



ساخت و بررسی خصوصیت‌های ترمولومینسانسی نانوذرات $\text{CaF}_2:\text{Dy},\text{Tm}$

احسان صادقی^۱، مصطفی زاهدی‌فر*^{۱،۲}، محسن محرابی^۱
۱. پژوهشکده‌ی علوم و فن آوری نانو، دانشگاه کاشان، صندوق پستی: ۸۷۳۱۷۵۱۱۶۷، کاشان - ایران
۲. دانشکده فیزیک، دانشگاه کاشان، صندوق پستی: ۸۷۳۱۷۵۱۱۶۷، کاشان - ایران

چکیده: نانوذرات $\text{CaF}_2:\text{Dy},\text{Tm}$ با اندازه‌ی متوسط ۳۷ نانومتر به روش گرما-آبی ساخته شده‌اند. ساختار مکعبی نانوذرات با استفاده از دستگاه پراش پرتو ایکس تعیین شد. اندازه و شکل ذرات ساخته شده با استفاده از میکروسکوپ الکترون روبشی (SEM) مشاهده شده است. منحنی درخشش ترمولومینسانسی این نانوذره دارای ۳ قله در دماهای ۴۰۷، ۴۴۰ و ۴۸۵ کلوین بوده است. پاسخ ترمولومینسانسی نانوذرات $\text{CaF}_2:\text{Dy},\text{Tm}$ برای مقادیر متفاوت Dy و Tm مطالعه و بیشترین حساسیت در ۳ درصد مولی Dy و ۰٫۵ درصد مولی Tm به دست آمده‌اند. با توجه به پاسخ خطی دز تا بالای دز جذب شده‌ی ۱۰۰۰۰ Gy، فسفر ساخته شده برای کاربرد در دزیمتری دزهای بالا پیشنهاد شده است.

کلیدواژه‌ها: نانوذرات، ترمولومینسانس، ساخت، روش گرما-آبی

Synthesis and Thermoluminescence Characteristics of $\text{CaF}_2:\text{Dy},\text{Tm}$ Nanoparticles

E. Sadeghi¹, M. Zahedifar*^{1,2}, M. Mehrabi¹

1. Institute of Nanoscience and Nanotechnology, University of Kashan, P.O.Box: 8731751167, Kashan – Iran
2. Physics Department, University of Kashan, P.O.Box: 8731751167, Kashan – Iran

Abstract: $\text{CaF}_2:\text{Dy},\text{Tm}$ nanoparticles have been synthesized by the hydrothermal method. The cubic lattice structure has been confirmed by the X-ray diffraction (XRD) pattern and an average size of 37 nm is obtained using Deby-Schere's formula. The shape and size of particles are also observed by scanning electron microscopy (SEM). The thermoluminescence (TL) glow curve of the produced nanoparticles contains three overlapping glow peaks at approximately 407, 440 and 485 K. The TL phosphor characteristics has been studied for different Dy and Tm concentrations and the maximum sensitivity has been obtained at 3 mol% and 0.5 mol% of dysprosium and thulium impurities, respectively. The linear TL dose response over the absorbed dose rate of 10000 Gy, is recommend to be applied as a good candidate for high dose dosimetry.

Keywords: Nanoparticles, Thermoluminescence, Synthesis, Hydrothermal Method



۱. مقدمه

بریج ۳۵ به ۳۰ میلی‌لیتر آب یون‌زدایی شده، در حالی که بر روی هم‌زن قرار داشت، اضافه شد. بریج، پس از انحلال کامل، قطره‌قطره به محلول حاوی کلسیم نترات، در حالی که بر روی هم‌زن مغناطیسی قرار داشت، اضافه شد. در این لحظه، پس از افزودن مقادیر مختلفی از تولیم و دیسپروسیم نترات به آن، محلول NH_4F نیز به صورت قطره‌قطره به محلول حاوی کلسیم اضافه شده و چند دقیقه بر روی هم‌زن مغناطیسی قرار داده شد. محلول حاصل در داخل اتوکلاو به مدت ۱۲ ساعت در کوره با دمای 180°C قرار داده شد. محلول، پس از سرد شدن اتوکلاو، تا دمای اتاق، از آن بیرون آورده شده و با استفاده از سانتریفوژ، رسوب نانوذرات CaF_2 -آلاینده‌های تولیم و دیسپروسیم از محلول جدا شده و چند مرتبه با آب یون‌زدایی شده شسته و پس از آن رسوب خشک شده و به مدت ۲ ساعت در دمای 150°C در کوره قرار گرفت. ساختار نمونه‌ها با استفاده از دستگاه پراش پرتو ایکس (XRD) مدل Rigaku DmaxcIII تعیین شد. ریزنگارهای الکترونی با استفاده از یک دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل Philips XL-30 ESEM تهیه شد. پرتو دهی با استفاده از یک چشمه ^{60}Co انجام شد. برای خواندن نمونه‌های پرتو دهی شده، از دستگاه هارشاو مدل ۴۵۰۰ استفاده شد. نمونه‌ها با آهنگ گرمادهی 1°C/s از دمای 50°C تا 300°C خوانده شدند. گرمادهی نمونه‌ها به وسیله یک کوره با دقت ± 1 درجه‌ی سانتی‌گراد انجام شد و نمونه‌ها بلافاصله بعد از گرمادهی، نمونه‌ها (با آهنگ 75°C/min) تا دمای اتاق سرد شدند. نمونه‌های با جرم یکسان در تمامی مرحله‌های آزمایش استفاده شد؛ این کار با استفاده از یک ترازو با دقت 0.00001 g به انجام رسید.

