

بررسی خواص نوری نقاط کوانتومی CdS با غلظت‌های مختلف تحت تابش چشمه گاما به منظور کاربرد در دزیمتری

عفت عصار نوقایی*، حسن اله‌داغی، بهنام آزادگان، علی اصغر مولوی و جواد باعدی

دانشکده علوم پایه، دانشگاه، حکیم سبزواری، سبزواری، خراسان رضوی، ایران.

*خراسان رضوی، سبزواری، دانشگاه حکیم سبزواری، دانشکده علوم پایه، کدپستی: ۹۶۱۷۹۷۶۴۸۷

پست الکترونیکی: e.assar88@gmail.com

چکیده

در این پژوهش برای اولین بار خواص نوری نقاط کوانتومی CdS با غلظت‌های مختلف تحت تابش پرتوهای گامای کبالت-۶۰ مورد بررسی قرار گرفت. نقاط کوانتومی CdS به روشی سریع، ساده و محلول در آب با استفاده از تابش ریزموج خانگی سنتز شدند. نقاط کوانتومی با سه غلظت مختلف ۰/۴، ۲ و ۲۰ mg/cc در بازه دز ۰-۲۰ kGy در معرض چشمه گاما قرار گرفتند. نتایج نشان دادند که با افزایش غلظت نقاط کوانتومی CdS، حساسیت ماده نسبت به تابش کم و آسیب نوری نقاط کوانتومی کاهش می‌یابد. به طوری که برای کمترین مقدار غلظت در دز ۲۰ kGy ماده کاملاً نورتایی خود را از دست داد و شدت فوتولومینسانس صفر گردید، در حالی که برای بیشترین غلظت در دز ۲۰ kGy ماده نورتایی قابل توجهی داشت. شدت فوتولومینسانس نقاط کوانتومی برای غلظت‌های ۰/۴، ۲ و ۱ kGy با افزایش دز تا ۱ kGy، افزایش یافت. با تحلیل طیف‌های نوری مشخص شد که تابش گاما فقط باعث رشد نقاط کوانتومی می‌شود. با توجه به سنجش دز مورد نظر می‌توان از غلظت مناسب برای این روش دزیمتری جدید استفاده کرد.

کلیدواژگان: نقاط کوانتومی، CdS، خواص نوری، تابش گاما، دزیمتر.

۱. مقدمه

نقاط کوانتومی نیمه‌رسانا و نانو سوسوزن‌ها اخیراً در حوزه زیست‌پزشکی مورد توجه زیادی قرار گرفته‌اند [۱-۲]، زیرا خواص نوری منحصر به فردی از قبیل طیف گسیلی قابل تنظیم، بهبود بازده کوانتومی فلورسانس و پایداری نوری نسبت به رنگدانه‌های آلی معمول دارند. هنگامی که اندازه نانوبلورها کمتر یا مساوی با اکسایتون‌های تولید شده در مواد حجیم‌شان شوند اثر محدودیت کوانتومی ظاهر می‌شود، که به این دلیل این نانوذرات نقاط کوانتومی نامیده می‌شوند [۳]. خواص نوری نقاط کوانتومی بر حسب میزان دز جذبی تابش‌های یونیزان در مطالعات اخیر مورد بررسی قرار گرفته است. این مطالعات شامل اثر تابش اشعه ایکس [۴]، پرتوهای گاما [۳، ۵]، ذرات آلفا [۶] و الکترون [۴، ۷] روی فلورسانس

۲. مواد و روش‌ها

۱.۲. مواد شیمیایی

کادمیوم سولفات $3\text{CdSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ، سدیم تیوسولفات $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ، تیوگلیکولیک اسید^۱ (TGA)، اتانول ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$)، استن (CH_3COCH_3) و آمونیاک (NaOH) از شرکت مرک آلمان تهیه شدند.

۲.۲. روش سنتز نقاط کوانتومی CdS

ابتدا محلول آبی از کادمیوم سولفات $3\text{CdSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ و TGA به‌عنوان عامل پوششی با غلظت‌های 20 mM و 100 mM با حجم 60 cc تهیه گردید. سپس PH این محلول توسط NaOH روی عدد ۹ تنظیم شد. در ادامه محلول آبی از سدیم تیوسولفات $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ با غلظت 260 mM و حجم 40 cc آماده گردید. به دلیل اینکه تمام ماده سدیم تیوسولفات در واکنش شرکت نمی‌کند غلظت این ماده بیشتر در نظر گرفته می‌شود. برای جلوگیری از رسوب محلول و واکنش‌های احتمالی بهتر است که محلول آبی $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ به صورت تازه آماده گردد.

