

ساخت دزیمر لیتیم فلوراید آلاینده با استرانسیم و سریم به روش ذوب و مطالعه خواص ترمولومینسانس آن

مقداد خلیفه شوشتری^۱، احسان صادقی^{۱*} و مصطفی زاهدی^۲

^۱دانشکده فیزیک، دانشگاه کاشان، کاشان، اصفهان، ایران.

^۲پژوهشکده نانو دانشگاه کاشان، کاشان، اصفهان، ایران.

*اصفهان، کاشان، دانشگاه کاشان، دانشکده فیزیک، گروه هسته ای، کدپستی: ۸۷۳۱۷۵۳۱۵۳

پست الکترونیکی: sdgh@kashanu.ac.ir

چکیده

در این تحقیق ماده میزبان لیتیم فلوراید توسط ناخالصی‌های استرانسیم و سریم با استفاده از روش ذوب آلاینده شد و خواص ترمولومینسانس آن مورد بررسی قرار گرفت. مقادیر بهینه مربوط به غلظت هر یک از ناخالصی‌ها به ترتیب ۰/۵ و ۰/۱ مول درصد به دست آمد. برای این نمونه تکرارپذیری در قابلیت استفاده مجدد در ۵ مرتبه مراحل تابکاری، پرتودهی و قرائت بررسی شد که تغییر چندانی در حساسیت آن دیده نشد. محوشدگی نمونه نیز برای مدت ۳۰ روز بعد از پرتودهی مورد بررسی قرار گرفت که بیشترین کاهش حساسیت در قله دمایی پایین مشاهده شد و قله های اصلی و دمایی بالا کاهش چندانی در حساسیت خود نداشتند. پاسخ دز در بازه ۱ میلی‌گری تا ۱۰ گری رفتار خطی از خود بروز می‌دهد. برازش منحنی ترمولومینسانس نمونه ساخته شده نشان می‌دهد که سه قله در دماهای ۴۱۶، ۴۷۲ و ۵۰۶ کلوین وجود دارد که پارامترهای سینتیک برای هر کدام از آن‌ها با استفاده از مدل سینتیک مرتبه عام محاسبه شد.

کلیدواژگان: لیتیم فلوراید، دزیمر ترمولومینسانس، روش ذوب، حساسیت، پاسخ دز.

۱. مقدمه

ترمولومینسانس ایده‌آل در این مطالعات در نظر گرفته می‌شود عبارتند از: ساختار ساده برای منحنی درخشش با دمایی قله اصلی مناسب (دمای $200-250^{\circ}\text{C}$ به جهت کاهش محوشدگی پاسخ ترمولومینسانس و تأثیرپذیری کمتر از گیراندازهای عمیق)، حساسیت و پایداری بالا، پاسخ خطی در

امروزه استفاده از دزیمرهای ترمولومینسانس برای دزیمری در زمینه‌های پزشکی، فردی و محیطی بسیار گسترده شده است. انواع دزیمرها با ناخالصی‌های مختلف و اندازه‌های گوناگون ساخته شده و خواص دزیمری آن‌ها بررسی می‌شود [۱-۳]. از جمله شاخصه‌هایی که برای یک دزیمر

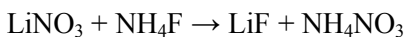
فرآیندهای هم‌رسوبی و تبخیر آماده می‌شوند و ساختارهای تک بلوری را نیز با استفاده از روش‌های چوکراسکی و ذوب می‌توان تهیه نمود. برای ساخت نمونه‌های به صورت فیلم نازک روش‌های متداولی چون سل-ژل و نهشت تبخیری به کار گرفته می‌شوند [۱۰-۱۲].

در این تحقیق ماده میزبان لیتیم فلوراید انتخاب شده و با استفاده از روش ذوب آلاینده‌های استرانسیم و سریم به ساختار بلوری آن اضافه شد تا نمونه‌ای با ویژگی‌های مناسب جهت انجام دزیمتری ترمولومینسانس حاصل شود.

