

## ساخت و بهینه‌سازی قرص‌های کامپوزیتی نانوفسفر استرانسیوم سولفید آلائیده با سریم و ساماریوم (SrS:Ce, Sm)، به عنوان آشکارساز تشعشع فضایی

محسن یزدان‌مهر<sup>۱</sup>، حسین صادقی<sup>۱</sup>، مسعود کاوش‌تهرانی<sup>۲</sup>، سیدجواد هاشمی‌فر<sup>۳</sup> و محمد مهدوی<sup>۴</sup>

۱. مجتمع دانشگاهی علوم کاربردی، گروه فیزیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شاهین‌شهر

۲. مجتمع دانشگاهی علوم کاربردی، مرکز تحقیقات اپتیک و لیزر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شاهین‌شهر

۳. دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

۴. مجتمع دانشگاهی علوم کاربردی، گروه شیمی، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شاهین‌شهر

(دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۱۱/۱۵؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۷/۱/۳۱)

### چکیده

در این پژوهش، سنتز نانوذرات استرانسیوم سولفید آلائیده شده با عناصر خاکی کمیاب سریم و ساماریوم (SrS:Ce,Sm) به روش هم‌رسوبی انجام شد. قرص‌هایی شفاف با استفاده از مخلوط نانوپودر این ماده و اپوکسی-رزین بیسفنول A، به عنوان آشکارساز در دزیمترهای مبتنی بر لومینسانس تحریک شده نوری (OSL)، تولید شد. تأیید تشکیل فاز بلورین و همچنین مورفولوژی نانوذرات سنتز شده با استفاده از الگوی پراش پرتو ایکس (XRD) و همچنین تصاویر FESEM انجام پذیرفت. تأثیر غلظت‌های مختلف سریم و ساماریوم و همچنین غلظت تیوگلیسرول (به عنوان عامل پوشش دهنده برای کنترل اندازه نانوذرات) بر پاسخ حساسیت آشکارسازی این ماده در شرایط کاملاً یکسان تابش‌دهی و اندازه‌گیری، بررسی شد. نتایج نشان می‌دهند، بهینه حساسیت پاسخ آشکارسازی نمونه‌ها به دز آزمایشی تقریباً ۰/۴ میلی‌گری با پرتو ایکس، مرتبط با غلظت‌های ۰/۰۲ و ۰/۰۱ درصد مولی سریم و ساماریوم و همچنین غلظت ۰/۱ مولار تیوگلیسرول با میانگین اندازه نانوبلورک  $24 \pm 2$  نانومتر است.

واژه‌های کلیدی: استرانسیوم سولفید، سریم، ساماریوم، لومینسانس تحریک شده نوری، تیوگلیسرول، نانوذرات، دزیمتر

### ۱. مقدمه

تشعشعات کیهانی [۴] می‌شود و در واقع قطعات الکترونیکی آن، درگیر خطا در عملکرد، کاهش بازده و یا از کار افتادگی می‌شوند، نیاز به ابزاری است تا موارد فوق را سریعاً تشخیص داده و در کوتاه‌ترین زمان ممکن یک عملیات حفاظتی را اعلام و آغاز کند. دستیابی به این اهداف، با به کارگیری انواع آشکارسازهای تابشی در ماهواره‌ها و فضاپیماها امکان‌پذیر

اثرات مخرب تابش‌های یونیزان فضایی ( $\alpha$ ،  $X$ ،  $\beta$ ، ذرات باردار و ...) بر روی قطعات نیمه‌رسانا و سیستم‌های الکترونیکی فضاپیماها و ماهواره‌هایی که در مدارهای مختلف فضا قرار دارند [۱-۳]، یکی از نگرانی‌های عمده پژوهشگران و محققان است. هنگامی که فضاپیما دچار یک اختلال ناشی از

و منشأ اصلی لومینسانس تحریک شده نوری (OSL) هستند. در حالی که ترازهای مرتبط با ساماریوم درون گاف نواری و پایین نوار رسانش، مسئول گیراندازی الکترون‌ها در حین تابش‌دهی نمونه با پرتوهای یونیزان هستند [۱۱].

با توجه به تحقیقات صورت گرفته در دنیا طی دهه‌های اخیر بر روی نانومواد، ثابت شده است که خواص لومینسانس ماده در کاهش اندازه ذرات از مقیاس میکرو (بالک) به مقیاس نانو در برخی مواد، بهبود می‌یابد. تاکنون در منابع علمی گزارش شده، مطالعات زیادی بر روی بلور استرانسیوم سولفید آلاینده شده با هر دو عنصر سربیم و ساماریوم (SrS:Ce,Sm)، به صورت فاز انبوهه (بالک) با اندازه ذرات تقریباً ۳۰۰ میکرومتر به عنوان حسگر پرتوهای یونیزان، انجام گرفته است [۱۴-۱۸]. بررسی تأثیر نانو ساختار شدن بر بهبود خواص لومینسانس و همچنین پاسخ OSL این ماده به پرتو ایکس و مقایسه با نتایج نمونه میکروساختار (بالک)، قبلاً توسط مؤلفان این مقاله در مرجع [۱۱] ارائه شده است. نمونه‌های مورد استفاده در این مرجع، قرص‌های بسیار چگال SrS:Ce,Sm تولید شده به روش زینترینگ پلاسما-جرقه‌ای (SPS<sup>۲</sup>) از پودر این ماده، هستند. در پژوهش حاضر، قرص‌هایی شفاف با استفاده از مخلوط نانوپودر SrS:Ce,Sm و اپوکسی-رزین، با غلظت‌های مختلف سربیم و ساماریوم و همچنین اندازه ذرات متفاوت تولید شده‌اند. هدف از این کار، بررسی تأثیر کاهش اندازه نانوذرات و غلظت آلاینده‌ها بر روی بهبود حساسیت پاسخ OSL این ماده فسفرسانس به پرتو ایکس و همچنین به کارگیری این قرص‌های شفاف به عنوان گزینه مناسب‌تری نسبت به قرص‌های کدر تولید شده به روش SPS [۱۱]، در آشکارساز تشعشع‌سنج فضایی OSL، است.

## ۲. بخش تجربی

### ۲.۱. مواد و تجهیزات

مواد اولیه به کار رفته برای سنتز نانوذرات SrS:Ce,Sm با استفاده از روش هم‌رسوبی، شامل موارد زیر با درجه خلوص

است. در پی دستیابی کشور ایران به تکنولوژی ساخت ماهواره‌های LEO<sup>۱</sup>، مسئله ارزیابی محیط تشعشعی فضا با استفاده از ابزارهای ساده، کم حجم و کم توان، یکی از چالش‌های پیش‌رو است.

