

## بررسی خصوصیات ساختاری و ترمولومینسانس نانوذرات $Zn_2SiO_4/SiO_2$ آلاییده به ناخالصی

### منگنز تحت تابش پرتو گاما

مژگان نادری<sup>۱</sup>، احسان صادقی<sup>۱\*</sup>، مصطفی زاهدی<sup>فر<sup>۱</sup></sup>

<sup>۱</sup> دانشکده فیزیک، دانشگاه کاشان، کاشان، اصفهان، ایران.

<sup>۲</sup> پژوهشگاه علوم و فناوری نانو، دانشگاه کاشان، کاشان، اصفهان، ایران.

\* ایران، اصفهان، کاشان، کیلومتر ۶ بلوار قطب راوندی، دانشکده فیزیک، دانشگاه کاشان، کد پستی: ۸۷۳۱۷۵۳۱۵۳

پست الکترونیکی: [sdgh@kashanu.ac.ir](mailto:sdgh@kashanu.ac.ir)

#### چکیده

مقاله حاضر مطالعات ترمولومینسانس نانوذرات  $Zn_2SiO_4/SiO_2$  آلاییده به ناخالصی منگنز را گزارش می‌کند. نمونه با استفاده از روش سونوشیمیایی تهیه شد که یکی از روش‌های تولید نانوذرات است. خصوصیات ساختاری و مورفولوژی نانوذرات ساخته شده با استفاده از تکنیک‌های پراش پرتو ایکس (XRD)، میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDS) مورد مطالعه قرار گرفت. همچنین، منحنی درخشش ترمولومینسانس (TL) برای نانوذرات تابش شده با پرتو گاما مورد بررسی قرار گرفت و سه قله درخشش TL متمایز را در دماهای  $170^\circ C$ ،  $257^\circ C$  و  $338^\circ C$  به نمایش گذاشت. در میان نانوذرات آلاییده شده، نمونه آلاییده شده به یون منگنز با غلظت  $0.8 \text{ mol}\%$  بالاترین شدت ترمولومینسانس را نشان داد. نتایج تجزیه و تحلیل نشان داد که نانوذرات ساخته شده حساسیت قابل توجهی نسبت به پرتو گاما دارد.

کلیدواژگان: ترمولومینسانس، نانوذرات، پرتو، منگنز، گاما.

#### ۱. مقدمه

ضروری در دزیمتری تابش است، شکلی از لومینسانس که در طی افزایش تدریجی دما ظاهر می‌شود یعنی زمانی رخ می‌دهد که یک ماده با خاصیت ترمولومینسانس پس از جذب انرژی از پرتوهای یونیزان گرم شود. دزیمترهای ترمولومینسانس تشعشعات پرتوهای یونیزان را اندازه‌گیری می‌کنند و به دلیل حساسیت، دقت و سادگی بالا به‌طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند [۳].

در چند دهه اخیر، پرتوهای یونیزان پر انرژی مانند پرتو گاما، پرتو ایکس و اشعه ماوراء بنفش (UV) به‌طور گسترده در کاربردهای مختلف در زمینه‌های علمی و مهندسی استفاده شده است. بنابراین، سنجش و نظارت بر سطوح تشعشعات برای محافظت از انسان در معرض پرتوها ضروری است [۱]. این نوع پرتوها قابل مشاهده نیستند، بنابراین افراد به‌طور کلی نمی‌توانند حضور آن‌ها را احساس کنند [۲]. ترمولومینسانس یک روش

هدف اصلی تحقیق حاضر بهبود عملکرد ترمولومینسانس نانوذرات  $Zn_2SiO_4/SiO_2$  آلانید به ناخالصی منگنز است که به دلیل مزایای فراوان  $Zn_2SiO_4$  در زمینه‌های مختلف، در مطالعات زیادی مورد بررسی قرار گرفته است. در این پژوهش، خصوصیات ساختاری نانوذرات  $Zn_2SiO_4/SiO_2$  آلانید به ناخالصی منگنز با استفاده از پراش اشعه ایکس (XRD)، میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDS) گزارش شده است. منحنی‌های درخشش ترمولومینسانس برای ارزیابی، اثر غلظت  $Mn^{2+}$  بر روی نانوذرات  $Zn_2SiO_4/SiO_2$  مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین تأثیر دزهای مختلف بر روی منحنی درخشش ترمولومینسانس نانوذرات  $Zn_2SiO_4/SiO_2$  آلانید به ناخالصی منگنز گزارش شد.

## ۲. آماده‌سازی نانوذرات $Zn_2SiO_4/SiO_2$ آلانید به

### ناخالصی منگنز

برای ساخت نانوذرات  $Zn_{2-x}SiO_4/SiO_2:Mn_x$  که در آن  $(x = 0, 0.02, 0.04, 0.06, 0.08, 0.1 \text{ mol}\%)$  مقادیر لازم مواد اولیه شامل سیلیکاژل، هیدروکسید سدیم، روی استات، هیدرازین مونوهیدرات و منگنز کلراید بر اساس نسبت مولی آن‌ها پس از متعادل‌سازی نسبت‌های شیمیایی مربوطه محاسبه شد. سپس این مواد با استفاده از یک ترازوی دقیق در نسبت‌های استوکیومتری مناسب به دقت وزن شدند.