۲. روش های تجربی

۱.۲. آماده سازی ماده میزبان

در این تحقیق ماده میزبان لیتیم فلوراید با استفاده از روش هم‌رسوبی که بر اساس واکنش زیر انجام می‌گیرد، آماده شد:



نیترات لیتیم و فلوراید آمونیوم هر کدام با درصد خلوص ۹۹/۹٪ ساخته شرکت مرک مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

برای تهیه ماده میزبان، نیترات لیتیم به محلول متشکل از آب یونیزه و استون اضافه شده و بر روی همزن قرار داده شد. سپس فلوراید آمونیوم نیز در محلول استون و آب یونیزه حل شد. این محلول به صورت قطره قطره به محلول اولیه اضافه گردید و پس از انجام فرآیند هم‌رسوبی، رسوب از محلول جدا شد. در نهایت رسوب تشکیل شده ۳ بار با استون شستشو داده شده و به مدت ۲ ساعت در دمای 90°C در کوره خشک شد. در این پژوهش از ناخالصی‌های استرانسیم و سریم به صورت ترکیب‌های نیترات استرانسیم با درصد خلوص ۹۹/۹۵٪ و نیترات سریم با درصد خلوص ۹۹/۹٪ ساخته شرکت مرک

یک بازه دز (بسته به نوع کاربرد دزیمتری)، مقاوم در مقابل عوامل محیطی، عدد اتمی مؤثر متناسب با بافت بدن جهت انجام پرتوسنجی فردی و قابلیت استفاده مکرر بدون تغییر محسوس در حساسیت ماده [۴].

لیتیم فلوراید حتی به صورت خالص در اهداف دزیمتری استفاده شده است [۵]. این ماده به عنوان یک ماده میزبان در پرتوسنجی به روش ترمولومینسانس، یکی از معروف‌ترین و پرکاربردترین بلورها می‌باشد چرا که عدد اتمی مؤثر آن $(8/14)$ نزدیک به بافت بدن $(7/4)$ بوده و عمل‌کردی تقریباً مستقل از انرژی پرتو فرودی دارد و به همین دلیل امروزه نیز این بلور با انواع ناخالصی‌ها ساخته می‌شود [۶].

دزیمترهای TLD-100 و GR-200 از جمله نمونه‌های دزیمترهای تجاری هستند که در آن‌ها از LiF به‌عنوان ماده میزبان استفاده شده است و به‌دلیل داشتن اکثر شاخصه‌های دزیمتری به صورت نسبی، امروزه به نحو بسیار گسترده‌ای پرکاربرد می‌باشند. در آماده‌سازی دزیمترهای ترمولومینسانس علاوه بر ماده میزبان، نوع و غلظت ناخالصی‌های اضافه شده و نیز روش ساخت نمونه‌ها بسیار حائز اهمیت می‌باشند [۷].

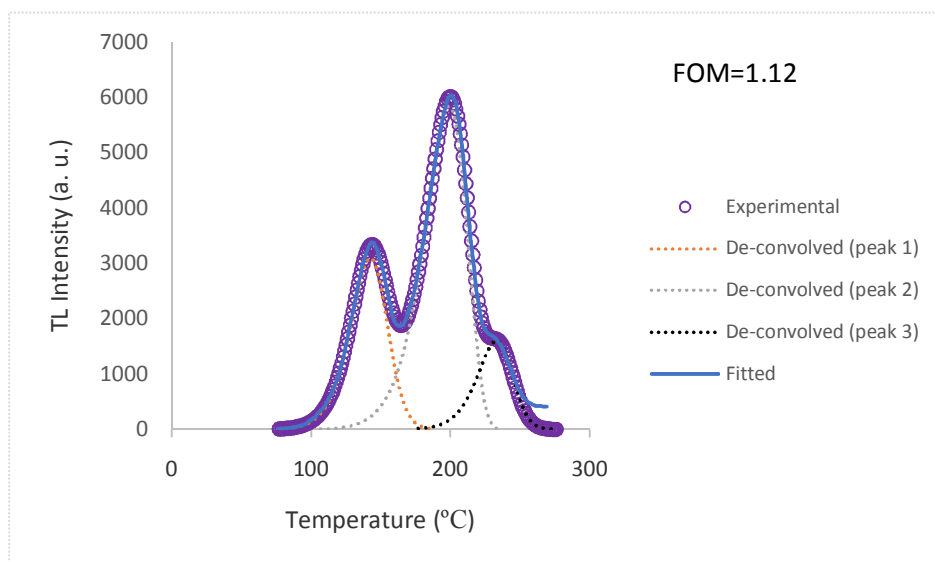
برای مثال در دزیمتر LiF:Mg,Cu,P ، بر اساس نتایج تکنیک ESR^1 ، یون Mg^{2+} نقش اصلی را در ایجاد گیراندازها و نیز در ساختار منحنی درخشش ترمولومینسانس دارا می‌باشد به گونه‌ای که کوچک‌ترین تغییر در میزان این ناخالصی، تأثیر زیادی بر شکل منحنی و حساسیت نمونه خواهد گذاشت. یون $(\text{PO}_4)^{2-}$ نیز می‌تواند هم در ایجاد مراکز گیراندازی و هم مراکز بازترکیب نقش ایفا کند [۹،۸].