۳. نتایج و بحث

۱.۳ مشخصه‌یابی نانوذرات

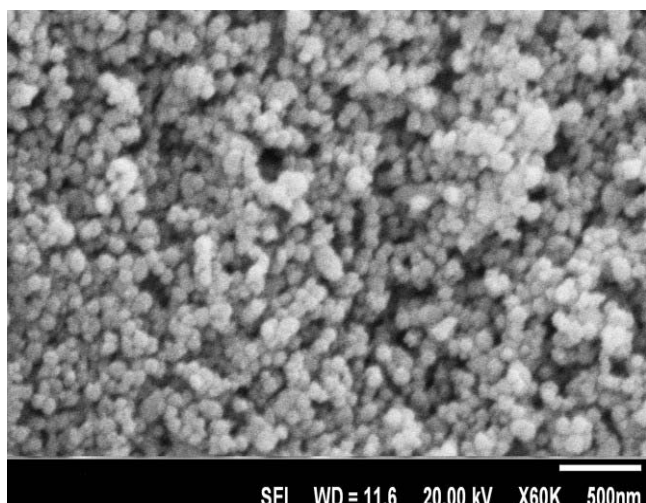
طیف پراش پرتو ایکس نانوذرات ساخته شده، در شکل ۱ مشاهده می‌شود. این طیف، که به خوبی با طیف مرجع به شماره کارت ۰۶۰۳۶۸ مطابقت می‌کند، تشکیل بلور CaF_2 با ساختار مکعبی را تأیید می‌کند. با استفاده از این طیف فرمول شکر اندازه تقریبی نانوبلورها به دست آمد

$$D = \frac{k\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (1)$$

تخمین صحیح مقدار دز جذب شده از پرتوهای یوننده یکی از دغدغه‌های اصلی در زمینه‌های مختلف علمی و عملی هم‌چون مراکز پزشکی، مراکز هسته‌ای و آزمایشگاه‌های پژوهشی استفاده‌کننده از این پرتوها است. ترمولومینسانس، یک روش دقیق برای تعیین دقیق مقدار دز جذب شده است. شدت و سطح زیر منحنی درخشش ترمولومینسانس متناسب با مقدار دز جذب شده است که این اساس دزیتری با این روش است. خواص فیزیکی، شیمیایی، الکترونیکی و نوری به اندازه و شکل مواد وابسته است به طوری که تفاوت بسیار زیادی در مقیاس نانو نسبت به حالت توده‌ای مشاهده شده است [۱]. مطالعه‌های اخیر نشان می‌دهند که نانو مواد قابلیت استفاده برای دزیتری پرتوهای یوننده را دارا هستند [۲، ۳]. CaF_2 با آلاینده‌های متفاوت (Dy، Mn و Tm) یکی از مواد شناخته شده در مطالعه‌های دزیتری است. این ماده در شاخه‌های مختلف دزیتری هم‌چون دزیتری محیطی، فردی و میدان‌های مرکب نوترون و گاما مورد استفاده قرار گرفته است [۴، ۵]. نانوذرات CaF_2 به روش‌های هم‌رسوبی و گرما-آبی ساخته شده‌اند؛ اندازه‌ی ذرات به دست آمده از روش گرما-آبی کوچک‌تر از ذرات تولید شده به روش هم‌رسوبی گزارش شده است [۶]. اخیراً نانوذرات $\text{CaF}_2:\text{Mn}$ ، $\text{CaF}_2:\text{Dy}$ و $\text{CaF}_2:\text{Tm}$ نیز سنتز شده‌اند. مطالعه‌ها، خواص دزیتری متفاوتی از این بلورها نسبت به حالت توده‌ای را نشان می‌دهند [۷، ۸، ۹]. ساخت نانوذرات $\text{CaF}_2:\text{Dy}$ ، $\text{CaF}_2:\text{Tm}$ تاکنون گزارش نشده است. در پژوهش حاضر، نانوذرات $\text{CaF}_2:\text{Dy}$ ، $\text{CaF}_2:\text{Tm}$ ساخته شده و خصوصیات دزیتری آن مورد مطالعه قرار گرفته است.