در ابتدا منگنز کلراید، هیدروکسید سدیم و روی استات هر کدام با کمک یک همزن مغناطیسی در آب دیونیزه به مدت یک ساعت حل شدند و در نتیجه محلول‌های دو مولار روی استات و هیدروکسید سدیم و همچنین محلول یک مولار منگنز کلراید به دست آمد. پس از آن، ۵ mL از محلول روی استات، ۵ mL از محلول هیدروکسید سدیم، و ۱ mL محلول منگنز کلراید (با غلظت مورد نظر)، ۱ mL هیدرازین مونوهیدرات و ۱۰ mL آب

ترمولومینسانس یکی از روش‌های متداول در دزیمتری محیطی، پزشکی، شخصی، سالیابی و مطالعات مختلف در مورد نقص در جامدات است [۴]. برای این کاربردها، محدوده پاسخ دز خطی مواد ترمولومینسانس مهم است [۵]. مواد ترمولومینسانس معمولاً نور را در نواحی فرابنفش (UV)، مرئی و مادون قرمز (IR) گسیل می‌کنند.

از سوی دیگر، طیف‌سنجی ترمولومینسانس یک تکنیک ارزشمند برای ارزیابی گیراندازها و عمق آن‌ها در شکاف باند مواد ترمولومینسانس و مطالعه عیوب و نقص‌ها در فسفرها است [۶]. انرژی جذب شده در مواد ترمولومینسانس متناسب با دز تابش است که با ضرب نرخ دز و زمان قرار گرفتن در معرض تشعشع به دست می‌آید و ترمولومینسانس را به ابزاری موثر برای تخمین میزان دز تشعشع تبدیل می‌کند.

محققان ویژگی‌های لومینسانس تعداد زیادی از فسفرها را برای شناسایی مواد بهینه برای کاربردهای دزیمتری مختلف بررسی کرده‌اند [۷-۱۰]. در این میان، فسفرهای مبتنی بر سیلیکات به دلیل نشان دادن بازده کوانتومی بالا، خلوص رنگ، پایداری شیمیایی و حرارتی بالا، ماندگاری طولانی، انتشار چند رنگ و غیره توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند [۱۱، ۱۲]. ترکیبات حاوی سیلیکات روی به عنوان مواد لومینسانس کارآمد مورد مطالعه قرار گرفته‌اند؛ زیرا یک میزان عالی برای مواد افزودنی مانند فلزات واسطه و یون‌های خاکی کمیاب برای تولید مواد ترمولومینسانس است [۱۳-۱۶].

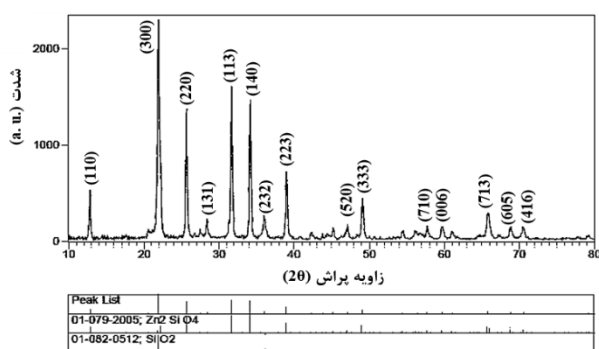
اخیراً، یو و همکارانش میکروفسفرهای  $Zn_2SiO_4$  آلانید شده با منگنز را با روش سل-ژل کنترل شده آماده کردند [۱۷]. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که قالب سیلیکای هسته-پوسته، خواص درخشندگی فسفرهای آلانید شده با منگنز را برای کاربردهای نورپردازی پیشرفته افزایش می‌دهد.

### ۱.۳. نتایج تجزیه و تحلیل XRD

الگوی پراش اشعه ایکس (XRD) در شکل ۱ ماهیت بلوری نانوذرات Zn<sub>۲</sub>SiO<sub>۴</sub>/SiO<sub>۲</sub>:Mn را نشان می‌دهد. طیف پراش اشعه ایکس (XRD) نانوذرات Zn<sub>۲</sub>SiO<sub>۴</sub>/SiO<sub>۲</sub>:Mn با کارت‌های مرجع ۰۱-۰۷۹-۲۰۰۵ و ۰۱-۰۸۲-۰۵۱۲ مطابقت خوبی دارد. برای تعیین اندازه ذرات ساخته شده از فرمول دبای شرر [۱۸] استفاده شد.

$$D = \frac{0.9}{\lambda} \beta \cos \theta \quad (1)$$

که در این رابطه،  $\lambda$  طول موج پرتو ایکس،  $\beta$  پهنا در نصف بیشینه شدت قله (FWHM)<sup>۱</sup> و  $\theta$  زاویه پراکندگی است. اندازه تقریبی بلورک‌ها حدود ۲۵ nm برآورد شد.



شکل (۱): الگوی پراش اشعه ایکس نانوذرات Zn<sub>۲</sub>SiO<sub>۴</sub>/SiO<sub>۲</sub> آلاینده شده به ناخالصی منگنز ۰/۰۸ mol%.