سیستم‌های دزیمتری بر مبنای پدیده لومینسانس تحریک شده نوری (OSL)، از جمله سیستم‌های دزیمتری هستند که می‌توانند به عنوان یک آشکارساز، بسیاری از ملزومات مورد نیاز برای موارد فوق را برآورده سازند [۱، ۳ و ۵]. سازوکار پدیده فیزیکی OSL بسیار شبیه پدیده ترمولومینسانس (TL) [۶ و ۷] است که اولین بار در سال ۱۹۵۰ برای هدف دزیمتری مورد استفاده قرار گرفت. برای انجام این تکنیک‌ها، نیاز به یک ماده نیمه‌رسانا یا عایق بلوری است. در واقع، یکی از بخش‌های مهم یک سیستم مونیورینگ تشعشعی برای محیط فضا، وجود ماده حساس به پرتو است. هنگامی که این ماده در معرض تابش یونیزان قرار می‌گیرد، برانگیخته شده و انرژی حاصل از این برانگیختگی را در خود ذخیره می‌کند (به صورت گیراندازی الکترون‌های برانگیخته شده در ترازهای ایجاد شده در گاف نواری)، سپس توسط تحریک نوری یا گرمایی، لومینسانس (درخشندگی) موقت و زودگذری در طول این فرایند ایجاد می‌شود. اگر فرایند تحریک در ماده، با گرمادهی انجام شود به آن ترمولومینسانس [۶-۸] و اگر با نوردهی صورت گیرد به آن لومینسانس برانگیخته شده نوری (OSL) می‌گویند [۹ و ۱۰]. لومینسانس تولید شده در این پدیده‌ها، ناشی از بازترکیب جفت الکترون-حفره در زیرترازهای موجود درون گاف نواری بلور میزبان، است که این زیرترازها توسط نقص‌های ذاتی و غیر ذاتی، ایجاد می‌شوند [۷ و ۱۱]. از میان سولفیدهای قلیایی خاکی، بلور استرانسیوم سولفید آلاینده شده با عناصر سربیم و ساماریوم (SrS:Ce,Sm)، به عنوان یک ماده OSL مناسب در سیستم مونیورینگ تشعشعی برای محیط فضا پیشنهاد شده است [۱۲] و [۱۳]. ترازهای انرژی جایگزیده مرتبط با سربیم درون گاف نواری SrS، عمدتاً به عنوان مراکز بازترکیب، نقش ایفا می‌کنند

۲. Spark Plasma Sintering (SPS)

۱. Low Earth Orbit (LEO)

بالا، محصول شرکت مرک (Merck) هستند: ۱- اتیلن دی‌آمین  
تترا استیک اسید EDTA<sup>۱</sup>، به عنوان یک عامل مخلوط کننده.  
۲- استرانسیوم کلرید ۶ آبه (SrCl<sub>۲</sub>·۶H<sub>۲</sub>O)، به عنوان منبع یون  
Sr<sup>۲+</sup>. ۳- سدیم تیوسولفات ۵ آبه (Na<sub>۲</sub>S<sub>۲</sub>O<sub>۳</sub>·۵H<sub>۲</sub>O)، به  
عنوان منبع یون S<sup>۲-</sup>. ۴- تیوگلیسرول (۱-thioglycerol) TG؛  
به عنوان یک عامل پوشش دهنده<sup>۲</sup> برای نانوذرات. ۵- سریم  
نیترات ۶ آبه (Ce(NO<sub>۳</sub>)<sub>۳</sub>·۶H<sub>۲</sub>O) و ساماریوم نیترات ۶ آبه  
(Sm(NO<sub>۳</sub>)<sub>۳</sub>·۶H<sub>۲</sub>O)، به عنوان عناصر آلاینده. ۶- آب دوبار  
یونیزه، به عنوان حلال.  
مشخصه‌یابی‌های ساختاری (الگوی پراش پرتو ایکس)  
نمونه‌های تولید شده، با استفاده از پراش سنج پرتو ایکس مدل  
"PANalytical X'Pert ProMPD" انجام شد. تصاویر FESEM  
از نانوذرات سنتز شده، با استفاده از سیستم  
MIRA3-TESCAN در دانشگاه کردستان، حاصل شد.  
منحنی‌های محوشدگی لومینسانس تحریک شده نوری با طول  
موج پیوسته (CW-OSL)، توسط سیستم آزمایشگاهی OSL  
ساخته شده در مرکز پژوهشی فیزیک بهداشت و رشد بلور  
دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اندازه‌گیری شد. این سیستم مجهز  
به دو لیزر با طول‌موج‌های ۵۳۲ و ۹۸۰ نانومتر به عنوان منبع  
نوری تحریک کننده است که در این پژوهش از لیزر IR، ۹۸۰  
نانومتر برای تحریک قرص‌های SrS:Ce,Sm، استفاده شده  
است. آشکارساز نوری مورد استفاده در این سیستم، لوله  
فوتومولتی پلایر (مدل ۹۲۳۵B) است که دارای حساسیت بالا،  
پاسخ سریع و میزان نوفه پایین است. نمونه‌ها در شرایط کاملاً  
یکسان آزمایشگاهی با لامپ پرتو ایکس مدل (XJ۱۰-۶۰N) با  
طول موج ایکس پیوسته ۰/۵ تا ۲/۵ انگستروم، ولتاژ ۳۰ kV،  
جریان ۲۵ mA و به میزان دز تقریباً ۰/۴ mGy، تابش‌دهی و  
سپس پاسخ OSL هر نمونه، اندازه‌گیری شد.

### ۳. روش آزمایش

در این پژوهش، سنتز نانوذرات SrS:Ce,Sm با استفاده از روش

۱. Ethylene Diamine Tetra Acetic acid (EDTA)

۲. Capping agent

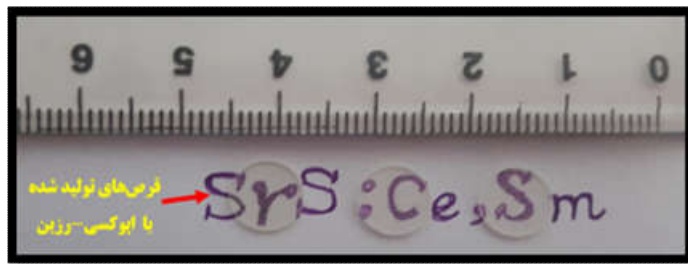
جدول ۱. مشخصات قرص‌های SrS:Ce,Sm سنتز شده با پارامترهای مختلف.