۲. روش‌ها

از روش گرما-آبی برای ساخت نانوذرات CaF_2 استفاده شد. مواد اولیه‌ی به کار رفته $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ، NH_4F ، تولیم نترات، دیسپروسیم نترات، بریج ^{35}Co ، اتانول و آب یون‌زدایی شده هستند. برای ساخت نانوذرات، ابتدا 0.3 g $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ در 20 mL میلی‌لیتر آب حل شد (محلول کلسیم نترات). سپس 0.94 g گرم NH_4F در بشر دیگری ریخته و به آن مقادیری از آب یون‌زدایی و اتانول اضافه شد (محلول آمونیم). پس از آن مقدار 7.5 g گرم

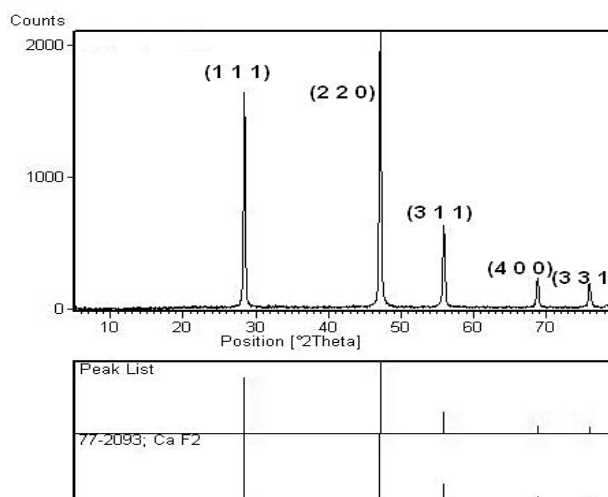


شکل ۲. ریزنگار میکروسکوپی الکترون عبوری نانوذرات $\text{CaF}_2:\text{Dy},\text{Tm}$.

که در آن b (پارامتر سینتیک) بین ۱ و ۲ است، E انرژی فعال‌سازی، T دما برحسب کلوین، T_m دمای بیشینه و k ثابت بولتزمن است. برای تعیین میزان انطباق منحنی‌های ترمولومینسانسی نظری و تجربی از رابطه‌ی FOM استفاده شد

$$\text{FOM} = \frac{\sum |y_i - f_i|}{\sum y_i} \times 100 \quad (3)$$

که در آن y_i مربوط به مقادیر اصلی یا داده‌های تجربی است و f_i بهترین مقداری است که از طریق این انطباق به دست می‌آید [۱۲]. فرایند گرمادهی هر بار قبل از پرتودهی، در دمای 400°C به مدت ۶۰ دقیقه انجام شد. فوتون‌های گسیل شده در پدیده‌ی ترمولومینسانسی به وسیله‌ی دستگاه تکثیرکننده فوتونی به جریان الکتریکی تبدیل شد. نمودار برازش شده‌ی مربوط به نانوذرات $\text{CaF}_2:\text{Dy},\text{Tm}$ پرتودهی شده با پرتو گامای چشمه‌ی ^{60}Co در شکل ۳ نشان داده شده است. با توجه به این شکل، منحنی درخشش نانوذرات از ۳ قله روی هم افتاده در دماهای 407°C ، 440°C و 485°C کلوین تشکیل شده است. مقدار FOM برابر 0.52 است که نشان‌دهنده‌ی یک برازش دقیق برای نمودار مربوطه است. جدول ۱ نتایج پارامترهای سینتیک به دست آمده از برازش این منحنی را نشان می‌دهد. مقدار آلاینده‌های به کار رفته در مواد ترمولومینسانس تأثیر زیادی بر ویژگی‌های دزیمتری و حساسیت این نمونه‌ها دارد. در ادامه تأثیر مقدار آلاینده‌ی Dy و T_m بر حساسیت نانوذرات $\text{CaF}_2:\text{Dy},\text{Tm}$ بررسی شد. برای این منظور



شکل ۱. الگوی پراش پرتو ایکس نانوذرات $\text{CaF}_2:\text{Dy},\text{Tm}$.

که در آن k یک مقدار ثابت و برابر 0.9 ، λ طول موج $\text{CuK}\alpha$ ، β پهنای نیم ارتفاع نوار (FWHM) و θ زاویه‌ی پراکندگی است. اندازه‌ی ذرات، 37 نانومتر محاسبه شد. ریزنگارهای میکروسکوپی الکترون پویایی نمونه‌های ساخته شده در شکل ۲ دیده می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود اندازه ذرات با نتایج به دست آمده از الگوی پراش پرتو ایکس در توافق است و نانوذرات از همگنی مناسبی برخوردار هستند.