محلول‌های تهیه شده به درون ظرف شیشه‌ای که دارای چندین سوراخ بر روی درپوش خود برای هم فشار بودن با محیط می‌باشد، منتقل گردید. سپس ظرف شیشه‌ای داخل اتاق ریزموج خانگی به مدت ۵ دقیقه با توان تابشی 500 W قرار گرفت. پس از خارج نمودن محلول و سرد شدن در دمای اتاق به آن استن اضافه شد تا محلول به صورت شیری رنگ شود. در ادامه سانتریفیوژ با سرعت 3500 rpm به مدت ۱۵ دقیقه انجام گردید و نقاط کوانتومی CdS ته‌نشین شده دوباره در آب یون‌زدایی حل گردید. سه محلول با غلظت‌های $2, 0, 4 \text{ mg/cc}$ و 20 آماده و به داخل میکروتیوپ منتقل شدند. از هر غلظت

مواد نانوکامپوزیت و نقاط کوانتومی می‌باشد. این پژوهش‌ها خصوصاً گزارش [۳] امکان استفاده از نقاط کوانتومی را به عنوان یک دزیتر جدید تأیید می‌نماید.

در گزارش [۳] که در سال ۲۰۰۹ توسط استودیلکا و همکاران ارائه شده است، خواص نوری نقاط کوانتومی CdSe/ZnS محلول در هگزان تحت تابش گامای کبالت-۶۰ در بازه $0-100 \text{ Gy}$ بررسی گردید. ویترز و همکاران در سال ۲۰۰۸ آسیب نوری این نقاط کوانتومی را تحت تابش گاما مورد ارزیابی قرار دادند. آن‌ها مشاهده نمودند که نقاط کوانتومی CdSe/ZnS مقاومت تابشی ضعیفی دارد و پس از تابش 174 Gy به شدت آسیب دیدند [۸].

به هرحال جهت استفاده از نقاط کوانتومی نورتاب به‌عنوان دزیتر عوامل زیادی نقش دارد که مستلزم تحقیقات و فهم بیشتری می‌باشد. از مهمترین این عوامل می‌توان به اثر اندازه نقطه کوانتومی، بهینه نمودن میزان غلظت نقاط کوانتومی در محلول، دمای خود نقاط کوانتومی و همچنین اثرات آهنگ دز، نوع و انرژی تابش اشاره نمود [۹].

در این پژوهش برای اولین بار خواص نوری نقاط کوانتومی CdS محلول در آب با غلظت‌های مختلف تحت تابش پرتوهای گاما مورد بررسی قرار گرفت. از چشمه گامای کبالت-۶۰ با دز تابشی در بازه $20-0 \text{ kGy}$ استفاده گردید. نقاط کوانتومی CdS به روشی ساده و سریع تابش ریزموج سنتز گردیدند. این پژوهش نسبت به گزارشات ارائه شده [۳، ۵، ۸، ۹] چندین مزیت دارد. از جمله روش سریع و آسان سنتز نقاط کوانتومی CdS، فرار و غیر سمی بودن حلال آن و همچنین نقاط کوانتومی CdS مقاومت تابشی بالایی تحت تابش گاما داشت که می‌تواند برای بازه بزرگتری از دز پرتوهای گاما به کار رود.

^۱ Thioglycolic acid

یک نمونه به عنوان نمونه مرجع (دز Gy ۰) و دیگر نمونه‌ها برای دزهای مختلف تابش گاما در نظر گرفته شدند.

۳.۲. تابش دهی چشمه گاما

میکروتیوپ‌های حاوی محلول نقاط کوانتومی CdS با غلظت‌های ۰/۴، ۰/۲ و ۲۰ mg/cc توسط چشمه گامای کبالت-۶۰ موجود در سازمان انرژی اتمی تحت تابش قرار گرفتند. آهنگ دز تابشی چشمه گاما ثابت و برابر با ۱/۵۲ Gy/S و میزان دز تابشی در بازه ۰-۲۰ kGy متغیر بود.