کد نمونه	غلظت ماده پوشش دهنده TG (مولار)	غلظت سریم (درصد مولی mol%)	غلظت ساماریوم (درصد مولی mol%)
C1	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۰۵
C2	۰٫۰۱	۰٫۰۲	۰٫۰۱
C3	۰٫۰۱	۰٫۰۵	۰٫۰۲۵
C4	۰٫۰۱	۰٫۱	۰٫۰۵
C5	۰٫۰۱	۰٫۲	۰٫۱
S1	۰٫۰۰۱	۰٫۰۲	۰٫۰۱
S2	۰٫۰۱	۰٫۰۲	۰٫۰۱
S3	۰٫۰۵	۰٫۰۲	۰٫۰۱
S4	۰٫۱	۰٫۰۲	۰٫۰۱
S5	۰٫۲	۰٫۰۲	۰٫۰۱
S6	۰٫۵	۰٫۰۲	۰٫۰۱

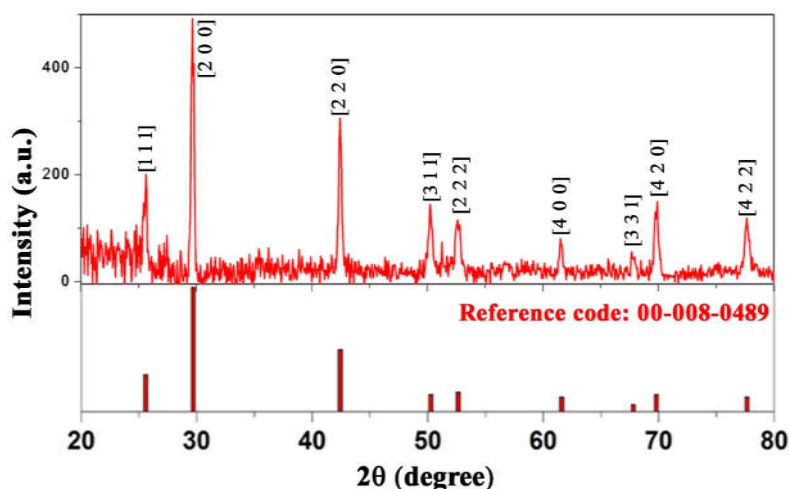
خشک شده در یک بوتۀ آلومینا قرار داده شد و سپس به منظور بازتبلور ساختار بلورین نانوذرات استرانسیوم سولفید سنتز شده و همچنین احیای درصد اندک فاز استرانسیوم سولفات ( $\text{SrSO}_4$ ) به فاز استرانسیوم سولفید (SrS) و تک فاز کردن رسوب به دست آمده، در یک کوره اتمسفر کنترل در اتمسفر احیا کننده کربن<sup>۱</sup> در فشار محیطی با نرخ گرمایش و سرمایش ۴ و ۲ درجه سانتی‌گراد بر دقیقه و مدت زمان ماندگاری ۳ ساعت در دمای نهایی ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد، بازپخت داده شد. پس از عملیات حرارتی، پودر حاصل شده، تحت سایش با هاون عقیق قرار گرفت. قابل ذکر است، به منظور بررسی اثر اندازه نانوذرات و همچنین غلظت ناخالصی‌ها بر روی پاسخ لومینسانس OSL نمونه‌ها، تعداد ۱۱ دسته نمونه با مشخصات مختلف، سنتز شد، بدین صورت که یک بار، غلظت تیوگلیسرول (به عنوان ماده پوشش دهنده برای کنترل اندازه نانوذرات) ثابت نگه داشته شد و ۵ نمونه با غلظت‌های مختلف سریم و ساماریوم سنتز شد. بار دیگر، غلظت سریم و ساماریوم ثابت نگه داشته شد و ۶ نمونه با غلظت‌های مختلف تیوگلیسرول، سنتز شد. مشخصات کامل نمونه‌ها همراه با نام‌گذاری آن‌ها در جدول ۱، ارائه شده است.

در اکثر روش‌های سنتز، مواد به شکل پودر تولید می‌شوند و همچنان فقدان نمونه‌های نانوبلوری با ابعاد بزرگ و عاری از تخلخل که بتواند به عنوان یک آشکارساز مورد استفاده قرار گیرد، وجود دارد. تکنیک مورد استفاده در این پژوهش به منظور تولید قرص‌هایی با قطر و ضخامت یکسان، روش مخلوط کردن نانوپودر با اپوکسی-رزین بیسفنول A، (با نسبت ۱۰ درصد پودر به ۹۰ درصد رزین) است. در ابتدا حدود ۰٫۱ گرم از نانوپودر SrS:Ce,Sm با ۴ سی‌سی رزین بیسفنول A مخلوط شد به طوری که این پودر کاملاً در رزین به صورت همگن پخش شود. سپس ۲ سی‌سی ماده سخت کننده B (نسبت رزین A به ماده سخت کننده B در این روش، ۲ به ۱ است) به مخلوط قبلی اضافه شد و مدت زمان ۱۵۰ دقیقه اجازه داده شد تا در دمای اتاق، مرحله پخت انجام شود. اگر اپوکسی و سخت کننده (هاردنر) به نسبت صحیح و به درستی مخلوط نشوند، آن بخش از رزین یا سخت کننده که وارد واکنش نشده، به همان شکل باقی خواهد ماند و باعث افت شدید فنی و مقاومتی محصول می‌شود. در این مدت زمان مرحله پخت، بایستی کل مخلوط به صورت مکانیکی، به طور پیوسته در حال هم‌زدن باشد تا رسوب پودر

۱. Carbon reducing atmosphere



شکل ۱. (رنگی در نسخه الکترونیکی) قرص‌های  $SrS:Ce,Sm$  نانو ساختار، تولید شده به روش مخلوط نانوپودر با اپوکسی-رزین.



شکل ۲. (رنگی در نسخه الکترونیکی) الگوی پراش پرتو ایکس مربوط به قرص اپوکسی-رزین مخلوط شده با پودر  $SrS:Ce,Sm$  (نمونه S3).

#### ۴. نتایج و بحث

##### ۴.۱. مشخصه‌یابی‌های ساختاری

تأیید تشکیل فاز بلورین از نمونه‌های قرص مخلوط اپوکسی-رزین و نانوپودر با اندازه نانوذرات و غلظت‌های ناخالصی مختلف، با استفاده از آنالیز پراش پرتو ایکس (XRD) بررسی شد و به اختصار، فقط نتایج الگوی پراش پرتو ایکس مربوط به نمونه S3 در شکل ۲ نشان داده شده است. الگوی پراش پرتو ایکس از این نمونه نشان می‌دهد که تطابق بسیار خوبی با کارت استاندارد شماره کد (۰۴۸۹-۰۰۸-۰۰) مربوط به ساختار بلورین استرانسیوم سولفید ( $SrS$ ) در فاز نمک طعام ( $NaCl$ ) با ثابت شبکه  $۰.۲۶۰۲$  انگستروم دارد. قابل ذکر است، نتایج الگوی پراش پرتو ایکس برای نمونه رزین خالص بدون نانوپودر  $SrS:Ce,Sm$  نشان داد هیچ ساختار بلورینی ندارد و ساختار آن، آمورف (بی شکل) است که الگوی پراش آن در اینجا ارائه نشده است.

مورد نظر در حین پخت اپوکسی-رزین، اتفاق نیفتد. بعد از این مرحله، مخلوط رزین و پودر که به صورت تقریباً صمغ مانند آماده شده، در بین دو ورق طلق بسیار تمیز قرار داده شد و به منظور حصول یک لایه نازک با ضخامت در محدوده  $۷۰۰$  تا  $۸۵۰$  میکرومتر، غلظت شد که بعد از گذشت زمانی حدود ۱۲ ساعت، به طور کامل خشک شدند. با استفاده از یک سمبه، قرص‌هایی با قطر  $۸$  میلی‌متر از لایه نازک مخلوط نانوپودر و اپوکسی-رزین تهیه شدند (شکل ۱).