روش ساخت دزیمترهای ترمولومینسانس بسته به ساختار فیزیکی مورد نیاز برای نمونه نهایی متفاوت خواهد بود. نمونه‌های پودری با ساختار چند بلوری معمولاً با استفاده از

¹ Electron spin resonance

استفاده شد. به منظور افزودن آلاینده‌ها به ساختار بلوری ماده لیتیم فلوراید از روش ذوب استفاده شد بدین ترتیب که مقادیر مشخصی از نیترات استرانسیم و نیترات سریم به ماده میزبان اضافه شده و در بوتله پلاستیکی قرار داده شدند. سپس بوتله در یک راکتور کوارتز، طراحی شده توسط پژوهشگران گروه هسته‌ای دانشگاه کاشان، قرار داده شده و مجموعه داخل یک کوره در دمای 1050°C به مدت ۳۰ دقیقه قرار گرفت. تا کنون گزارش‌های زیادی مبنی بر اهمیت استفاده از شار نیتروژن در روش ذوب برای ساخت دزیمترهایی چون LiF:Mg,Cu,P منتشر گردیده است [۱۴،۱۳]. از اینرو پیش از شروع فرآیند ذوب تا پیش از خروج نمونه از کوره (در حین سردسازی نمونه ذوب شده)، شار مشخصی از گاز نیتروژن با درصد خلوص بالا اعمال گردید تا از ورود اکسیژن به محیط واکنش که باعث کاهش شدید در حساسیت نمونه می‌شود، جلوگیری شود. در نهایت با پودر نمودن محصول بدست آمده، می‌توان نمونه ای همگن از ماده LiF:Sr,Ce به دست آورد. اندازه دانه‌بندی پودر انتخاب شده برای نمونه‌ها بین ۵۰ تا ۲۰۰ میکرومتر بوده است.

استفاده شد. به منظور افزودن آلاینده‌ها به ساختار بلوری ماده لیتیم فلوراید از روش ذوب استفاده شد بدین ترتیب که مقادیر مشخصی از نیترات استرانسیم و نیترات سریم به ماده میزبان اضافه شده و در بوتله پلاستیکی قرار داده شدند. سپس بوتله در یک راکتور کوارتز، طراحی شده توسط پژوهشگران گروه هسته‌ای دانشگاه کاشان، قرار داده شده و مجموعه داخل یک کوره در دمای 1050°C به مدت ۳۰ دقیقه قرار گرفت. تا کنون گزارش‌های زیادی مبنی بر اهمیت استفاده از شار نیتروژن در روش ذوب برای ساخت دزیمترهایی چون



شکل (۱): منحنی برازش شده ترمولومینسانس نمونه ساخته شده با استفاده از برنامه کامپیوتری که وجود سه قله هم‌پوش را نشان می‌دهد.

۲.۲. آماده‌سازی نمونه جهت پرتودهی

در این تحقیق از چشمه ^{60}Co واقع در پژوهشکده تحقیقات هسته‌ای کرج جهت انجام پرتودهی نمونه‌ها استفاده شد. دز اعمال شده جهت مطالعه خواص ترمولومینسانس دزیمتر ساخته شده 500mGy بوده و نمونه‌ها با استفاده از دستگاه TLD reader مدل Harshaw 4500 در بازه دمایی ۵۰ تا 270°C با نرخ 2°C/s قرائت شدند که نتیجه آن ثبت منحنی-های درخشش ترمولومینسانس (شدت بر حسب دما) بود. مساحت زیر این منحنی‌ها با میزان دز جذبی توسط نمونه‌ها