۴.۲. مشخصه‌یابی

جهت سنتز نقاط کوانتومی از اتاق ریز موج خانگی GHz ۲/۴۵ استفاده گردید. طیف فوتولومینسانس، طیف جذبی و طیف تبدیل فوریه مادون قرمز به ترتیب توسط دستگاه‌های Perkin-Elmer: UV-Vis Lambda 25, Avantes Shimadzu 8700s با قرص KBr اندازه‌گیری شد. تصاویر میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) با استفاده از دستگاه میکروسکوپ الکترونی JEOL-JEM 1400 با ولتاژ شتاب دهنده ۱۲۰ kV به دست آمد.

۳. بحث و نتایج

۱.۳. اثر تابش گاما روی شدت فوتولومینسانس و طیف

جذبی نقاط کوانتومی CdS

شکل ۱-الف طیف فوتولومینسانس نقاط کوانتومی CdS با غلظت نسبی ۰/۰۲ (۰/۴ mg/cc) را در ناحیه طول موج ۴۰۰-۶۵۰ nm برای دزهای مختلف پرتوی گاما نشان می‌دهد. دزهای پرتوی گاما شامل ۰، ۱۰، ۱۰۰، ۱۰۰۰، ۲۰۰۰۰ هستند. قله طیف در طول موج ۴۷۵ nm مشاهده می‌شود. همانطور که مشاهده می‌گردد شدت فوتولومینسانس با

افزایش دز پرتوی گاما تا ۱ kGy افزایش می‌یابد. در دز ۲۰ kGy شدت فوتولومینسانس صفر شده است که بیانگر این است که نقاط کوانتومی به طور کامل نورتایی خود را از دست داده‌اند. اما بایستی عوامل مختلف از قبیل غلظت و اندازه نقاط کوانتومی بهینه شود که یک رابطه مناسب بین شدت فوتولومینسانس و میزان دز تابشی برقرار باشد. در شکل ۱-ب طیف جذبی مربوط به قسمت الف بر حسب انرژی نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود برای نمونه مرجع (۰ Gy) نمودار در انرژی حدود ۳/۱۶ eV به بعد تا انرژی ۳/۵۴ eV دچار یک خیز شدید می‌شود. انرژی وسط این بازه ۳/۳۵ حدوداً برابر گاف انرژی است. طول موج متناظر با انرژی ۳/۳۵ eV از رابطه ($E = hc/\lambda$) برابر ۳۷۵ nm می‌باشد. در حالی که در قسمت الف پیک شدت فوتولومینسانس در طول موج ۴۷۵ nm اتفاق افتاده بود، بنابراین نورتایی نقاط کوانتومی مربوط به گاف انرژی نمی‌باشد بلکه بر اساس مقالات گزارش شده [۱۰-۱۱] نورتایی‌ها مربوط به نقص‌های سطحی می‌باشد. از مقایسه طیف‌های جذبی برای نمونه مرجع، دز ۱ kGy و ۲۰ kGy تابش گاما همانطور که مشاهده می‌گردد با افزایش دز، گاف انرژی کاهش یافته است. با کاهش انرژی گاف اندازه نقطه کوانتومی افزایش می‌یابد [۱۰]. بنابراین با افزایش دز پرتوهای گاما اندازه نقاط کوانتومی افزایش یافته است. در نتیجه علت تغییرات شدت فوتولومینسانس به افزایش اندازه ذرات مربوط می‌شود. تابش گاما می‌تواند انرژی لازم برای رشد نانوذرات را فراهم کند. در مقالات اشاره می‌شود که تابش گاما در آب منجر به تولید عواملی همچون رادیکال آزاد، H^+ ، e^+ و e^- می‌شود [۱۲]. رادیکال‌های آزاد باعث می‌شوند که مولکول‌های پوششی از سطح ذرات جدا شود و ذرات بهم بچسبند و باعث رشد آن‌ها شود. در نهایت مولکول‌های پوششی اضافی درون محلول یا مولکول‌های جدا شده به سطح ذرات بزرگ بچسبند طوری که محلول نهایی بعد از تابش، برای

¹ Transmissions Electron Microscope

شکل ۲، ۱ و ۳- الف نتیجه می‌شود که با افزایش غلظت نقاط کوانتومی میزان آسیب تابشی در ۲۰ kGy کاهش یافته است، به طوری که در شکل ۳- الف که غلظت بیشترین مقدار را دارد (غلظت نسبی ۱) در دز ۲۰ kGy شدت فوتولومینسانس میزان قابل توجهی (از ۰ تا ۱۳۰۰) دارد و در شکل ۲- الف با غلظت نسبی ۰/۱ شدت فوتولومینسانس بین ۰ تا ۲۰۰ تغییر کرده است.