قرص‌های به دست آمده از این روش تقریباً شفاف هستند. به منظور مقایسه نتایج اندازه‌گیری پاسخ OSL نمونه‌ها و دستیابی به پارامترهای بهینه (شامل غلظت ناخالصی و اندازه نانوذرات بهینه)، سعی شد قرص‌هایی با وزن و ضخامت کاملاً یکسان ( $۰.۴$  گرم و  $۸۰۰$  میکرومتر) انتخاب شوند.

جدول ۲. جزئیات نتایج کریستالوگرافی مربوط به شکل ۲.

نمونه	زاویه پراش (درجه)	پهنای نیم شدت (رادیان)	hkl	فاصله صفحات شبکه (انگستروم)	اندازه نانوبلورک (نانومتر)	ثابت شبکه (انگستروم)
SrS:Ce,Sm (۰,۰۲, ۰,۰۱ mol%)	۲۵,۵۸	۰,۰۰۵۵	۱۱۱	۳,۴۸	۲۵,۹	۶,۰۲
	۲۹,۶۴	۰,۰۰۲۴	۲۰۰	۳,۰۱	۵۹,۵	۶,۰۲
	۴۲,۴۲	۰,۰۰۴۱	۲۲۰	۲,۱۳	۳۶,۱	۶,۰۲
	۵۰,۲۷	۰,۰۰۵۴	۳۱۱	۱,۸۱	۲۷,۹	۶,۰۰
	۵۲,۶۱	۰,۰۰۶۸	۲۲۲	۱,۷۳	۲۲,۵	۵,۶۶
	۶۱,۵۴	۰,۰۰۴۱	۴۰۰	۱,۵۰	۳۹,۱	۶,۰۰
	۶۷,۷۵	۰,۰۰۵۴	۳۳۱	۱,۳۸	۳۰,۴	۶,۰۱
	۶۹,۸۰	۰,۰۰۶۸	۴۲۰	۱,۳۴	۲۸,۵	۵,۹۹
	۷۷,۶۳	۰,۰۰۵۱	۴۲۲	۱,۲۲	۳۵,۴	۵/۹۸

کرده است و شکل نانوذرات، تقریباً کروی است. اما با توجه به شکل ۳. د، می توان نتیجه گرفت که با افزایش غلظت تیوگلیسرول، سیر نزولی اندازه نانوذرات ادامه پیدا نمی کند و در غلظت ۰/۱ مولار تیوگلیسرول، اندازه نانوذرات تقریباً پایین ترین مقدار است. این نتیجه با نتایج اندازه نانوبلورکها (محاسبه شده به روش شرر با استفاده از نتایج الگوی پراش پرتو ایکس) مربوط به نمونه های S۱ تا S۶ که در ادامه آورده شده است، کاملاً منطبق است.

#### ۲.۴. مشخصه یابی های دزیمتری و نتایج ارزیابی پاسخ OSL قرص های SrS:Ce,Sm نانو ساختار

در این بخش به بررسی پاسخ OSL قرص های SrS:Ce,Sm نانو ساختار و ارزیابی و مقایسه حساسیت آنها پرداخته می شود. این کار برای پی بردن به قابلیت استفاده از این مواد به عنوان آشکارساز در دزیمتری فضایی OSL است. برای این منظور، قرص های SrS:Ce,Sm با اندازه های نانوذرات مختلف و غلظت های ناخالصی متفاوت را در شرایط کاملاً یکسان با پرتو ایکس (ولتاژ ۳۰ kV و جریان ۲۵ mA) و به میزان دز تقریباً ۰/۴ mGy، تابش دهی و سپس پاسخ OSL هر نمونه، اندازه گیری شد. در این اندازه گیری ها، کل زمان خوانش نمونه ها ۴ ثانیه است که در ۱ ثانیه اول، لیزر IR خاموش بوده

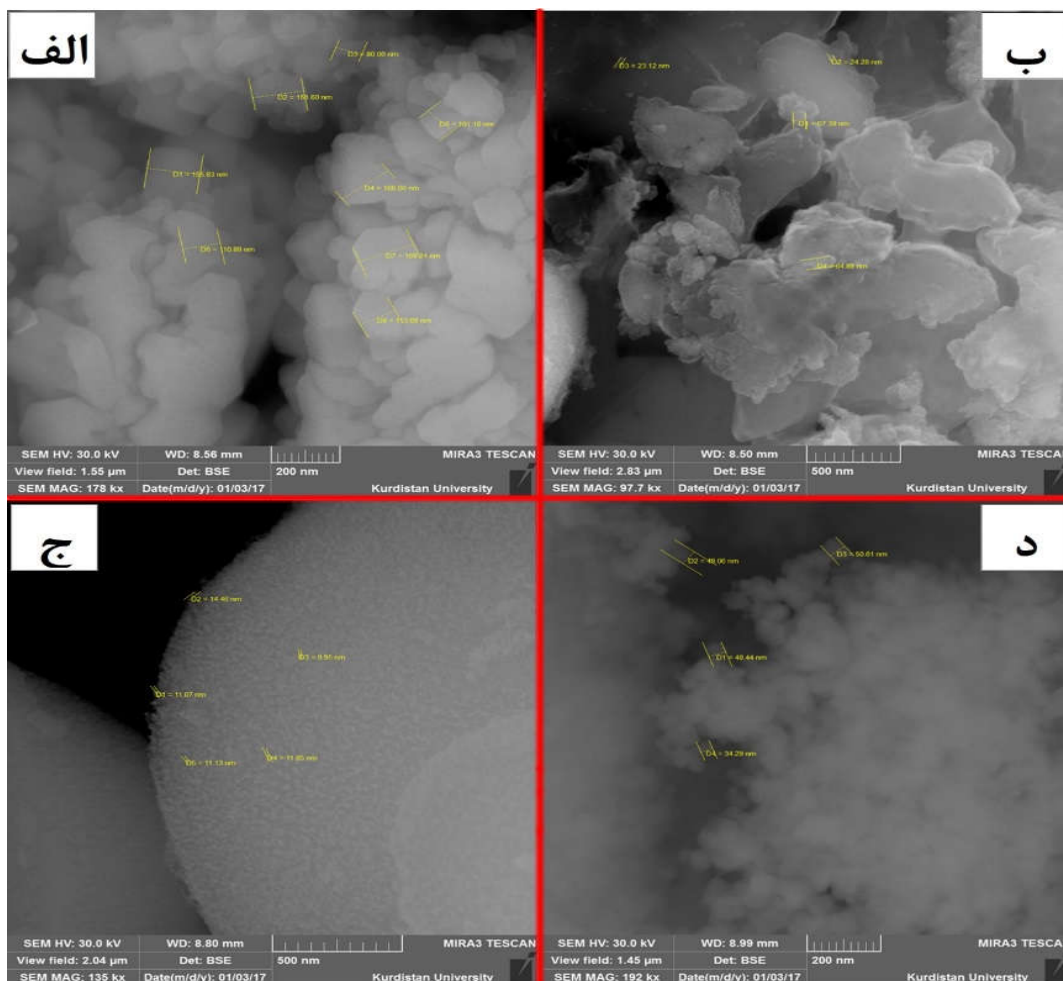
جزئیات مربوط به نتایج کریستالوگرافی نمونه تولید شده، در جدول ۲ ارائه شده است. ثابت شبکه، فاصله بین صفحات بلورین و همچنین میانگین اندازه بلورکها در این جدول آورده شده است.