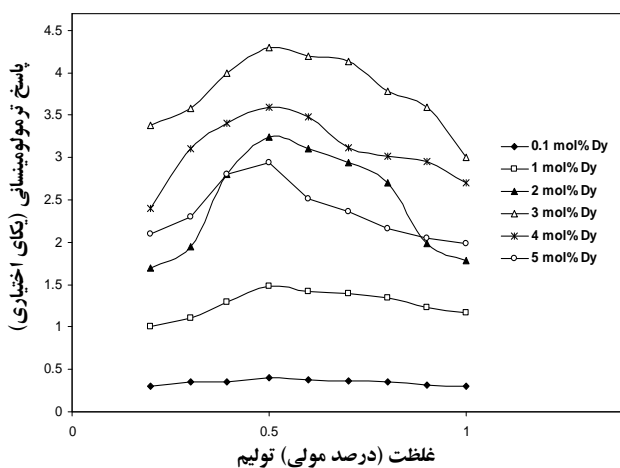
۲.۳ ویژگی‌های ترمولومینسانسی نانوذرات

ویژگی‌های ترمولومینسانسی نانوذرات $\text{CaF}_2:\text{Dy},\text{Tm}$ مانند منحنی درخشش ترمولومینسانسی، محوشدگی، ناحیه‌ی خطی پاسخ دز و تکرارپذیری مطالعه شد. ابتدا، روند گرمایی مورد نیاز برای حذف اثرات قبل از تابش بررسی شد. برای این منظور، نمونه‌ی نانوذرات ساخته شده در زمان‌های مختلف تحت عملیات گرمادهی قرار گرفته و منحنی درخشش آن‌ها بعد از پرتودهی با پرتو گامای چشمه‌ی ^{60}Co ثبت شد. بهترین روند گرمادهی به دست آمده، 400°C در مدت ۶۰ دقیقه بود. برای تعیین پارامترهای سینتیک نانوذرات، از مدل سینتیک مرتبه‌ی عام استفاده شد. برای این منظور، رابطه‌ی زیر که تابعی از شدت و دمای بیشینه است مورد استفاده قرار گرفت [۱۰، ۱۱]

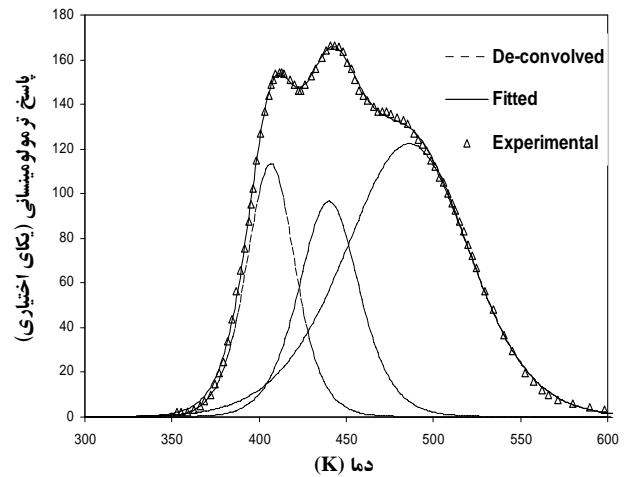
$$I(T) = I_m b^{\frac{b}{b-1}} \exp\left(\frac{E(T-T_m)}{kTT_m}\right) \times \left\{ \frac{T^v}{T_m^v} (b-1) \left(1 - \frac{v k T}{E}\right) \exp\left(\frac{E(T-T_m)}{kTT_m}\right) + 1 + (b-1) \frac{v k T_m}{E} \right\}^{\frac{-b}{b-1}} \quad (2)$$



یکسان، خوانده شدند. نتایج به دست آمده در شکل ۶ مشاهده می‌شود. براساس نتایج به دست آمده، پاسخ ترمولومینسانسی نانوذرات ساخته شده پس از ۳۰ روز فقط حدود ۷ درصد کاهش داشته است. این در صورتی است که برای نمونه‌های تجاری توده‌ای معروف مانند TLD-۲۰۰ (CaF_۲:Dy) مقادیر بالاتری از محوشدگی (۲۰ درصد پس از ۳۰ روز) گزارش شده است [۱۳]. مقدار گزارش شده برای نمونه تجاری TLD-۳۰۰ (CaF_۲:Tm) نیز بسیار بیش‌تر از مقدار به دست آمده برای نانوذرات ساخته شده است (حدود ۵ درصد برای قله‌ی سوم، ۱۵ درصد برای قله‌ی دوم و محو شدن کامل قله‌ی اول در روزهای نخستین) [۱۴]. افزایش پایداری پاسخ ترمولومینسانسی نانوذرات CaF_۲:Dy, Tm در مقایسه با نمونه‌های توده‌ای دزیمتر CaF_۲ با آلاینده‌های Dy و Tm نیز مشاهده می‌شود. باید توجه داشت که میزان محوشدگی پاسخ ترمولومینسانسی این نانوذرات حتی از نمونه‌های نانوذرات CaF_۲:Tm (با ۱۳ درصد محوشدگی پس از ۳۰ روز [۹])، نیز کم‌تر است. پاسخ ترمولومینسانسی نانوذرات ساخته شده، به پرتوهای گاما بررسی شد. نمونه‌های ساخته شده با دزهای مختلف تا حدود ۱۰۰۰۰ Gy پرتودهی شدند. شکل ۷ نمودار پاسخ ترمولومینسانسی این نانوذرات با افزایش دز جذب شده را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، پاسخ دز نانوذرات ساخته شده تا حدود ۱۰۰۰۰ Gy کاملاً خطی است. ناحیه‌ی خطی پاسخ دز برای نانوذرات ساخته شده نه تنها از نمونه‌های توده‌ای CaF_۲:Dy و CaF_۲:Tm گسترده‌تر است، بلکه نسبت به ناحیه گزارش شده برای نانوذرات این دو دزیمتر هم وسیع‌تر است [۸، ۹، ۱۵، ۱۶].