### ۲.۳. نتایج تجزیه و تحلیل SEM و EDS

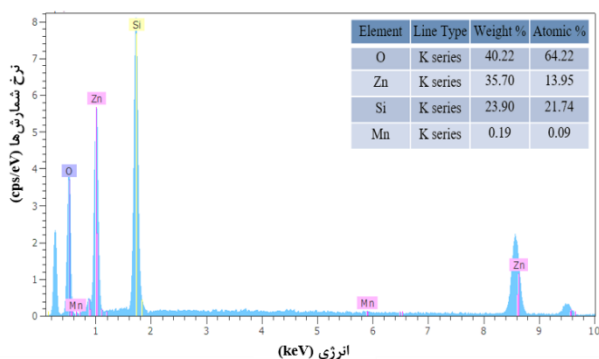
اندازه و شکل ذرات از جمله پارامترهای اساسی هستند که تأثیر قابل توجهی بر شدت لومینسانس فسفرها در مطالعات دزیمتری ترمولومینسانس دارند. در این زمینه، بسیاری از پژوهش‌گران به نتایج متفاوتی دست یافته‌اند [۱۹-۲۱]. اندازه بزرگ ذرات ممکن است منجر به کاهش شدت لومینسانس شود؛ زیرا این امر می‌تواند باعث تأخیر حرارتی و کاهش همگنی نمونه گردد. با این حال، قاعده عمومی و شناخته شده در این زمینه بیان می‌کند

دیونیزه در یک بشر حاوی پودر سیلیکاژل مخلوط شدند. این مخلوط تحت پراکندگی اولتراسونیک قرار گرفت. محلول به دست آمده تحت یک فرآیند شستشوی کامل با آب دیونیزه و اتانول قرار گرفت. پس از شستشو، رسوب باقیمانده در دمای ۶۰ °C به مدت چهار ساعت خشک شد. رسوب حاصل متعاقباً در دمای ۹۵۰ °C به مدت یک ساعت در یک کوره قابل برنامه ریزی کلسینه شد.

### ۳. مشخصه‌یابی نانوذرات

برای تعیین ساختار بلوری نانوذرات ساخته شده، از جمله شناسایی فاز و تعیین اندازه بلور، تجزیه و تحلیل دقیق الگوی پراش اشعه ایکس با استفاده از پراش سنج پرتو ایکس Panalytical Xpert PRO (Cu Ka، ۴۰kV، ۳۰mA) انجام شد. فازهای موجود در نمونه با بهره‌گیری از نرم‌افزار پیشرفته X'Pert Highscore شناسایی شدند. همچنین، تجزیه و تحلیل طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDS) و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) به منظور مقایسه نسبت‌های عنصری در نمونه‌ها و ارزیابی مورفولوژی و اندازه ذرات با استفاده از دستگاه TESCAN MIRA<sup>۳</sup> واقع در دانشگاه شریف انجام شد. برای آماده‌سازی نانوذرات تولید شده برای تابش و حذف تأثیر تابش‌های قبلی، نمونه‌های پودری در دمای ۴۵۰ °C تحت بازپخت قرار گرفتند. تابش پرتو گاما به ازای دزهای بالای ۵ Gy با استفاده از منبع Co<sup>۶۰</sup> با آهنگ دز ۰/۷۳ Gy/s در سازمان انرژی اتمی تهران و به ازای دزهای پایین‌تر از ۵ Gy با استفاده از منبع Co<sup>۶۰</sup> با آهنگ دز ۱۴۳ mGy/min در مرکز تحقیقات هسته‌ای کرج انجام شد. در تمامی مراحل تابش، ۱ mg پودر نانوذرات در دمای بین ۵۰ °C تا ۴۰۰ °C با سرعت ثابت ۲ °C/s با استفاده از دستگاه قرائت‌گر ترمولومینسانس Harshaw ۴۵۰۰ مورد ارزیابی قرار گرفت.

<sup>1</sup> Full width half maximum



شکل (۳): طیف EDX نانوذرات  $Zn_{0.7}SiO_4/SiO_2:Mn_{0.08}$

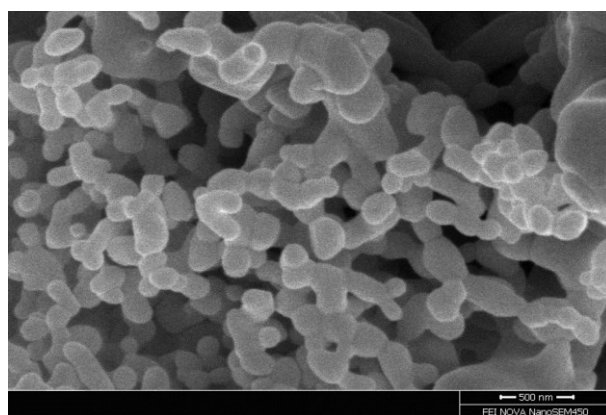
#### ۴. ترمولومینسانس

##### ۴.۱. منحنی درخشش ترمولومینسانس

منحنی‌های درخشش ترمولومینسانس نانوذرات  $Zn_{0.7}SiO_4/SiO_2$  در حالت خالص و همچنین نمونه‌های آلاییده شده با  $Mn^{2+}$  مورد بررسی قرار گرفتند تا تأثیر آلایدگی منگنز ارزیابی شود. نتایج به دست آمده نشان داد که ورود ناخالصی‌ها به ساختار بلوری میزبان بر حساسیت و ویژگی‌های منحنی درخشش ترمولومینسانس تأثیرگذار است و این اثر به طور واضحی با نمونه‌های خالص قابل مقایسه است. بر اساس این یافته‌ها، شدت منحنی درخشش ترمولومینسانس به صورت مستقیم با غلظت نقص در ماده نسبت دارد [۶]. جایگزین شدن ناخالصی منگنز در ساختار میزبان به جای  $Zn^{2+}$  به تشکیل مراکز لومینسانس و مراکز گیراندازی منجر می‌شود که این امر به طور قابل توجهی حساسیت نمونه‌های آلاییده شده را در مقایسه با نمونه خالص افزایش می‌دهد. شکل ۴ منحنی‌های درخشش ترمولومینسانس مربوط به نانوذرات (۰/۱ mol%، ۰/۰۸، ۰/۰۶)، پرتو گاما قرار گرفته و متعاقباً با نرخ گرمایش  $2\text{ }^\circ\text{C/s}$  گرم شده‌اند، نمایش می‌دهد. در این منحنی‌ها، سه قله گسترده و متمایز مشاهده می‌شود که دماهای بیشینه آن‌ها به ترتیب حدود  $170\text{ }^\circ\text{C}$ ،  $257\text{ }^\circ\text{C}$  و  $338\text{ }^\circ\text{C}$  هستند. قله‌های دوم و سوم

که ذرات بزرگ‌تر معمولاً منجر به افزایش شدت لومینسانس می‌شوند.