میانگین اندازه نانوبلورک های ارایه شده در جدول ۲، با استفاده از رابطه شرر (معادله ۱)، محاسبه شده است.

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

در این معادله،  $\beta$  پهنای نیم شدت (FWHM) بر حسب رادیان،  $\lambda$  طول موج پرتو ایکس از هدف مسی  $\text{Cu K}\alpha$  و  $\theta$  زاویه پراش است.

مورفولوژی نانوپودر SrS:Ce,Sm مربوط به نمونه هایی با غلظت های تیوگلیسرول ۰/۰۱، ۰/۰۱، ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۲ مولار، به منظور بررسی تأثیر غلظت این ماده بر روی اندازه نانوذرات، توسط میکروسکوپ FESEM تهیه شدند که به ترتیب در شکل ۳. الف، ب، ج و د، با بزرگ نمایی های مختلف نشان داده شده است. با توجه به شکل ۳. الف و ب، می توان گفت که نانوذرات تولید شده در غلظت های پایین تیوگلیسرول (یعنی ۰/۰۱ و ۰/۰۱ مولار)، کاملاً غیرکروی و میانگین اندازه نانوذرات نسبت به نمونه های شکل ۳. ج و د، بزرگ تر است. طبق شکل ۳. ج مشاهده می شود که اندازه نانوذرات در غلظت ۰/۱ مولار تیوگلیسرول، به طور قابل ملاحظه ای کاهش پیدا



شکل ۳. (رنگی در نسخه الکترونیکی) تصاویر میکروسکوپ الکترونی گسیل میدانی روبشی (FESEM) از پودر SrS:Ce,Sm سنتز شده با غلظت‌های مختلف تیوگلیسرول (الف) ۰/۰۰۱ مولار، (ب) ۰/۰۰۱ مولار، (ج) ۰/۰۱ مولار و (د) ۰/۰۲ مولار.

OSL بر حسب زمان برای این نمونه‌ها در شکل ۴، نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ارتفاع اولیه قله نمودار OSL، برای نمونه C2 که غلظت سریم و ساماریوم آن به ترتیب ۰/۰۲ و ۰/۰۱ درصد مولی هستند، دارای بیشترین مقدار است.

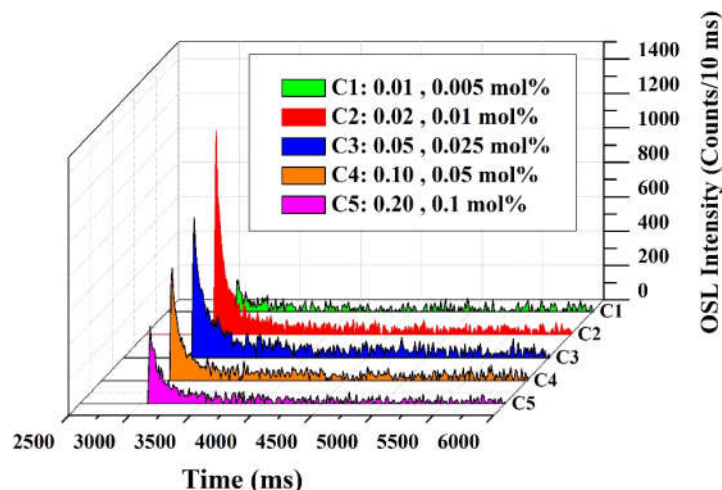
به منظور مقایسه دقیق‌تر نتایج و تحلیل رفتار و حساسیت پاسخ OSL بر اساس غلظت آلییدگی، مقادیر پارامتر ارتفاع اولیه قله نمودار OSL مربوط به اندازه‌گیری‌های شکل ۴، بر حسب غلظت سریم، در شکل ۵ رسم شده است (در تمامی نمونه‌ها، غلظت ساماریوم نصف غلظت سریم است).

در شکل ۵، مشاهده می‌شود ارتفاع اولیه قله نمودار OSL

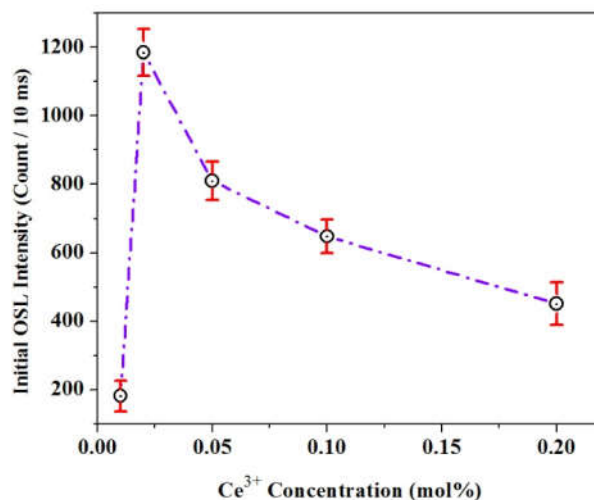
و هیچ نور تحریک کننده‌ای به نمونه‌ها نمی‌رسد. مقایسه نمودارها برای نمونه‌های مختلف به منظور دستیابی به مقادیر بهینه اندازه نانوذرات و غلظت ناخالصی، هم از لحاظ ارتفاع اولیه قله نمودار OSL و هم انتگرال زیر منحنی OSL انجام می‌شود.

#### ۳.۴. بررسی تأثیر غلظت ناخالصی‌ها بر پاسخ OSL نمونه‌ها

برای بررسی و بهینه نمودن حساسیت پاسخ OSL نمونه‌ها بر حسب غلظت‌های مختلف ناخالصی‌ها، اندازه‌گیری‌ها با نمونه‌های C1، C2، C3، C4 و C5 (که هر کدام از نظر پارامترها و شرایط سنتز کاملاً مشابه بوده و تنها در غلظت ناخالصی‌ها متفاوت هستند)، انجام شد. نمودار محوشدگی



شکل ۴. (رنگی در نسخه الکترونیکی) نمودار محوشدگی OSL مربوط به نمونه‌های SrS:Ce,Sm با غلظت‌های مختلف آلیبدگی سریم و ساماریوم.



شکل ۵. (رنگی در نسخه الکترونیکی) نمودار تغییرات مقادیر ارتفاع اولیه قله نمودار OSL بر حسب غلظت سریم.

ماده میزبان (یعنی شبکه استرانسیوم سولفید) [۲۰].