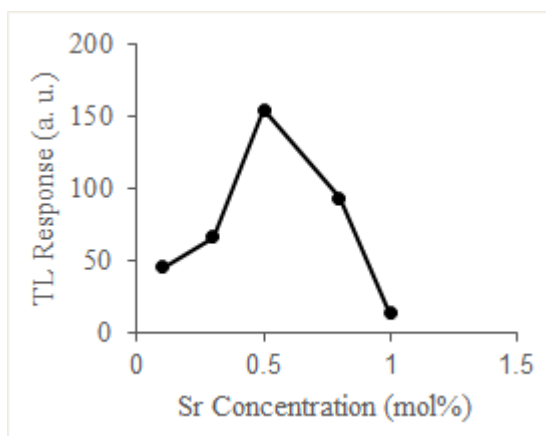
پیش از انجام هر مرحله پرتودهی، لازم است بر روی نمونه یک تابکاری گرمایی^۱ بهینه اعمال نمود تا علاوه بر پایداری ساختار گیراندازها، هر گونه اطلاعات ناشی از پرتوگیری‌های قبلی توسط نمونه زدوده شود. طبق بررسی انجام شده بهترین ترکیب از زمان و دمای گرمادهی در دمای 270°C به مدت ۱۵ دقیقه به دست آمد که نمونه‌ها قبل از هر پرتودهی تحت این رژیم حرارتی می‌گرفتند.

¹ Annealing

۲.۳. غلظت بهینه آلاینده ها

حساسیت مواد ترمولومینسانس به شدت به نوع و غلظت ناخالصی‌های اضافه شده به ماده میزبان بستگی دارد. برای یافتن بهینه غلظت آلاینده‌ها، ابتدا با ثابت نگه داشتن سریم در ۰/۱ مول درصد، مقدار ناخالصی استرانسیم تغییر داده شد تا مقدار بهینه آن مشخص شود. در شکل ۲ پاسخ ترمولومینسانس (مساحت زیر منحنی درخشش) برای مقادیر مختلف استرانسیم، ۰/۱، ۰/۳، ۰/۵، ۰/۸ و ۱ مول درصد آورده شده است.

همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد در مقدار ۰/۵ مول درصد، پاسخ ترمولومینسانس نمونه بیشینه است. در ادامه با ثابت نگه داشتن این مقدار بهینه برای استرانسیم، غلظت‌های مختلفی از سریم به ماده اضافه شده و منحنی‌های مربوطه ثبت شدند. شکل ۳ پاسخ ترمولومینسانس را برای مقادیر ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۵، ۰/۷ و ۱ مول درصد سریم را نشان می‌دهد که در نتیجه آن مقدار ۰/۱ مول درصد را می‌توان برای این ناخالصی، بهینه در نظر گرفت.



شکل (۲): پاسخ دز بر حسب تغییرات غلظت ناخالصی استرانسیم در

مقدار ثابت از ناخالصی سریم.

متناسب است [۱۵]. در تمام مراحل نمونه‌های با جرم یکسان با یکدیگر مقایسه شده‌اند تا خطای ناشی از تأثیرپذیری حساسیت ماده نسبت به جرم حذف گردد.

۳. یافته‌ها و بحث

۱.۳. برازش منحنی و پارامترهای سینتیک

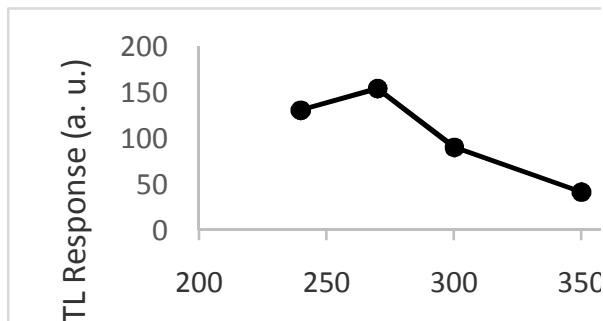
برازش منحنی به جهت تشخیص تعداد قله‌هایی که با هم-پوشانی خود منحنی درخشش را تشکیل داده‌اند و همچنین تعیین پارامترهای سینتیک از جمله مرتبه سینتیک، انرژی فعال-سازی، شدت و دمای مربوط به هر قله، از مطالعات حائز اهمیت در بحث دزیمترهای ترمولومینسانس می‌باشد. بدین منظور، منحنی درخشش دزیمتر پیشنهادی با استفاده از یک برنامه کامپیوتری بر اساس الگوریتم Levenberg-Marquart برازش شد که در آن مدل سینتیک مرتبه عام برای محاسبه پارامترهای مربوط به هر قله استفاده شده است. در نتیجه این بررسی‌ها مشخص شد که منحنی درخشش از هم‌پوشانی سه قله که در دماهای ۱۴۳، ۱۹۹ و ۲۳۳ درجه سانتی‌گراد قرار دارند (شکل ۱) تشکیل می‌گردد. مقدار FOM میزان انطباق منحنی تجربی با منحنی برازش شده را نشان می‌دهد که اگر کمتر از ۲/۵ باشد انطباق قابل قبولی حاصل شده است که در این برازش، میزان آن برابر ۱/۱۲ بدست آمده است. پارامترهای سینتیک حاصل استفاده از مدل سینتیک مرتبه عام در جدول ۱ گردآوری شده است.