برای تعیین مورفولوژی و توزیع ذرات سطحی نانوذرات ساخته شده، از آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) استفاده شد. بررسی مورفولوژی نانوذرات  $ZSSr-0.7$ ، در تصویر SEM با بزرگ‌نمایی  $500\text{ nm}$ ، در شکل ۲ ارائه شده است. تصویر SEM، نشان‌دهنده این است که ذرات موجود در این پودر از ابعاد ریز و نسبتاً متراکم برخوردار بوده و اندازه‌های آن‌ها به طور متوسط در بازه  $100\text{ nm}$  تا  $200\text{ nm}$  متغیر است.



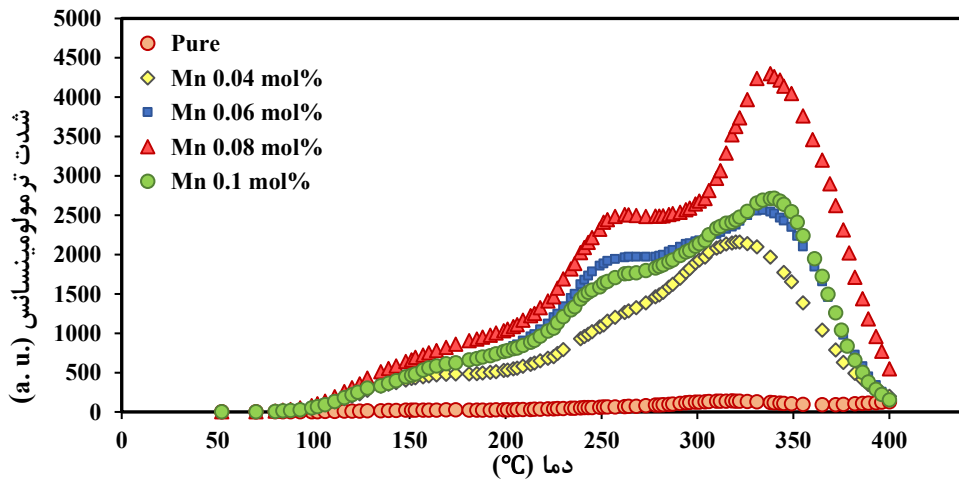
شکل (۲): تصویر SEM نانوذرات  $Zn_{0.7}SiO_4/SiO_2:Mn_{0.08}$

طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDS)، یک آنالیز تحلیلی است که برای شناسایی و تعیین ترکیب عناصر در مواد به کار می‌رود. این روش بر مبنای پرتو ایکس ساطع شده از مواد پس از برخورد پرتو ایکس و اندازه‌گیری انرژی اشعه‌های پراکنده است. از EDS معمولاً در ترکیب با میکروسکوپ‌های الکترونی برای تحلیل عناصری استفاده می‌شود.

غلظت‌های به دست آمده در تجزیه و تحلیل طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDS) مقادیر عناصر موجود در ترکیب نانوذرات ساخته شده را گزارش می‌کنند. شکل ۳ وجود عناصر روی (Zn)، سیلیکون (Si)، اکسیژن (O) و منگنز (Mn) را در نمونه تأیید کرده و نشان می‌دهد که این عناصر در طیف EDS مشاهده شده‌اند.

تشکیل مراکز گیراندازی شامل گیراندازهای سطحی، دزیمتری و عمیق در شکاف انرژی نانوذرات  $Zn_{7-x}SiO_8/SiO_2:Mn$  است.

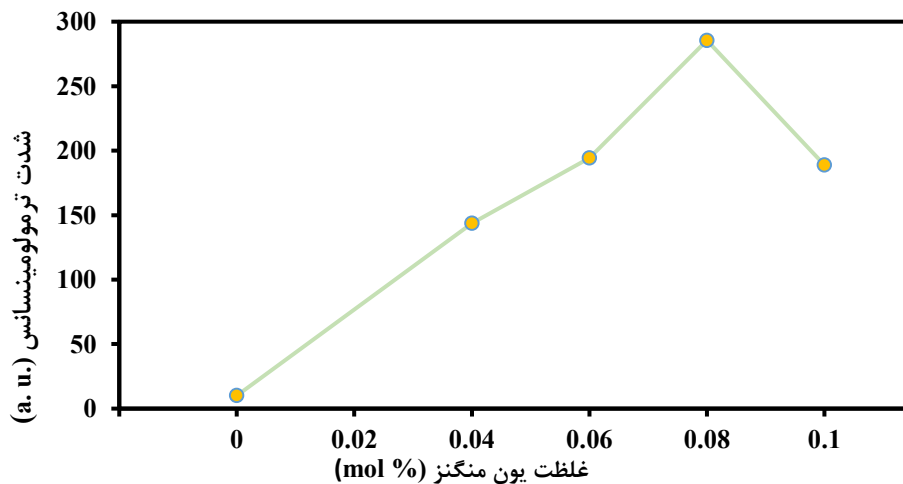
شدت بیشتری نسبت به قله اول نشان می‌دهند که این امر به دلیل وجود مقدار قابل توجهی از ذرات باردار به دام افتاده در سطوح نقص است. وجود این قله‌های ترمولومینسانس نشان‌دهنده



شکل (۴): تأثیر غلظت ناخالصی منگنز بر منحنی درخشش نانوذرات  $Zn_{7-x}SiO_8/SiO_2:Mn_x$  تحت تابش دز ۵ Gy پرتو گاما.