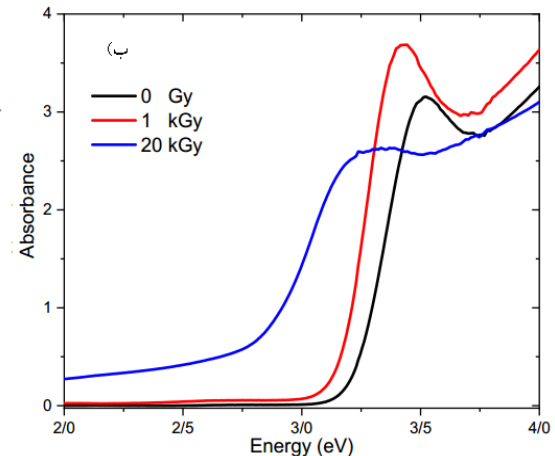
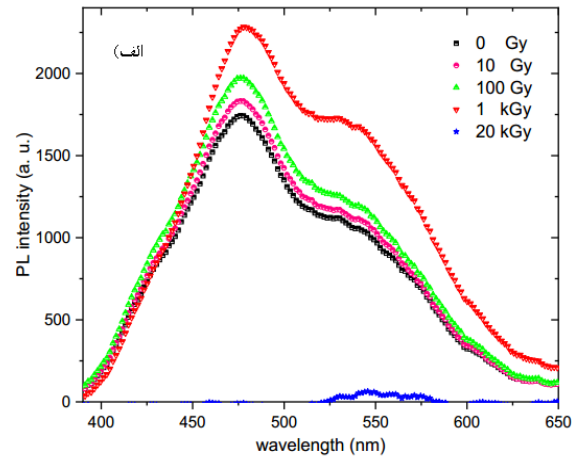
در حالی که در شکل ۱- الف که مربوط به نقاط کوانتومی با کمترین میزان غلظت (غلظت نسبی ۰/۰۲) است، شدت فوتولومینسانس در دز ۲۰ kGy تقریباً صفر شده است. بنابراین می‌توان استدلال نمود که با کاهش غلظت حساسیت ماده نورتاب نسبت به تابش افزایش می‌یابد. در نتیجه احتمال استفاده از نقاط کوانتومی با غلظت‌های بسیار پایین برای کاربرد در دزیتمتری پرتوهای گاما در آینده وجود دارد.

شکل‌های ۲ و ۳- ب به ترتیب طیف جذبی قسمت الف شکل‌های ۲ و ۳ را نشان می‌دهند که تغییرات آن همانند شکل ۱- ب می‌باشد با این تفاوت که با افزایش غلظت، گاف انرژی در دز ۲۰ kGy کاهش کمتری نسبت به گاف انرژی نمونه مرجع دارد. همانطور که ذکر شد با استفاده از نمودار طیف جذبی، می‌توان انرژی گاف را به دست آورد و با جایگذاری آن در رابطه تقریب جرم مؤثر [۱۰] اندازه نقاط کوانتومی CdS را می‌توان محاسبه نمود. رابطه تقریب جرم مؤثر که در زیر آمده است رابطه‌ای بین انرژی گاف نقاط کوانتومی و اندازه آن‌ها می‌باشد.

$$E = E_{\infty} + \frac{h^2}{2d^2} \left(\frac{1}{\mu} \right) - \frac{3.572e^2}{3d} - \frac{0.779e^4}{h\epsilon^2} \mu \quad (1)$$

که E ، E_{∞} ، d ، μ ، ϵ ، h و e به ترتیب انرژی گاف نقطه کوانتومی، انرژی گاف ماده حجیم، قطر نقطه کوانتومی، جرم کاهش یافته الکترون و حفره، ضریب دی‌الکتریک، ثابت پلانک و بار الکترون می‌باشد.