شکل ۴. تغییر میزان حساسیت ترمولومینسانسی CaF_۲:Dy, Tm با تغییر مقدار آلاینده‌های Dy و Tm.



شکل ۳. منحنی درخشش ترمولومینسانسی برآزش شده‌ی نانوذرات CaF_۲:Dy, Tm.

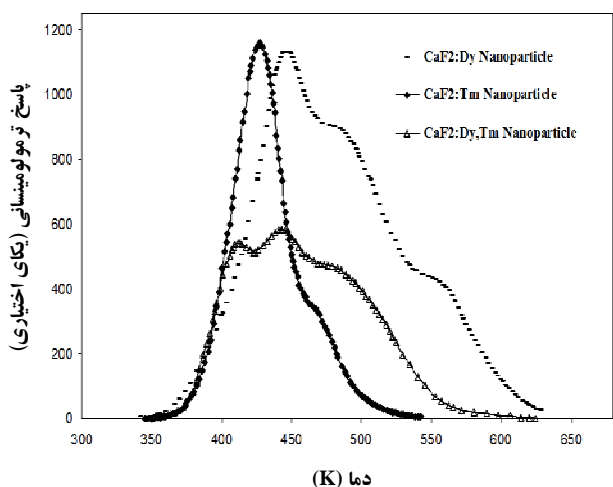
جدول ۱. پارامترهای گیراندازی منحنی درخشش نانوذرات CaF_۲:Dy, Tm

| Im (a.u) | Tm (K) | E (eV) | b | قله |
|----------|--------|--------|------|-----|
| ۱۱۳,۵ | ۴۰۷ | ۱,۳۷ | ۱,۶۸ | ۱ |
| ۹۶,۶ | ۴۴۰ | ۱,۲۹ | ۱,۷۸ | ۲ |
| ۱۲۲,۴ | ۴۸۵ | ۰,۶۷ | ۱,۴۰ | ۳ |

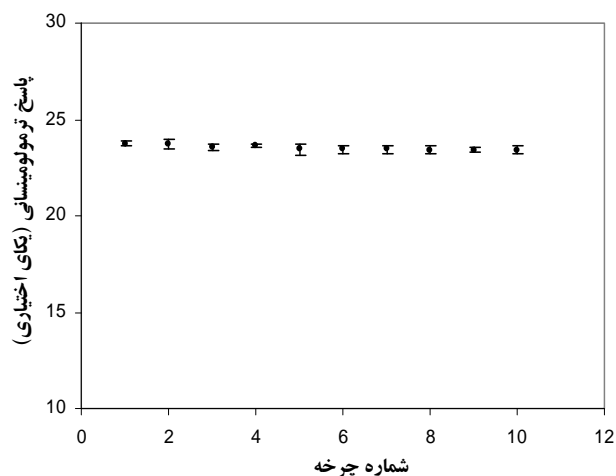
مقادیر مختلفی از دیسپروسیم و تولیم نیترا در مرحله سنتز استفاده شد. CaF_۲ با ۰,۱، ۰,۲، ۰,۳، ۰,۴ و ۰,۵ درصد مولی از Dy و مقادیر مختلف Tm ساخته شد و بیشینه حساسیت ترمولومینسانسی در ۳ درصد مولی Dy و ۰,۵ درصد مولی Tm به دست آمد. نتایج این مرحله‌ها در شکل ۴ مشاهده می‌شود. تکرارپذیری در حساسیت ترمولومینسانسی یک ماده‌ی دزیمتر یکی از مهم‌ترین خواص برای استفاده‌ی مکرر از آن است. برای برخورداری از تکرارپذیری مناسب، نمونه باید با تکرار فرایند گرمادهی، پرتودهی و خواندن، قله‌های ترمولومینسانسی با همان شدت قبلی تولید کند. برای بررسی تکرارپذیری نمونه‌ی ساخته شده، نمونه‌های یکسان، ۱۰ بار به طور پی‌درپی گرمادهی، پرتودهی و خوانده شدند. نتایج در شکل ۵ مشاهده می‌شوند. همان‌طور که مشاهده می‌شود نانوذرات پس از چند بار استفاده پی‌درپی دارای یک پاسخ ترمولومینسانسی تقریباً ثابت هستند. یکی از ویژگی‌های یک دزیمتر خوب پایداری نمودار ترمولومینسانسی آن بر اثر گذشت زمان است. به همین علت محوشدگی پاسخ ترمولومینسانسی نانوذرات ساخته شده نیز مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور، نمونه‌های یکسان با پرتو گاما تا دز پرتودهی ۵ Gy در محیط تاریک در دمای اتاق نگهداری شدند. سپس در فواصل زمانی ۰، ۱، ۷، ۱۵، ۲۱ و ۳۰ روز پس از پرتودهی، در شرایط