می‌زنند و به‌عنوان نابودکننده گیراندازها عمل کرده، منجر به کاهش کارایی لومینسانس و کاهش شدت ترمولومینسانس می‌شوند [۶]. نمودار شدت در برابر نسبت غلظت ناخالصی تحت تابش دز ۵ Gy پرتو گاما برای این نانوذرات در شکل ۵ رسم شده است.

شدت درخشش ترمولومینسانس در هر سه قله با افزایش غلظت آلائیدگی  $Mn^{2+}$  تا ۰/۰۸ mol% افزایش می‌یابد. اما بعد از آن، شدت تمامی قله‌ها با افزایش غلظت ناخالصی کاهش می‌یابد. در غلظت‌های بالاتر، ناخالصی‌ها نه تنها گیراندازهای جدیدی ایجاد نمی‌کنند، بلکه به حساسیت و پایداری قله‌ها نیز آسیب



شکل (۵): تأثیر غلظت ناخالصی منگنز بر منحنی درخشش نانوذرات  $Zn_{7-x}SiO_8/SiO_2:Mn_x$  تحت تابش دز ۵ Gy پرتو گاما.

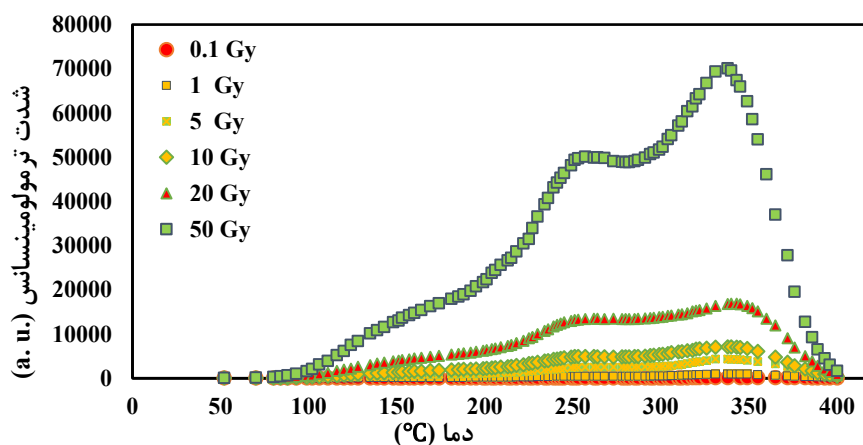
## ۲.۴. پاسخ دز

دزهای تابش است. هنگامی که یک ماده دزیمتری با دزهای مختلف تابش می‌شود، انتظار می‌رود که این افزایش در شدت

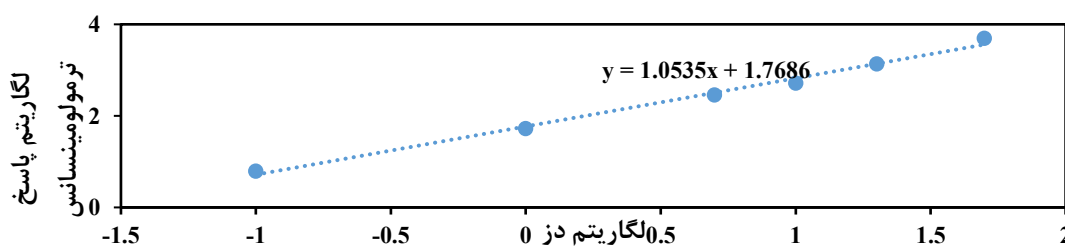
یکی از ویژگی‌های اساسی مواد مورد استفاده در دزیمتری به روش ترمولومینسانس، پاسخ خطی آن‌ها در دامنه وسیعی از

می‌یابد، نشان می‌دهد. ساختار منحنی‌های درخشش ترمولومینسانس دارای سه قله اصلی در دماهای حدود  $170^{\circ}\text{C}$ ،  $257^{\circ}\text{C}$  و  $338^{\circ}\text{C}$  است و یک روند واضح برای افزایش شدت ترمولومینسانس در کل منحنی‌های درخشش به دنبال افزایش دز تابش مشاهده می‌شود. به‌طور خاص، شدت قله‌های دوم و سوم نسبت به قله اول، با افزایش مدت تابش افزایش بارزتری را نشان می‌دهند. شکل ۷ پاسخ دز نانوذرات تحت تابش پرتو گاما را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که منحنی پاسخ دز نانوذرات از  $0.1\text{ Gy}$  تا  $50\text{ Gy}$  به‌صورت خطی رشد می‌کند.

ترمولومینسانس با همان سرعت و با حساسیت یکسان رخ دهد. به عبارت دیگر، انتظار می‌رود که یک رابطه خطی بین افزایش دز تابش داده شده به ماده و افزایش شدت ترمولومینسانس (بیشینه شدت قله یا سطح زیر منحنی تابش) وجود داشته باشد. در این مطالعه، پاسخ ترمولومینسانس نانوذرات  $\text{Zn}_{2-0.08}\text{SiO}_4/\text{SiO}_2:\text{Mn}_{0.08}$  تحت تابش پرتو گاما در دزهای مختلف مورد بررسی قرار گرفت. نانوذرات دزهای  $0.1$ ،  $1$ ،  $5$ ،  $10$ ،  $20$  و  $50\text{ Gy}$  را دریافت کردند. شکل ۶ منحنی درخشش نانوذرات  $\text{Zn}_{2-0.08}\text{SiO}_4/\text{SiO}_2:\text{Mn}_{0.08}$  تحت تابش پرتو گاما را که از دز  $0.1\text{ Gy}$  تا دز  $50\text{ Gy}$  افزایش



شکل (۶): ساختار منحنی درخشش نانوذرات  $\text{Zn}_{2-0.08}\text{SiO}_4/\text{SiO}_2:\text{Mn}_{0.08}$  تحت دزهای مختلف پرتو گاما.