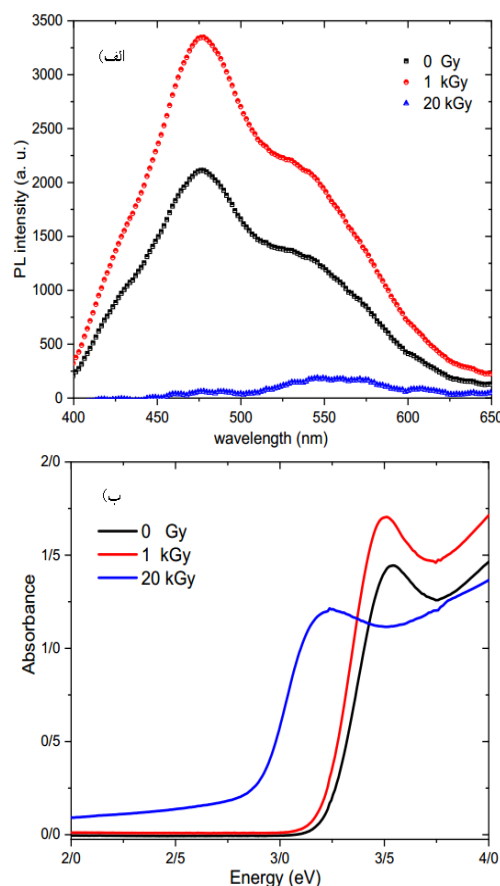
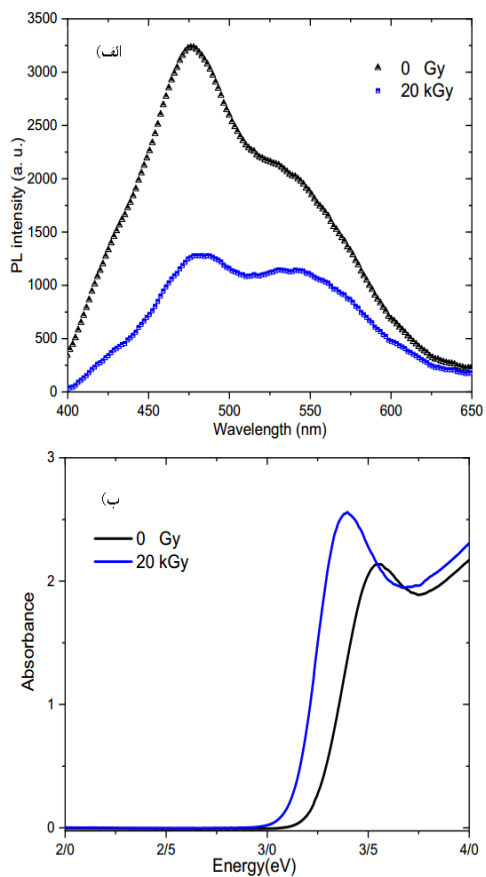
ذراتی که زیاد رشد نیافته‌اند، از نظر شیمیایی پایدار است. در واقع می‌توان گفت که مکانیزم رشد استوالد رایپینگ [۱۳] در اینجا صادق است. ذرات کوچکتر به نفع ذرات بزرگ کنار رفته‌اند و اشعه گاما انرژی لازم برای این کار را فراهم می‌کند و سرعت رشد را تسریع می‌کند.



شکل (۱): الف) طیف فوتولومینسانس و ب) طیف جذبی نقاط

کوانتومی CdS با غلظت نسبی ۰/۰۲ (۰/۴ mg/cc) برای دزهای مختلف پرتوی گاما.

شکل ۲- الف و ۳- الف طیف فوتولومینسانس نقاط کوانتومی CdS به ترتیب با غلظت‌های ۲ و ۲۰ mg/cc در بازه طول موج ۴۰۰-۶۵۰ nm را برای دزهای مختلف پرتوی گاما نشان می‌دهد. همانند شکل ۱- الف قله طیف در طول موج ۴۷۵ nm اتفاق افتاده است. همچنین روند تغییر شدت فوتولومینسانس برای هر دو شکل با افزایش دز همانند شکل ۱- الف می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود از مقایسه سه



شکل (۳): الف) طیف فوتولومینسانس و ب) طیف جذبی نقاط

کوانتومی CdS با غلظت نسبی ۱ (۲۰ mg/cc) برای نمونه مرجع و دز ۲۰ kGy

شکل (۴): الف) طیف فوتولومینسانس و ب) طیف جذبی نقاط

کوانتومی CdS با غلظت نسبی ۰/۱ (۲ mg/cc) دزهای مختلف پرتوی گاما.