جدول (۱): پارامترهای سینتیک محاسبه شده برای هر قله با استفاده از

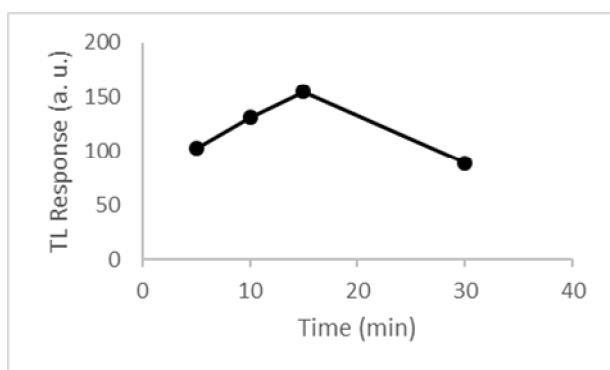
مدل سینتیک مرتبه عام.

قله	دمای قله (°C)	انرژی فعال-سازی (eV)	مرتبه سینتیک	شدت قله (a. u.)
۱	۱۴۳	۱/۳۱	۱/۳۷	۲۲۵
۲	۱۹۹	۱/۲۴	۱/۰۰	۴۲۳
۳	۲۳۳	۱/۹۹	۱/۲۹	۱۱۶

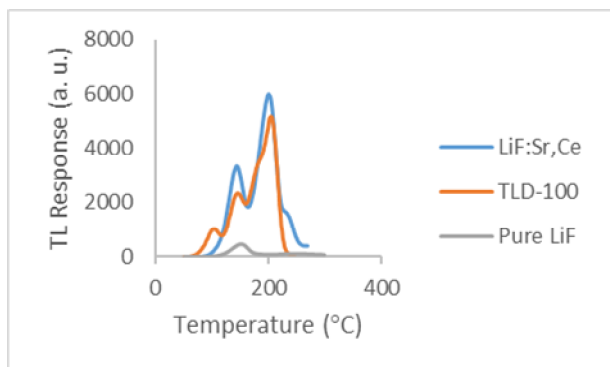
فلوراید خالص شدیداً باعث تقویت حساسیت ماده شده به گونه‌ای که حساسیت آن با حساسیت پودر نمونه تجاری TLD-100، قابل مقایسه می‌شود.



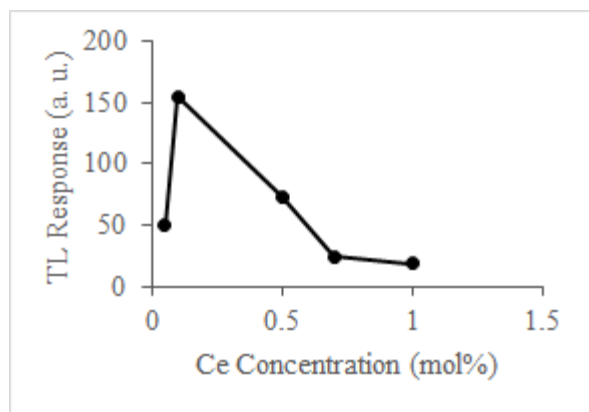
شکل (۴): پاسخ ترمولومینسانس LiF:Sr,Ce مربوط به اعمال دماهای مختلف تابکاری در مدت ۱۵ دقیقه در پرتو دمی گاما به میزان ۰/۵ Gy.



شکل (۵): پاسخ ترمولومینسانس LiF:Sr,Ce مربوط به زمان‌های متفاوت تابکاری در دمای بهینه ۲۷۰°C.



شکل (۶): مقایسه ای بین منحنی‌های درخشش مربوط به دزیتر ساخته شده، TLD-100 و LiF خالص.