شکل (۷): نمودار خطی پاسخ دز نانوذرات  $\text{Zn}_{2-0.08}\text{SiO}_4/\text{SiO}_2:\text{Mn}_{0.08}$  تحت دزهای مختلف پرتو گاما.

هستند (خطای اندازه‌گیری در محدوده  $\pm 2\%$  پیش‌بینی شده است). بنابراین در سینتیک مرتبه اول، مقادیر دمای بیشینه قله تحت تأثیر افزایش دز تابش قرار نمی‌گیرد، مگر در شرایطی که آسیب تابشی ایجاد شود یا ساختار گیراندازهای الکترونی دچار تغییر گردد. با این حال، زمانی که سینتیک قله مرتبه اول نباشد،

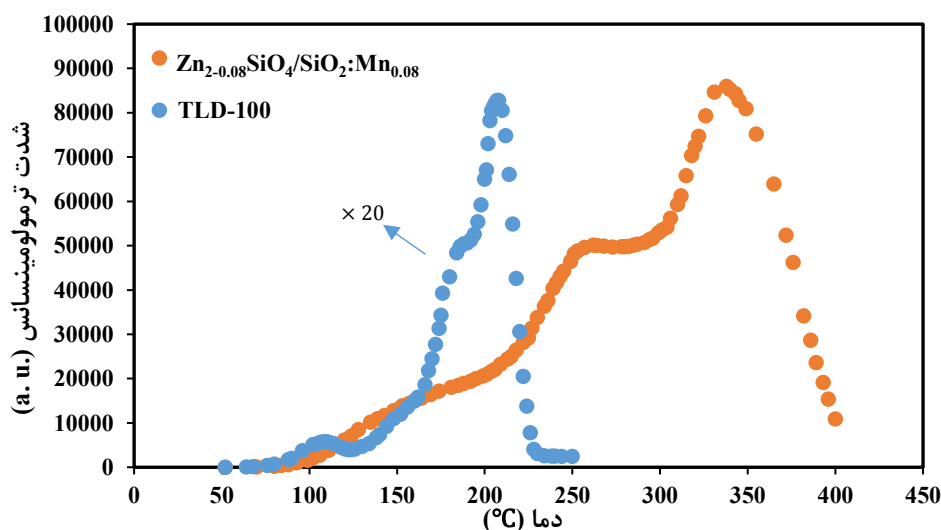
همچنین یکی از روش‌های بنیادی برای تعیین مرتبه سینتیک (b) قله تابش ترمولومینسانس، روش دز متغیر است. در این روش، تغییر دمای حداکثر قله‌های تابش ماده ترمولومینسانس در مواجهه با مقادیر مختلف دز تابش مورد بررسی قرار می‌گیرد. قله‌های تابش مرتبه اول مستقل از دز تابش

دمای حداکثر به طور قابل توجهی با افزایش دز تابش به سمت ناحیه دمای پایین تر جابه جا می شود [۲۳،۲۲].

۳.۴. مقایسه با نمونه تجاری استاندارد

برای ارزیابی حساسیت نانوذرات Zn<sub>۲-۰/۰۸</sub>SiO<sub>۴</sub>/SiO<sub>۲</sub>:Mn<sub>۰/۰۸</sub> نسبت به دزیمترهای تجاری، این نانوذرات در دمای اتاق با منحنی درخشش دزیمتر تجاری TLD-۱۰۰ (LiF: Mg, Ti) تولید شرکت هارشاو مقایسه شدند. در ابتدا، هر دو نمونه تحت فرآیند بازپخت قرار گرفتند. دزیمتر TLD-۱۰۰ به مدت ۱ ساعت در دمای ۴۰۰ °C و سپس به مدت ۲ ساعت در دمای ۱۰۰ °C به صورت دو مرحله ای بازپخت شد. نانوذرات Zn<sub>۲-۰/۰۸</sub>SiO<sub>۴</sub>/SiO<sub>۲</sub>:Mn<sub>۰/۰۸</sub> به مدت ۴۵ دقیقه در دمای ۴۵۰ °C تحت بازپخت قرار گرفتند. پس از این مرحله، نمونه ها تحت تابش دز ۵ Gy پرتو گاما قرار گرفتند.

شکل ۸ منحنی های درخشش ترمولومینسانس نانوذرات Zn<sub>۲-۰/۰۸</sub>SiO<sub>۴</sub>/SiO<sub>۲</sub>:Mn<sub>۰/۰۸</sub> را در مقایسه با دزیمتر تجاری TLD-۱۰۰ و در مقادیر وزنی مشابه نشان می دهند. بر اساس نتایج به دست آمده، حساسیت ترمولومینسانس نانوذرات Zn<sub>۲-۰/۰۸</sub>SiO<sub>۴</sub>/SiO<sub>۲</sub>:Mn<sub>۰/۰۸</sub> تقریباً ۲۰ برابر بیشتر از دزیمتر تجاری TLD-۱۰۰ تحت تابش پرتو گاما است.