در ادامه، منحنی ترمولومینسانسی نانوذرات $\text{CaF}_2:\text{Dy}, \text{Tm}$ در مقایسه با منحنی ترمولومینسانسی نانوذرات $\text{CaF}_2:\text{Dy}$ و $\text{CaF}_2:\text{Tm}$ در شکل ۸ آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، حساسیت نانوذرات $\text{CaF}_2:\text{Dy}, \text{Tm}$ نسبت به دو نانوذره‌ی دیگر کم‌تر است. اما این نیز مشاهده می‌شود که نسبت به نانوذرات $\text{CaF}_2:\text{Dy}, \text{Tm}$ از یک منحنی با گستره‌ی دمایی کم‌تر، قله‌های کوچک‌تر و مشخص‌تر برخوردار است. منحنی نانوذرات $\text{CaF}_2:\text{Dy}$ از ۶ قله‌ی بسیار هم‌پوش تشکیل شده است. هم‌چنین قله‌های نانوذرات $\text{CaF}_2:\text{Dy}, \text{Tm}$ (به ویژه دو قله‌ی ۲ و ۳) نسبت به نانوذره‌ی $\text{CaF}_2:\text{Tm}$ در دمای بالاتری واقع شده‌اند که همین امر کاهش محوشدگی پاسخ ترمولومینسانسی نانوذرات $\text{CaF}_2:\text{Dy}, \text{Tm}$ در مقایسه با نانوذرات $\text{CaF}_2:\text{Tm}$ را به همراه دارد.

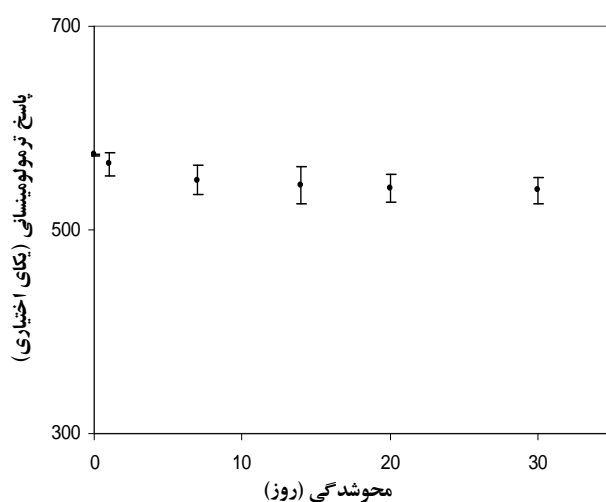
حساسیت ترمولومینسانسی نانوذرات $\text{CaF}_2:\text{Dy}, \text{Tm}$ با نمونه‌ی تجاری TLD-100 ($\text{LiF}:\text{Mg}, \text{Ti}$) نیز مقایسه شد. برای این کار هر دو نمونه مطابق با روند گرمایی مختص به خود، به یک اندازه پرتودهی و در یک نمودار، منحنی ترمولومینسانسی آن‌ها رسم شد. شکل ۹ نتایج به دست آمده را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که، اگرچه حساسیت نانوذرات نسبت به نمونه‌های توده‌ای دزیمتر CaF_2 کم‌تر است، اما هنوز حدود ۲ برابر بیش‌تر از حساسیت TLD-100 است. کم‌ترین دز قابل اندازه‌گیری توسط نانوذرات ساخته شده با استفاده از یک چشمه‌ی گامای ^{137}Cs تعیین شد. کمینه‌ی دز قابل آشکارسازی حدود 0.05 گری به دست آمد.