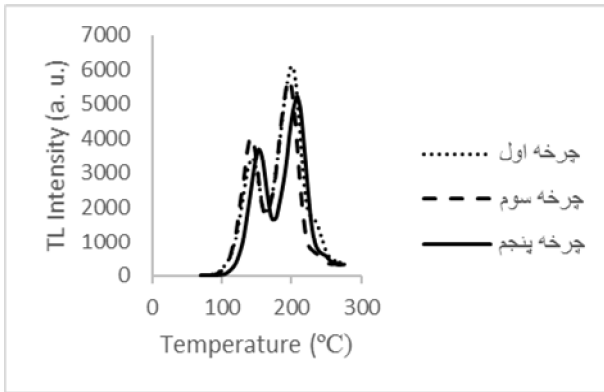
شکل (۳): پاسخ دز بر حسب تغییرات غلظت ناخالصی سریم در مقدار بهینه ناخالصی استرانسیم.

۳.۳. رژیم تابکاری

از آنجایی که یافتن رژیم گرمایی مناسب جهت انجام فرآیند تابکاری پیش از پرتو دمی از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است، لذا در این تحقیق به بررسی دما و مدت زمان اعمال آن بر نمونه پرداخته شده است.

ابتدا نمونه‌ها به صورت مجزا تحت دماهای ۲۴۰، ۲۷۰، ۳۰۰ و ۳۵۰°C در مدت زمان ۱۵ دقیقه قرار گرفتند و مشاهده شد که دمای ۲۷۰°C باعث ایجاد حساسیت ترمولومینسانس بیشتری نسبت به بقیه دماها می‌شود. با ثابت نگه داشتن دما در ۲۷۰°C و تغییر مدت گرمادهی در زمان‌های ۵، ۱۰، ۱۵ و ۳۰ دقیقه، زمان ۱۵ دقیقه به‌عنوان بهینه انتخاب شد. شکل‌های ۴ و ۵ پاسخ‌های منحنی ترمولومینسانس نمونه ساخته شده برای دماها و زمان‌های مختلف در اعمال رژیم تابکاری را نشان می‌دهند.

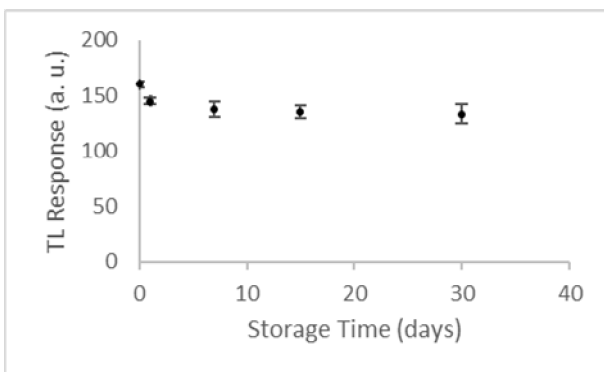
در شکل ۶ مقایسه‌ای بین منحنی‌های درخشش ترمولومینسانس بین LiF خالص، TLD-100 (LiF:Mg,Ti) و LiF:Sr,Ce آورده شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، افزودن ناخالصی‌های مورد نظر به لیتیم



شکل (۸): منحنی های درخشش نمونه LiF:Sr,Ce پس از استفاده در ۱، ۳ و ۵ پرده.

۵.۳. محوشدگی گرمایی

پایداری حساسیت نمونه در دمای اتاق، یکی از مهم ترین ویژگی های یک دزیتر ترمولومینسانس می باشد، به گونه ای که گذشت زمان تأثیر چندانی بر روی پاسخ دز نمونه نداشته باشد. هر گونه کاهش در میزان الکترون های به دام افتاده و باز ترکیب آنها قبل از انجام قرائت، باعث ایجاد خطای قابل توجه در اندازه گیری مقدار دز دریافتی واقعی توسط نمونه خواهد شد. نمونه های پرتو دهی شده ی مشابه LiF:Sr,Ce در دمای اتاق و در محیطی کاملاً تاریک نگهداری شده و در زمان های ۰، ۱، ۷، ۱۵ و ۳۰ روز پس از پرتو دهی قرائت شده و پاسخ آنها ثبت گردید. شکل ۹ پاسخ های ترمولومینسانس را برای زمان های مختلف نگهداری را نشان می دهد. ملاحظه می شود که کاهش پاسخ نسبت به روز اول چندان زیاد نمی باشد.