شکل (۸): منحنی های درخشش نانوذرات Zn<sub>۲-۰/۰۸</sub>SiO<sub>۴</sub>/SiO<sub>۲</sub>:Mn<sub>۰/۰۸</sub> تحت تابش دز ۵ Gy پرتو گاما.

## ۵. نتیجه گیری

مطالعه حاضر به بررسی ویژگی های ساختاری و دزیمتری نانوذرات Zn<sub>۲-۰/۰۸</sub>SiO<sub>۴</sub>/SiO<sub>۲</sub>:Mn پرداخته است که حساسیت بالایی نسبت به پرتو گاما نشان می دهند. الگوی پراش پرتو ایکس (XRD) تشکیل نانوذرات Zn<sub>۲-۰/۰۸</sub>SiO<sub>۴</sub>/SiO<sub>۲</sub>:Mn آلاینده شده با منگنز را به عنوان یک ناخالصی تایید کرده است. نتایج میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) نشان می دهد که غالب ذرات دارای اندازه ای در بازه ۱۰۰ nm تا ۲۰۰ nm هستند. علاوه بر این، تحلیل طیف سنجی افزایش غلظت ناخالصی تا ۰/۰۸ mol%، بازده لومینسانس پراش انرژی پرتو ایکس (EDS) وجود عناصر Zn, Si, O و Mn را تایید می کند که با نتایج XRD مطابقت دارد. در بررسی خواص ترمولومینسانس این ماده در دزیمتری پرتو گاما، نمونه آلاینده شده به منگنز حساسیت قابل توجهی نسبت به نمونه بدون آلاینده گی نشان داد. رفتار حرارتی این نانوفسفر نشان دهنده وجود قله های متمایز در دماهای حدود ۱۷۰ °C، ۲۵۷ °C و ۳۳۸ °C با نرخ گرمایش ۲ °C/s است. با افزایش غلظت ناخالصی تا ۰/۰۸ mol%، بازده لومینسانس

پراش انرژی پرتو ایکس (EDS) وجود عناصر Zn, Si, O و Mn را تایید می کند که با نتایج XRD مطابقت دارد. در بررسی خواص ترمولومینسانس این ماده در دزیمتری پرتو گاما، نمونه آلاینده شده به منگنز حساسیت قابل توجهی نسبت به نمونه بدون آلاینده گی نشان داد. رفتار حرارتی این نانوفسفر نشان دهنده وجود قله های متمایز در دماهای حدود ۱۷۰ °C، ۲۵۷ °C و ۳۳۸ °C با نرخ گرمایش ۲ °C/s است. با افزایش غلظت ناخالصی تا ۰/۰۸ mol%، بازده لومینسانس

پراش انرژی پرتو ایکس (EDS) وجود عناصر Zn, Si, O و Mn را تایید می کند که با نتایج XRD مطابقت دارد. در بررسی خواص ترمولومینسانس این ماده در دزیمتری پرتو گاما، نمونه آلاینده شده به منگنز حساسیت قابل توجهی نسبت به نمونه بدون آلاینده گی نشان داد. رفتار حرارتی این نانوفسفر نشان دهنده وجود قله های متمایز در دماهای حدود ۱۷۰ °C، ۲۵۷ °C و ۳۳۸ °C با نرخ گرمایش ۲ °C/s است. با افزایش غلظت ناخالصی تا ۰/۰۸ mol%، بازده لومینسانس

پرتوهای گاما، این نانوذرات می‌توانند ابزار موثری برای تشخیص و اندازه‌گیری پرتوهای گاما باشند.

## ۶. تشکر و قدردانی

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند مراتب تشکر صمیمانه خود را از تمام کسانی که ما را در انجام این تحقیق یاری کردند، را به عمل آورند.

افزایش می‌یابد، درحالی‌که در غلظت‌های بالاتر، شدت کل کاهش می‌یابد. بنابراین غلظت بهینه برای پاسخ ترمولومینسانس نانوذرات ساخته شده  $0.08 \text{ mol}\%$  تعیین شد.

علاوه بر این، نانوذرات در محدوده دزهای  $0.1 \text{ Gy}$  تا  $50 \text{ Gy}$  دارای پاسخ دز خطی بودند. شدت ترمولومینسانس نانوذرات  $0.08 \text{ Mn} : \text{Zn}_{2-0.08} \text{SiO}_4 / \text{SiO}_2$  تحت دزهای مساوی تابش پرتو گاما به‌طور قابل توجهی بیشتر از دزیمتر تجاری TLD-۱۰۰ ثبت شده است. با توجه به حساسیت بالای نانوذرات  $0.08 \text{ Mn} : \text{Zn}_{2-0.08} \text{SiO}_4 / \text{SiO}_2$  نسبت به دزهای