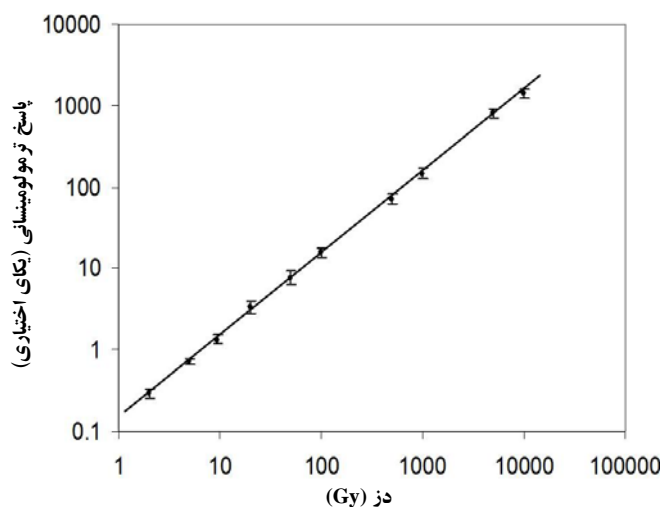
شکل ۸. مقایسه‌ی منحنی ترمولومینسانسی نانوذرات $\text{CaF}_2:\text{Dy}, \text{Tm}$ با نانوذرات $\text{CaF}_2:\text{Tm}$ و $\text{CaF}_2:\text{Dy}$ پرتودهی شده با استفاده از چشمه‌ی ^{60}Co .



شکل ۵. تکرارپذیری نانوذرات $\text{CaF}_2:\text{Dy}, \text{Tm}$ برای ده چرخه‌ی پی‌درپی گرمادهی، پرتودهی و خواندن.



شکل ۶. نمودار محوشدگی نانوذرات $\text{CaF}_2:\text{Dy}, \text{Tm}$ پس از گذشت ۰، ۱، ۱۵، ۲۱ و ۳۰ روز.



شکل ۷. منحنی درخشش نانوذرات $\text{CaF}_2:\text{Dy}, \text{Tm}$ در دزهای مختلف.

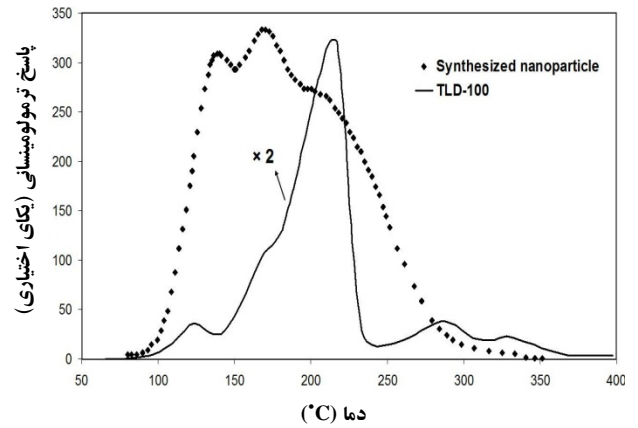


تقدیر و تشکر

نویسندگان از همکاری دانشگاه کاشان که همواره ما را در انجام این کار یاری رساندند، نهایت تشکر را دارند.

پی‌نوشت

۱. Brij 35



شکل ۹. مقایسه منحنی ترمولومینسانسی نانوذرات $\text{CaF}_2:\text{Dy,Tm}$ با نمونه‌ی تجاری TLD-100. پرتو دهی شده با استفاده از چشمه‌ی ^{60}Co .

۴. نتیجه‌گیری

منحنی درخشش ترمولومینسانسی نانوذرات ساخته شده شامل ۳ قله در دماهای ۴۰۷، ۴۴۰ و ۴۸۵ کلوین است. تکرارپذیری نمونه‌ی نانوذرات ساخته شده نیز برای اهداف دزیمتری مناسب است. نتایج نشان دادند که دامنه‌ی خطی پاسخ دز $\text{CaF}_2:\text{Dy,Tm}$ بسیار گسترده‌تر از برخی از نمونه‌های تجاری توده‌ای است. با توجه به مطالعات پیشین بر روی نانوذرات $\text{CaF}_2:\text{Dy}$ و $\text{CaF}_2:\text{Tm}$ و نتایج به دست آمده در این کار، مشاهده می‌شود که ورود هم‌زمان دو آلاینده‌ی دیسپروسیم و تولیم در نانوذرات CaF_2 ، در مقایسه با نانوذرات $\text{CaF}_2:\text{Tm}$ و $\text{CaF}_2:\text{Dy}$ کاهش حساسیت ترمولومینسانسی را در پی داشته است، ولی در هر صورت حساسیت ترمولومینسانسی نانوذرات $\text{CaF}_2:\text{Dy,Tm}$ هنوز ۲ بار از نمونه‌ی معروف LiF:Mg,Ti بیش‌تر است و این، حاکی از برخورداری از حساسیت کافی برای استفاده شدن در دزیمتری است. از طرفی ورود هم‌زمان دو آلاینده‌ی Dy و Tm منجر به افزایش پایداری منحنی ترمولومینسانسی $\text{CaF}_2:\text{Dy,Tm}$ در مقایسه با نانوذرات $\text{CaF}_2:\text{Tm}$ و $\text{CaF}_2:\text{Dy}$ شده است و از سوی دیگر ناحیه‌ی خطی پاسخ دز در نانوذرات $\text{CaF}_2:\text{Dy,Tm}$ نیز نسبت به نانوذرات $\text{CaF}_2:\text{Tm}$ و $\text{CaF}_2:\text{Dy}$ وسیع‌تر شده است. گستره دمایی کوچک‌تر، قله‌های کوچک‌تر و مشخص‌تر برای نانوذرات ساخته شده، در مقایسه با نانوذرات $\text{CaF}_2:\text{Dy}$ و $\text{CaF}_2:\text{Tm}$ از دیگر نتایج استفاده هم‌زمان دو آلاینده‌ی دیسپروسیم و تولیم است. در کل می‌توان گفت نانوذرات $\text{CaF}_2:\text{Dy,Tm}$ برای دزیمتری در سطح دز خیلی بالا بسیار مناسب‌اند.