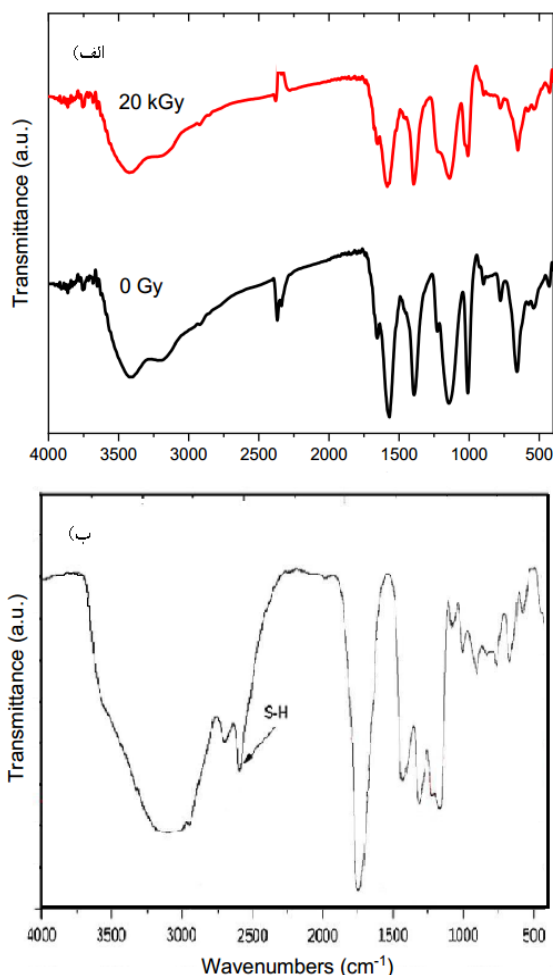
جدول (۱): اندازه و انرژی گاف نقاط کوانتومی با غلظت‌های متفاوت برای دزهای مختلف پرتوی گاما.

غلظت نسبی	اندازه نقطه کوانتومی (nm)	انرژی گاف (eV)	دز گاما (kGy)
۰/۰۲	۳/۲۵	۳/۳۵	۰
	۳/۴۷	۳/۲۳	۱
	۴/۲۲	۲/۹۵	۲۰
۰/۱	۳/۲۵	۳/۳۵	۰
	۳/۳۰	۳/۳۲	۱
	۳/۹۷	۳/۰۳	۲۰
۱	۳/۲۵	۳/۳۵	۰
	۳/۴۷	۳/۲۳	۲۰

در جدول ۱ اندازه و گاف انرژی نقاط کوانتومی برای همه غلظت‌ها و دزهای مختلف پرتوی گاما به دست آمده است. داده‌های جدول نشان می‌دهد که برای همه غلظت‌های نقاط کوانتومی با افزایش دز انرژی گاف کاهش و اندازه ذره افزایش یافته است. در نتیجه تابش پرتوهای گاما منجر به رشد ذرات شده است. همچنین مشاهده می‌شود در دز ۲۰ kGy با افزایش غلظت، اندازه نقطه کوانتومی نسبت به نمونه مرجع (دز ۰ Gy) کمتر دچار تغییر شده است، به طوری که اندازه نقطه کوانتومی مرجع ۳/۲۵ nm و در دز ۲۰ kGy برای غلظت‌های نسبی ۰/۰۲، ۰/۱ و ۱ به ترتیب برابر ۴/۲۲ nm، ۳/۹۷ nm و ۳/۴۷ nm می‌باشد. به عبارتی با افزایش غلظت، تأثیر تابش پرتوهای گاما روی رشد نانوذرات کاهش یافته است.

