربنی با عملیات اصلاح سطحی در حدود هزار برابر است. خواص اپتیکی جالب توجه این ذرات، یعنی جذب در ناحیه فرابنفش و طیف فوتولومینسانس در ناحیه مرئی امکان تعریف کاربردهای فراوانی را برای آنها ایجاد می‌کند.

## مرجع‌ها

- [1] H. Li, Z. Kang, Y. Liu, and S.-T. Lee, "Carbon nanodots: synthesis, properties and applications," *J. Mater. Chem.*, vol. 22, p. 24230, 2012.
- [2] S.-T. Yang, X. Wang, H. Wang, F. Lu, P. G. Luo, L. Cao, *et al.*, "Carbon dots as nontoxic and high-performance

- [18] Q.-L. Zhao, Z.-L. Zhang, B.-H. Huang, J. Peng, M. Zhang, and D.-W. Pang, "Facile preparation of low cytotoxicity fluorescent carbon nanocrystals by electrooxidation of graphite," *Chem. Commun.*, pp. 5116-5118, 2008.
- [11] Y.-P. Sun, B. Zhou, Y. Lin, W. Wang, K. S. Fernando, P. Pathak, *et al.*, "Quantum-sized carbon dots for bright and colorful photoluminescence," *J. Am. Chem. Soc.*, vol. 128, pp. 7756-7757, 2006.
- [12] S.-L. Hu, K.-Y. Niu, J. Sun, J. Yang, N.-Q. Zhao, and X.-W. Du, "One-step synthesis of fluorescent carbon nanoparticles by laser irradiation," *J. Mater. Chem.*, vol. 19, pp. 484-488, 2009.
- [13] S. Z. Mortazavi, P. Parvin, A. Reyhani, S. Mirershadi, and R. Sadighi-Bonabi, "Generation of various carbon nanostructures in water using IR/UV laser ablation," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 46, p. 165303, 2013.
- [14] H. Ming, Z. Ma, Y. Liu, K. Pan, H. Yu, F. Wang, *et al.*, "Large scale electrochemical synthesis of high quality carbon nanodots and their photocatalytic property," *Dalton Transactions*, vol. 41, pp. 9526-9531, 2012.
- [15] F.-C. Tai, S.-C. Lee, C. Wei, and S. Tyan, "Correlation between ID/IG Ratio from visible Raman spectra and sp<sup>2</sup>/sp<sup>3</sup> ratio from XPS spectra of annealed hydrogenated DLC film," *Materials transactions*, vol. 47, pp. 1847-1852, 2006.
- [16] A. C. Ferrari and J. Robertson, "Interpretation of Raman spectra of disordered and amorphous carbon," *Physical review B*, vol. 61, p. 14095, 2000.
- [17] P. Miao, K. Han, Y. Tang, B. Wang, T. Lin, and W. Cheng, "Recent advances in carbon nanodots: synthesis, properties and biomedical applications," *Nanoscale*, vol. 7, pp. 1586-1595, 2015.
- photoluminescence by rapid laser passivation in ordinary organic solvents," *Chem. Commun.*, vol. 47, pp. 932-4, Jan 21 2011.