1. N. Salah, P.D. Sahare, S.P. Lochab, P. Kumar, TL and PL studies on $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ nanoparticles, *Radiat. Meas.* 41 (2006) 40-47.
2. M. Zahedifar, M. Mehrabi, Thermoluminescence and photoluminescence of cerium doped CaSO_4 nanosheets, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res B* 268 (2010) 3517-3522.
3. M. Zahedifar, M. Mehrabi, S. Harooni, Synthesis of $\text{CaSO}_4:\text{Mn}$ nanosheets with high thermoluminescence sensitivity, *Applied radiation and isotopes* 69 (2011) 1002-1006.
4. M. Hajek, T. Berger, R. Bergmann, Y. Uchihori, N. Yasuda, H. Kitamura, LET dependence of thermoluminescent efficiency and peak height ratio of $\text{CaF}_2:\text{Tm}$, *Radiat. Meas.* 43 (2008) 1135-1139.
5. A. Zarate-Morales, A.E. Buentil, *Health Phys.* 71 (1996) 358-361.
6. A.S. Pradhan, Effect of heating rate on the responses of $\text{CaF}_2:\text{Cu}$, $\text{CaF}_2:\text{Tm}$, $\text{CaF}_2:\text{Dy}$ and $\text{CaF}_2:\text{Mn}$, *Radiat. Prot. Dosim.* 100 (2002) 289-292.
7. M. Zahedifar, E. Sadeghi, Z. Mohebbi, Synthesis and thermoluminescence characteristics of Mn doped CaF_2 nanoparticles, *Nucl. Instr. Meth B* 274 (2012) 162-166.
8. M. Zahedifar, E. Sadeghi, S. Harooni, Thermoluminescence characteristics of the novel $\text{CaF}_2:\text{Dy}$ nanoparticles prepared by using the hydrothermal method, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* 291 (2012) 65-72.
9. M. Zahedifar, E. Sadeghi, Synthesis and dosimetric properties of the novel thermoluminescent $\text{CaF}_2:\text{Tm}$ nanoparticles, *Radiation Physics and Chemistry* 81 (2012) 1856-1861.
10. G.G. Kitis, J.M. Gomez Ros, J.W.N. Tuyn, Thermoluminescence glow curve deconvolution functions for first, second and general orders of kinetics, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 31 (1998) 2636-2641.
11. A.J.J. Bos, Theory of thermoluminescence, *Radiat. Meas* 41 (2007) 45-56.
12. H.G. Balian, N.W. Eddy, Figure of merit (FOM), an improved criterion over the normalized chisquared test for assessing goodness-of-fit of gamma-ray spectra peaks, *Nucl. Instr. Meth.* 145 (1977) 389-393.
13. W. Binder, J.R. Cameron, Dosimetric properties of $\text{CaF}_2:\text{Dy}$, *Health Phys.* 17 (1969) 613-618.
14. C. Bacci, C. Furetta, B. Rispoli, G. Roubaud, J.W.N. Tuyn, The effect of storage temperature on the thermoluminescence response of some phosphors *Radiat. Prot. Dosim.* 25 (1988) 43-48.
15. C. Furetta, C.Y.K. Lee, Further studies of the dosimetric properties of $\text{CaF}_2:\text{Tm}$ (TLD-300), *Radiat. Prot. Dosim.* 11 (1985) 101-105.
16. V.E. Kafadar, A.N. Yazici, R.G. Yildirim, The effects of heating rate on the dose response characteristics of TLD-200, TLD-300 and TLD-400, *Nucl. Inst. Meth. B* 267 (2009) 3337-3346.