۲.۳. اثر تابش گاما بر روی پیوندهای مولکولی

شکل ۴- الف طیف مادون قرمز نقاط کوانتومی با غلظت نسبی ۱ را برای نمونه مرجع و نمونه‌ای که تحت تابش ۲۰ kGy قرار گرفته را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود تمام قله های جذب هر دو نمونه بر یکدیگر منطبق می‌باشد. بنابراین تابش گاما باعث شکست هیچ پیوند مولکولی نشده است. در نتیجه با توجه به طیف‌های نوری می‌توان گفت که مکانیزم اصلی تغییرات نورتابی تحت تأثیر تابش گاما رشد نقاط کوانتومی است. شکل ۴ ب- طیف مادون قرمز مربوط به عامل پوششی تیوگلیکولیک اسید (TGA) می‌باشد [۱۱].

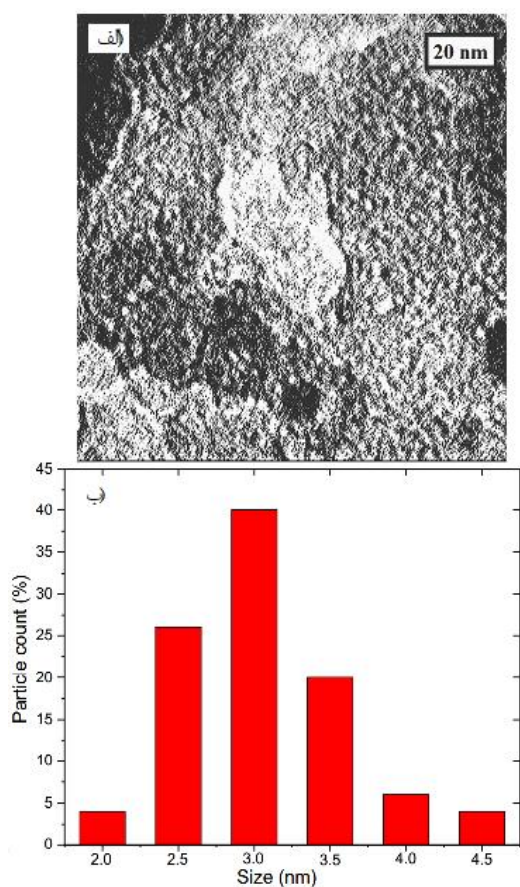


شکل (۴): طیف تبدیل فوریه مادون قرمز الف) نقاط کوانتومی با غلظت نسبی ۱ برای نمونه مرجع و نمونه‌ی تحت تابش ۲۰ kGy و ب) عامل پوشش تیوگلیکولیک اسید (TGA) [۱۱].

همانطور که مشاهده می‌شود قله مربوط به جذب کششی پیوند SH در طیف قسمت الف وجود ندارد، که بیانگر پیوند TGA با نقاط کوانتومی CdS است.

۳.۳. اندازه نقاط کوانتومی

شکل ۵- الف تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری نقاط کوانتومی نمونه مرجع را نشان می‌دهد. نقاط کوانتومی همان نقاط مشکی رنگ به صورت دایره‌ای مانند هستند. شکل ۵- ب هیستوگرام استخراج شده از تصویر قسمت الف می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌گردد اندازه اکثر نقاط کوانتومی برابر ۳ nm بود. اندازه نقاط کوانتومی مرجع که از رابطه تقریب جرم مؤثر [۱۰] محاسبه گردید برابر ۳/۲۵ nm به دست آمد که تطابق خوبی با مقدار اندازه‌گیری شده دارد.



شکل (۵): الف) تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری نقاط کوانتومی CdS مرجع و ب) هیستوگرام به دست آمده از قسمت الف.

۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله خواص نوری نقاط کوانتومی CdS تحت تابش پرتوهای گامای کبالت-۶۰ جهت کاربرد در دزیمتری مورد بررسی قرار گرفت. غلظت‌های مختلف نقاط کوانتومی محلول در آب در بازه دز ۰-۲۰ kGy مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان دادند که با کاهش غلظت نقاط کوانتومی، حساسیت ماده نسبت به تابش گاما افزایش یافت به طوری که در دز ۲۰ kGy ماده کاملاً آسیب دید. برای نقاط کوانتومی با غلظت‌های ۰/۴ و ۲ mg/cc با افزایش دز تا ۱ kGy شدت فوتولومینسانس افزایش یافت. با استفاده از طیف جذبی و رابطه تقریب جرم مؤثر مشاهده گردید که در اثر تابش پرتوهای گاما، اندازه نقاط

کوانتومی افزایش می‌یابد. علاوه بر این طیف تبدیل فوریه مادون قرمز نشان داد که در اثر تابش گاما هیچ پیوند مولکولی دچار تغییر نشد، بنابراین تنها دلیل تغییرات مشخصات نوری تحت تأثیر تابش گاما، افزایش اندازه نقاط کوانتومی بود. در نهایت با توجه به روند افزایشی شدت فوتولومینسانس با افزایش دز چشمه گاما برای نقاط کوانتومی CdS با غلظت ۰/۴ mg/cc این نتیجه حاصل گردید که در غلظت‌های پایین، امکان استفاده از این ماده نورتاب در کاربردهای دزیمتری وجود دارد.