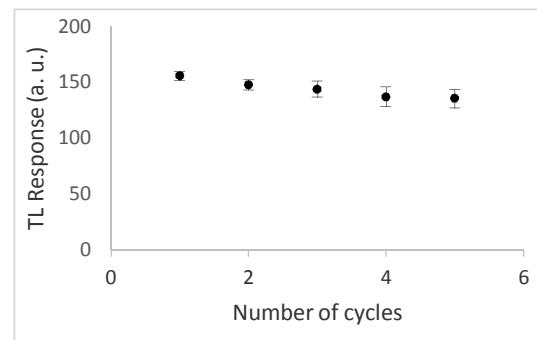


شکل (۹): تغییرات پاسخ ترمولومینسانس نمونه ساخته شده در قرائت در زمان های مختلف پس از پرتو دهی.

۴.۳. تکرار پذیری

یکی از شاخصه های مهم برای یک دزیتر ترمولومینسانس، قابلیت استفاده مجدد بدون تغییر قابل ملاحظه در ساختار منحنی درخشش و حساسیت آن می باشد. برای بررسی تکرار پذیری نمونه ساخته شده، LiF:Sr,Ce با غلظت های بهینه پس از اعمال رژیم تابکاری بهینه تحت پرتو دهی قرار داده شده و سپس با قرائت آنها منحنی های درخشش مربوطه ثبت شدند.

این فرآیند ۵ مرتبه برای هر نمونه انجام شده و پاسخ ترمولومینسانس در انتهای هر مرحله (از گرمادهی، پرتو دهی و قرائت) در یک نمودار ثبت و مقایسه شد (شکل ۷). ملاحظه می شود که حساسیت نمونه تغییر چندانی نکرده که این نشان دهنده وجود خاصیت تکرار پذیری در استفاده مجدد و مناسب بودن رژیم حرارتی تعیین شده در استفاده از این دزیتر می باشد.



شکل (۷): تغییرات پاسخ ترمولومینسانس در استفاده مکرر از دزیتر

LiF:Sr,Ce

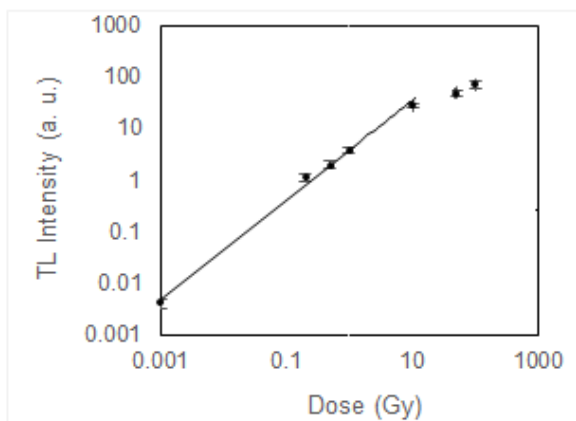
در شکل ۸ نیز برخی منحنی های درخشش بعد از ۱، ۳ و ۵ بار استفاده آورده شده است.

مناسب، تکرارپذیری در قابلیت استفاده مجدد، کاهش ۱۷ درصدی پاسخ پس از گذشت ۳۰ روز از زمان پرتودهی و خطی بودن پاسخ دز در بازه ۱ میلی‌گری تا ۱۰ گری باعث می‌شود تا نمونه معرفی شده LiF:Sr,Ce شاخصه‌های یک دزیمتر ایده‌آل را تا حد قابل قبولی داشته باشد. با توجه به عدد اتمی مؤثر نزدیک به بافت بدن برای ماده میزبان لیتیم فلوراید، این ماده می‌تواند قابلیت استفاده در دزیمتری فردی را داشته باشد. در دزیمتر LiF:Mg,Ti منیزیم نقش اصلی را در ایجاد مراکز گیراندازی ایفا کرده و تیتانیوم در فرآیند بازترکیب می‌تواند مؤثر باشد [۱۶]. در دزیمتر LiF:Mg,Cu,P نیز همچنان منیزیم به عنوان عامل اساسی در ساختار منحنی درخشش و ایجاد مراکز گیراندازی، و فسفر در ایجاد مراکز لومینسانس و در نتیجه افزایش شدت گسیل لومینسانس نقش بازی می‌کنند [۱۷]. از طرف دیگر، با توجه به ساخت ماده TL LiF:Mg,Ce و پیش بینی عملکرد یون منیزیم همانند آنچه برای LiF:Mg,Cu,P و LiF:Mg,Ti انجام گرفت [۱۸]. در ماده پیشنهادی LiF:Sr,Ce ، با جایگزینی Sr به جای Mg از همان گروه شیمیایی ولی با شعاع یونی به میزان حدوداً دو برابر، با توجه به منحنی‌های بدست آمده برای LiF:Ce ، LiF:Sr,Ce و LiF:Sr و مشابهت بسیار زیاد منحنی‌های LiF:Sr,Ce و LiF:Ce مشخص می‌شود این بار ناخالصی Ce نقش اصلی را در ایجاد مراکز گیراندازی و شکل منحنی درخشش ایفا کرده و پیش بینی می‌گردد که یون Sr^{2+} تنها می‌تواند موجب افزایش شدت گسیل لومینسانس با دخالت در فرآیند بازترکیب گردد. رفتار خطی نمونه پیشنهادی همانند نمونه‌های تجاری TLD-100 و GR-200 تقریباً تا ۱ الی ۱۰ گری خطی است، اما بعد از آن رفتاری زیر خطی همچون GR-200 دارد و برخلاف TLD-100 که رفتار فوق خطی آن تا حدود ۲۰۰۰ گری پیش رفته و پس از آن به صورت زیر خطی رفتار می‌نماید [۱۹].