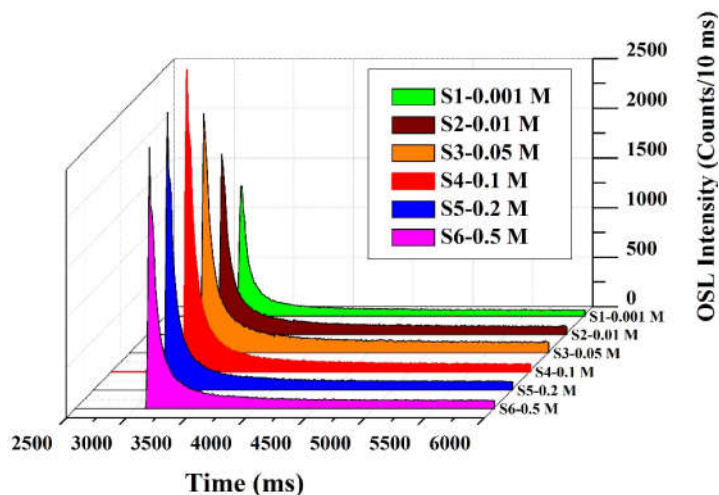
#### ۴.۴ بررسی تأثیر غلظت تیوگلیسرول بر اندازه

##### نانوبلورک‌ها و پاسخ OSL نمونه‌ها

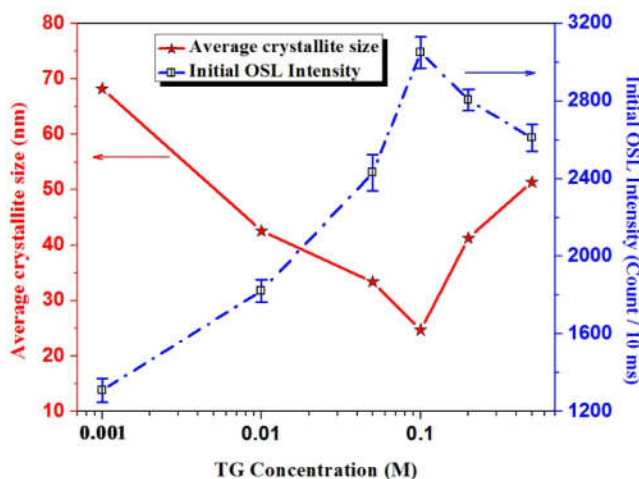
تأثیر غلظت تیوگلیسرول به عنوان عامل پوشش دهنده برای کنترل اندازه نانوذرات [۱۹] در تصاویر FESEM (شکل ۳) نشان داده شد. در این بخش همچنین تأثیر این پارامتر بر اندازه نانوبلورک‌ها (به دست آمده از نتایج XRD) و به دنبال آن تأثیر اندازه نانوبلورک‌ها بر حساسیت پاسخ OSL و شدت

و در واقع حساسیت پاسخ OSL مربوط به نمونه C۱، بسیار پایین است. با افزایش غلظت سریم و ساماریوم در نمونه C۲، حساسیت پاسخ OSL و شدت لومینسانس به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. اما این روند ادامه پیدا نمی‌کند و برای نمونه C۳، افزایش غلظت ناخالصی‌ها منجر به افزایش حساسیت پاسخ OSL و شدت لومینسانس نمی‌شود و با سیر نزولی پارامتر فوق همراه است. دلیل این امر مرتبط است با تغییر در توزیع ترازهای گیراندازی به علت اختلال شبکه ناشی از برهم‌کنش یون‌های فعال سریم و ساماریوم در شبکه





شکل ۶. (رنگی در نسخه الکترونیکی) نمودار محوشدگی OSL مربوط به نمونه‌های SrS:Ce,Sm، سنتز شده با غلظت‌های مختلف تیوگلیسرول.



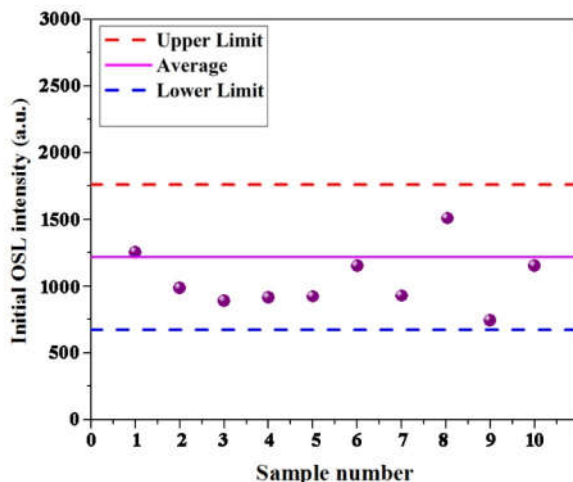
شکل ۷. (رنگی در نسخه الکترونیکی) نمودار تغییرات میانگین اندازه نانوبلورک‌ها و همچنین ارتفاع اولیه قله نمودار OSL بر حسب غلظت تیوگلیسرول.

نمونه‌های دیگر، افزایش یافته است. بررسی دقیق‌تر پاسخ OSL نمونه‌های با اندازه نانوذرات مختلف، به صورت تغییرات پارامترهای میانگین اندازه نانوبلورک‌ها و همچنین ارتفاع اولیه قله نمودار OSL بر حسب غلظت تیوگلیسرول در شکل ۷، به طور هم‌زمان رسم شده است.

شکل ۷، به طور شفاف نشان می‌دهد در غلظت‌های پایین تیوگلیسرول (کوچک‌تر از ۰/۱ مولار)، با افزایش غلظت تیوگلیسرول به عنوان عامل اصلی برای کنترل اندازه نانوذرات، میانگین اندازه نانوبلورک‌ها کاهش پیدا می‌کند که این نتیجه

لومینسانس نمونه‌ها، بررسی می‌شود. اندازه‌گیری پاسخ OSL نمونه‌ها بر اساس تغییرات اندازه نانوذرات، با نمونه‌های S1، S2، S3، S4 و S5 (که هر کدام از نظر پارامترها و شرایط سنتز کاملاً مشابه بوده و تنها در غلظت تیوگلیسرول متفاوت هستند)، انجام شد که در شکل ۶ نشان داده شده است.

همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، ارتفاع اولیه قله نمودار OSL مربوط به نمونه S4 و حساسیت پاسخ این نمونه به پرتو ایکس (به میزان دز تقریباً 0.4 mGy)، در مقایسه با



شکل ۸. (رنگی در نسخه الکترونیکی) مقادیر ارتفاع اولیه قله نمودار OSL برای ۱۰ نمونه تقریباً یکسان، از دسته نمونه‌های کد C2.

$$(\bar{x} - l_i, \bar{x} + l_i), \quad (2)$$

$$l_i(n_i) = \frac{t_{n_i} \cdot S_i}{\sqrt{n_i}}, \quad (3)$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (4)$$

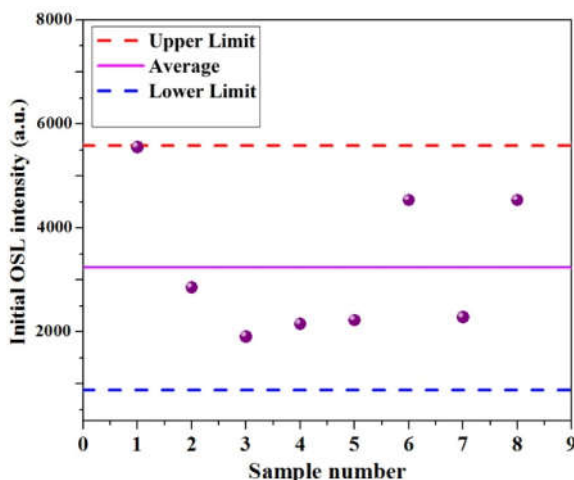
در روابط فوق  $x$  داده‌های هر اندازه‌گیری،  $\bar{x}$  میانگین داده‌های هر دسته اندازه‌گیری،  $l_i$  نیم‌پهنای بازه اطمینان،  $n$  تعداد اندازه‌گیری‌ها و  $S$  انحراف معیار است. پارامتر  $t_{n_i}$  بر طبق جدول ارائه شده توسط آبراموویچ و همکارانش [۲۴]، برای تعداد ۱۰ و ۸ نمونه، به ترتیب برابر با ۲٫۲۶ و ۲٫۳۷ است. به اختصار، فقط نتایج آماری مربوط به نمونه‌های دسته C۲ و S۴ در شکل ۸ و شکل ۹ نشان داده شده است.

در نهایت، به منظور بررسی خطی بودن پاسخ OSL نمونه بهینه (یعنی نمونه S۴) نسبت به تغییرات دز، مقادیر کل مساحت زیر منحنی نمودار OSL بر حسب مقادیر دز مختلف، ترسیم شد که در شکل ۱۰ نمایش داده شده است.

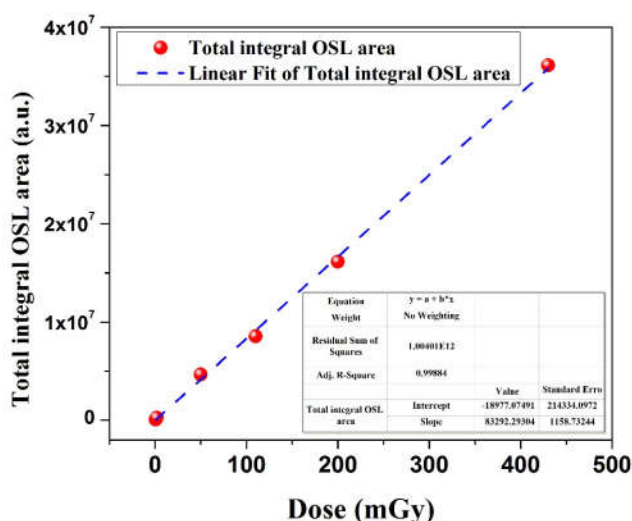
از آنجایی که کاربرد نهایی نانوفسفر SrS:Ce,Sm، در دزیمتری آبی (آنلاین) برای پایش محیط تشعشعی فضا در مدارهای LEO است، حساسیت این ماده برای به کارگیری در این محیط‌های با دز پایین و همچنین نرخ دز پایین [۳، ۹ و ۱۱]، بایستی بسیار بالا باشد. از این رو، پاسخ OSL نمونه بهینه در محدوده مقادیر دز پایین مورد بررسی قرار گرفت که

در تطابق بسیار خوبی با نتایج تصاویر FESEM (شکل ۳) است. در شکل ۷ مشاهده می‌شود، کاهش اندازه نانوبلورک‌ها موجب افزایش شدت لومینسانس و در واقع افزایش پارامتر ارتفاع اولیه قله نمودار OSL شده است. دلیل این امر می‌تواند نتیجه اثر محبس کوانتومی و همچنین افزایش نسبت سطح به حجم در نمونه‌هایی با اندازه نانوذرات کوچک‌تر باشد [۲۱] و [۲۲]. اما در غلظت‌های بالاتر از ۰٫۱ مولار برای تیوگلیسرول، افزایش غلظت موجب افزایش اندازه نانوبلورک‌ها و متعاقباً کاهش بازده لومینسانس و تنزل ارتفاع اولیه قله نمودار OSL می‌شود.

قابل ذکر است، به منظور اطمینان از دقت نتایج و همچنین تخمین عدم قطعیت آنها، از هرکدام از نمونه‌هایی که با کد C شروع می‌شوند، تعداد ۱۰ قرص نازک تقریباً مشابه و از هرکدام از نمونه‌هایی که با کد S شروع می‌شوند، تعداد ۸ قرص نازک تقریباً مشابه (مشابه از نظر غلظت آلیش، اندازه نانوذرات، جرم، قطر و ضخامت)، به صورت آماری مورد اندازه‌گیری قرار گرفتند که نتایج مربوط به نمونه نزدیک به خط میانگین از هر دسته نمونه، در شکل‌های ۴ الی ۷ آورده شده است. توزیع آماری به کار گرفته شده به منظور تحلیل نتایج، توزیع  $t$  دانش آموزان (Students t-distribution) [۲۳] است که توسط معادله‌های ۲ الی ۴ معرفی شده‌اند.



شکل ۹. (رنگی در نسخه الکترونیکی) مقادیر ارتفاع اولیه قله نمودار OSL برای ۸ نمونه تقریباً یکسان، از دسته نمونه‌های کد S۴.



شکل ۱۰. (رنگی در نسخه الکترونیکی) نمودار پاسخ OSL نمونه بهینه (نمونه S۴) بر حسب تغییرات دز.

هم‌رسوبی با موفقیت انجام شد. به منظور دستیابی به یک بلور مناسب برای استفاده در آشکارساز تشعشع‌سنج فضایی، تولید قرص از پودرهای سنتز شده با روش مخلوط کردن پودر با اپوکسی- رزین بیسفنول A انجام شد و قرص‌هایی با قطر ۸ میلی‌متر و ضخامت ۰/۸ میلی‌متر به دست آمد. در فرایند سنتز نانوپودر، به منظور کنترل اندازه نانوذرات، از تیوگلیسرول به عنوان عامل پوشش دهنده نانوذرات استفاده شد. تأثیر غلظت تیوگلیسرول بر تغییرات اندازه نانوذرات، بر اساس تصاویر FESEM و همچنین تغییرات اندازه

نتایج آن در شکل ۱۰ نشان داده شده است. نمودار شکل ۱۰ نشان می‌دهد که پاسخ OSL نمونه بهینه در محدوده دز ۰/۴ تا ۴۵۰ میلی‌گری، تقریباً خطی است و می‌تواند به عنوان یک کاندیدای مناسب در آشکارسازی تشعشع‌های فضایی و محیط‌های با دز پایین یا نرخ دز پایین، مورد استفاده قرار بگیرد.