## ۷. مراجع

1. C. Aparna, P. K. Shetty, M. Mahesha. Structural optimization of indium oxide thin film for gamma dosimetry applications. *Mat. Sci. Semiconductor Processing* 150 (2022) 106931.
2. F. Flakus. Detecting and measuring ionizing radiation- A short history. *IAEA Bulletin* 23 (4) (1982) 31-36.
3. A. Vidya Saraswathi, N. S. Prabhu, K. Naregundi, M. I. Sayyed, M. S. Murari, A. H. Almuqrin, S. D. Kamath. Thermoluminescence investigations of  $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7: \text{Dy}^{3+}$  phosphor for gamma dosimetry applications. *Mat. Chem. Phys.* 281 (2022) 125872.
4. B. Chandra, R. K. Chandrakar, V. Chandra, R. Baghel. Effect of particle size on activation energy and peak temperature of the thermoluminescence glow curve of undoped ZnS nanoparticles. *Luminescence* 31 (2) (2016) 478-486.
5. R. Chen, S. W. S. McKeever. Characterization of nonlinearities in the dose dependence of thermoluminescence. *Radiat. Measurements.* 23 (4) (1994) 667-673.
6. K. K. Gupta, N. S. Dhoble, D. K. Burghate, S. J. Dhoble. Luminescence properties of nanocrystalline  $\text{Mg}_2\text{P}_2\text{O}_7: \text{Eu}$  phosphor. *Luminescence* 33 (5) (2018) 947-953.
7. M. Zahedifar, F. Almasifard, E. Sadeghi, M. K. Biroon, A. Ramazani-Moghaddam-Arani. Thermoluminescence kinetic analysis and dosimetry features of  $\text{MgSO}_4: \text{Dy}$  and  $\text{MgSO}_4: \text{Cu}$  nano-rods. *Radiat. Phys. Chem.* 125 (2016) 127-133.
8. E. Habibi, M. Zahedifar, E. Sadeghi. Synthesis and thermoluminescence analysis of  $\text{LiBaF}_3: \text{M}$  (M= Cu, Ce, Er) nanoparticles. *J. Luminescence* 237 (2021) p. 118173.
9. M. Bagheri, E. Sadeghi, M. Zahedifar, S. Harooni. Thermoluminescence properties of Cu doped  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  crystals synthesized by a solid state method. *Radiat. Phys. Chem.* 209 (2023) 110971.
10. M. Talebi, E. Sadeghi, M. Zahedifar, S. Harooni, Synthesis, structural characteristics and thermoluminescence features of  $\text{KCl: Mn}$  and  $\text{KCl: Ce}$  phosphors. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sec. B: Beam Interact. Mater. Atoms* 530 (2022). 29-38.
11. S. Sharma, N. Brahme, D. P. Bisen, P. Dewangan, S. Tigga, G. Tiwari, Ayush Khare. Study on photoluminescence and thermoluminescence properties of UV-irradiated  $\text{CaSrAl}_2\text{SiO}_7: \text{Ce}^{3+}$  phosphors. *J. Mater. Sci.: Mater. Electron* 29 (2018) 1412-1419.
12. S. Miao, Z. Xia, M. S. Molokeev, J. Zhang, Q. Liu. Crystal structure refinement and luminescence properties of blue-green-emitting  $\text{CaSrAl}_2\text{SiO}_7: \text{Ce}^{3+}, \text{Li}^+, \text{Eu}^{2+}$  phosphors. *J. Mater. Chem. C.* 3 (32) (2015) 8322-8328.
13. K.-S. Sohn, B. Cho, H. D. Park. Excitation energy-dependent photoluminescence behavior in  $\text{Zn}_2\text{SiO}_4: \text{Mn}$  phosphors. *Mater. Letters* 41 (6) (1999) 303-308.
14. R. Selomulya, S. Ski, K. Pita, C. Kam, Q. Zhang, and S. Buddhudu. Luminescence properties of  $\text{Zn}_2\text{SiO}_4: \text{Mn}^{2+}$  thin-films by a sol-gel process. *Mater. Sci. Eng.: B.* 100 (2) (2003) 136-141.
15. N. Taghavinia, G. Lerondel, H. Makino, A. Yamamoto, T. Yao, Y. Kawazoe, T. Goto. Growth of luminescent  $\text{Zn}_2\text{SiO}_4: \text{Mn}^{2+}$  particles inside oxidized porous silicon: emergence of yellow luminescence. *J. Crystal Growth* 237 (2002) 869-873.
16. M. Naderi, E. Sadeghi, M. Zahedifar. Fabrication and investigation of thermoluminescence properties of  $\text{Zn}_2\text{SiO}_4/\text{SiO}_2$  nanophosphor with manganese impurity. *Radiat. Phys. Chem.* 225 (2024) 112126.



17. J. B. Yoo, H. J. Yang, N. H. Hur. Controlled synthesis of luminescent Mn-doped  $Zn_2SiO_4$  microspheres by thermal hydrolysis of urea. *J. Luminescence* 243 (2022) 118608.
18. A. Stochioiu, F. Scarlata, I. Georgescuc, and F. Alexiud. Method to manufacture the thermoluminescent detector chips using LiF crystal. *J. Optoelectronics Adv. Mater.* 6 (4) (2004) 1357-1363, 2004.
19. H. Silva. The effect of grain size and teflon matrix on the energy dependence of thermoluminescent dosimeters. *Int. J. Radiat. Appl. Instrum. Part A. Appl. Radiat. Isot.* 40 (2) (1989) 109-116.
20. S. Shinde, A. Lakshmanan, B. Bhatt, R. Bhatt. Photo transfer thermoluminescence in  $CaSO_4$ : Dy—grain size dependence. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sec. B: Beam Interact. Mater. Atoms* 31 (4) (1988) 592-596.
21. S. Armitage, R. Bailey. The measured dependence of laboratory beta dose rates on sample grain size. *Radiat. Measurements* 39 (2) (2005) 123-127.
22. M. Bagheri, E. Sadeghi, M. Zahedifar. Fabrication and investigation of thermoluminescence properties of gamma irradiated Dy-doped crystalline alumina," *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sec. B: Beam Interact. Mater. Atoms* 537 (2023) 46-53.
23. J. Srivastava, S. Supe. Thermoluminescence processes in  $CaSO_4$ : Dy. Dependence on stopping power. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 13 (12) (1980) 2337.