۵. مراجع

- [1] G. Gaur, D.S. Koktysh, D.M. Fleetwood, R.A. Weller, R.A. Reed, B.R. Rogers and S.M. Weiss. Influence of Ionizing Radiation and the Role of Thiol Ligands on the Reversible Photodarkening of Cdte/Cds Quantum Dots, *ACS Applied Materials & Interfaces*, 8 (2016) 7869–7876.
- [2] Y. Xing, Z. Xia and J. Rao. Semiconductor Quantum Dots for Biosensing and in Vivo Imaging, *IEEE transactions on nanobioscience*, 8 (2009) 4–12.
- [3] R.Z. Stodilka, J.J. Carson, K. Yu, M.B. Zaman, C. Li and D. Wilkinson. Optical Degradation of Cdse/Zns Quantum Dots Upon Gamma-Ray Irradiation, *The Journal of Physical Chemistry C*, 113 (2009) 2580–2585.
- [4] Y.M. Azhniuk, A. Gomonnai, M. Kranjčec, V. Lopushansky, I. Megela and D. Goyer. Irradiation-Induced Ionization of Glass-Embedded Cds_{1-x}Sex Nanocrystals, *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 17 (2003) 518–520.
- [5] Y. Li, X. Dong, J. Gao, D. Hei, X. Zhou and H. Zhang. A Highly Sensitive Γ -Radiation Dosimeter Based on the Ceo₂ Nanowires, *Physica E: Low-dimensional systems and nanostructures*, 41 (2009) 1550–1553.
- [6] S. Letant and T.-F. Wang. Semiconductor Quantum Dot Scintillation Under Γ -Ray Irradiation, *Nano Letters*, 6 (2006) 2877–2880.
- [7] R. Leon, J. Nadeau, K. Evans, T. Paskova and B. Monemar. Electron Irradiation Effects on Nanocrystal Quantum Dots Used in Bio-Sensing Applications, *IEEE transactions on nuclear science*, 51 (2004) 3186–3192.
- [8] N.J. Withers, K. Sankar, B.A. Akins, T.A. Memon, T. Gu, J. Gu, G.A. Smolyakov, M.R. Greenberg, T.J. Boyle and M. Osiński. Rapid Degradation Of CdSe/ZnS Colloidal Quantum Dots Exposed to Gamma Irradiation, *Applied Physics Letters*, 93 (2008) 173101.
- [9] P. Hobson, D. Leslie and D. Smith. Effect Of Gamma Radiation on Potential Ionising Radiation Detectors and Dosimeters Based on Quantum Dots, in: 2011 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record, IEEE, 2011, pp. 3015–3017.
- [10] H. Alehdaghi, M. Marandi, M. Molaei, A. Irajizad and N. Taghavinia. Facile Synthesis Of Gradient Alloyed Zn_xCd_{1-x}S Nanocrystals Using a Microwave-Assisted Method, *Journal of alloys and compounds*, 586 (2014) 380–384.
- [11] M. Molaei, E.S. Iranizad, M. Marandi, N. Taghavinia and R. Amrollahi. Synthesis of Cds Nanocrystals By A Microwave Activated Method and Investigation of the Photoluminescence and Electroluminescence Properties, *Applied surface science*, 257 (2011) 9796–9801.
- [12] A.R. Ribeiro, O.C. Nunes, M.F. Pereira and A.M. Silva. An Overview On The Advanced Oxidation Processes Applied for the Treatment of Water Pollutants Defined in The Recently Launched Directive 2013/39/EU, *Environment international*, 75 (2015) 33–51.
- [13] L. Ratke and P.W. Voorhees, *Growth And Coarsening: Ostwald Ripening in Material Processing*, Springer Science & Business Media, (2013).