## ۵. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، سنتز نانوپودر SrS:Ce,Sm با مقادیر مختلف غلظت سریم و ساماریوم و اندازه نانوذرات متفاوت به روش

رابطه خطی با غلظت آلاینده‌ها ندارد و حالت بهینه برای غلظت‌های ( $Ce = 0.02 \text{ mol\%}$  و  $Sm = 0.01 \text{ mol\%}$ ) است. پاسخ OSL نمونه بهینه (یعنی نمونه S4) نسبت به تغییرات دز به صورت نمودار مقدار کل مساحت زیر منحنی نمودار OSL بر حسب مقادیر دز مختلف (محدوده دز پایین)، ترسیم شد. نتایج نشان داد که پاسخ OSL نمونه بهینه در محدوده دز ۰٫۴ تا ۴۵۰ میلی‌گری، تقریباً خطی است و می‌تواند به عنوان یک بلور مناسب با حساسیت بالا برای محیط‌های با دز پایین یا نرخ دز پایین، به کار گرفته شود.

### قدردانی

نویسندگان از تحصیلات تکمیلی دانشگاه صنعتی مالک اشتر و مرکز پژوهشی فیزیک بهداشت و رشد بلور، به دلیل حمایت‌های مادی و معنوی تشکر و قدردانی می‌کنند.

نانوبلورک‌ها بر اساس نتایج XRD و استفاده از رابطه شرر، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که میانگین اندازه نانوذرات و همچنین نانوبلورک‌ها در غلظت ۰٫۱ مولار از تیوگلیسرول، کمترین مقدار خود را دارند و رابطه خطی با غلظت تیوگلیسرول ندارند. نتایج تغییرات غلظت تیوگلیسرول یا در واقع تغییرات اندازه نانوبلورک‌ها بر حساسیت پاسخ OSL نمونه‌های تولید شده نشان داد با کوچک‌تر شدن اندازه نانوذرات، به دلیل اثر محبس کوانتومی و همچنین افزایش نسبت سطح به حجم در نمونه‌هایی با اندازه نانوذرات کوچک‌تر، بازده لومینسانس و همچنین شدت ارتفاع اولیه قله نمودار OSL، به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. تأثیر غلظت آلاینده‌ها (سریم و ساماریوم) بر حساسیت پاسخ OSL نمونه‌ها نیز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج مشخصه‌یابی‌های دزیمتری نشان داد شدت لومینسانس

### مراجع

1. P Garcia, J R Vaillé, D Benoit, H Chabane, G Berger, K Idri, J Boch, B Sagnes, F Saigné, and E Lorfèvre, *IEEE transactions on nuclear science* **53** (2006) 3713.
2. S Bourdarie, D Falguere, C Inguibert, C Deneau, J Vaillé, E Lorfèvre, and R Ecoffet, in *Radiation Effects on Components and Systems* (2013).
3. D Plattard, G Ranchoux, L Dusseau, G Polge, J Vaillé, J Gasiot, J Fesquet, R Ecoffet, and N Iborra-Brassart, *Nuclear Science, IEEE Transactions on*, **49** (2002) 1322.
4. M Bahmanabadi, *Iranian Journal of Physics Research* **17** 3 (2017) 473.
۴. م بهمن‌آبادی، مجله پژوهش فیزیک ایران **۱۷** ۳ (۱۳۹۶) ۴۷۳.
5. L Dusseau and J Gasiot, *International journal of high speed electronics and systems*, **14** (2004) 605.
6. KH Mohammadi, R Sarraf Maamory, R Mohammadi, and A Mosavi Zarandi, *Iranian Journal of Physics Research* **9** 4 (2010) 321.
۶. خ محمدی، ر صراف ماموری، ر محمدی، ع موسوی زرنندی، مجله پژوهش فیزیک ایران **۹** ۴ (۱۳۸۸) ۳۲۱.
7. F Torkzadeh, S S Amini, and M Fugger, *Iranian Journal of Physics Research* **13** 3 (2013) 235.
۷. ف ترک‌زاده، س امینی و م فوگر، مجله پژوهش فیزیک ایران
- ۳ ۱۳ (۱۳۸۸) ۲۳۵.
8. M Zahedifar and E Sadeghi, *Iranian Journal of Physics Research* **13** 3 (2013) 313.
۸. م زاهدی فر و ا صادقی، مجله پژوهش فیزیک ایران **۱۳** ۳ (۱۳۹۲) ۱۱۳.
9. E G Yukihiro and S W McKeever, "Optically stimulated luminescence: fundamentals and applications", John Wiley & Sons (2011).
10. S W McKeever, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* **184** (2001) 29.
11. M Yazdanmehr, H Sadeghi, M K Tehrani, S J Hashemifar, and M Mahdavi, *Optical Materials* **75** (2018) 304.
12. D Benoit, P Garcia, S Matias-Vaillé, F Ravotti, J Vaillé, M Glaser, B Brichard, A F Fernandez, C Chatry, and L Dusseau, in *Radiation and Its Effects on Components and Systems, 2007 RADECS 2007 9th European Conference on* (2007) 1.
13. P Garcia, J R Vaillé, D Benoit, F Ravotti, L Artola, B Sagnes, E Lorfèvre, F Bezerra, and L Dusseau, *Nuclear Science, IEEE Transactions on* **54** (2007) 2272.
14. D Benoit, J R Vaillé, J Lautissier, S Matias-Vaillé, J Isturiz, P Garcia, B Brichard, and L Dusseau, *IEEE Transactions On Nuclear Science* **55** (2008) 3421.

- Nanotechnology* **17** (2006) 3812.
20. B Hüttl, U Troppenz, K Velthaus, C Ronda, and R Mauch, *Journal of applied physics* **78** (1995) 7282.
21. L Gomes, H M d S M Linhares, R U Ichikawa, L G Martinez, and I M Ranieri, *Journal of Luminescence* **157** (2015) 285.
22. A Patle, R Patil, M Kulkarni, B Bhatt, and S Moharil, *Optical Materials* **48** (2015) 185.
23. L Nascimento and Y Hornos, *Radiation Measurements* **45** (2010) 51.
24. M Abramowitz and I A Stegun, "*Handbook of mathematical functions: with formulas, graphs, and mathematical tables*" **55** Courier Corporation, (1964).
15. D Benoit, P Garcia, S Matias-Vaille, F Ravotti, J R Vaille, M Glaser, B. Brichard, A F Fernandez, C Chatry, and L Dusseau, *IEEE Transactions on Nuclear Science* **55** (2008) 2154.
16. F Ravotti, "*Development and characterisation of radiation monitoring sensors for the high energy physics experiments of the CERN LHC accelerator*", Montpellier U. (2006).
17. D Benoit, F Ravotti, P Garcia, H Prevost, D Lapraz, J R Vaillé, and L Dusseau, *physica status solidi (a)* **205** (2008) 1196.
18. F Ravotti, D Benoit, P Lefebvre, P Valvin, J R Vaillé, L Dusseau, J Fesquet, and J. Gasiot, *Journal of Applied Physics* **102** (2007) 123102.
19. Z Sedaghat, N Taghavinia, and M Marandi,