پس از گذشت ۳۰ روز از زمان پرتودهی پاسخ منحنی ۱۷ درصد کاهش می‌یابد. این کاهش پاسخ دزیمتر ساخته شده بیشتر ناشی از وجود قله کم دمای اول در منحنی درخشش آن می‌باشد. این در حالی است که حساسیت قله اصلی تغییر چندانی در گذشت زمان را از خود نشان نمی‌دهد و شدت آن کمتر از ۱۰ درصد پس از ۳۰ روز کاهش می‌یابد.

۶.۳. پاسخ خطی دز

به جهت تعیین ناحیه خطی پاسخ دز، نمونه‌هایی یکسان تحت پرتودهی گاه در دزهای مختلف ۰/۰۱، ۰/۲، ۰/۵، ۱، ۵۰ و ۱۰۰ گری قرار داده شد و پاسخ ترمولومینسانس آن‌ها برای دزهای متفاوت در یک نمودار ثبت گردید. همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، پاسخ در دزهای متفاوت در نمودار log-log رسم شده و نتایج نشان‌دهنده پاسخ خطی در بازه ۰/۰۱ تا ۱۰ گری می‌باشند.



شکل (۱۰): تغییرات پاسخ ترمولومینسانس نمونه ساخته شده در پرتودهی‌های متفاوت.

۴. نتیجه‌گیری

ماده لیتیم فلوراید آلیبده با استرانسیم (۰/۵ مول درصد) و سریم (۰/۱ مول درصد) ساخته شد و رژیم گرمایی 270°C در مدت ۱۵ دقیقه برای تابکاری آن تعیین گردید. حساسیت

۵. مراجع

- [1] M. Zahedifar, E. Sadeghi. Thermoluminescence dosimetry properties of new Cu doped CaF_2 nanoparticles, *Radiation protection dosimetry*, 157 (2013) 303–309.
- [2] N. Salah, N.D. Alharbi, S.S. Habib, S.P. Lochab. Thermoluminescence properties of $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Tb}$ nanoparticles irradiated by gamma rays and 85 MeV C^{6+} ion beam. *J. Lumin.* 167 (2015) 59–64.
- [3] M. Zahedifar, F. Almasifard, E. Sadeghi, S. Harooni, M.K. Biroon. Thermoluminescence dosimetry properties and kinetic analysis of $\text{MgSO}_4:\text{Dy}$ microcrystalline prepared by solid state method. *Radiation Measurements* 103, (2017) 26–32.
- [4] J. Azorin. *Luminescence Dosimetry: Theory and Applications*, Ediciones Tecnico-Cientificas, Mexico, (1990).
- [5] D.R.S. Riberio, D.N. Souza, A.F. Maia, S.L. Baldochi, L.V.E. Caldas. Applicability of pure LiF in dosimetry, *Radiation Measurements*, 43 (2008) 1132–1134.
- [6] E. Sadeghi, M. Zahedifar, M.K. Shoushtari. Synthesis and dosimetry features of novel sensitive thermoluminescent phosphor of LiF doped with Mg and Dy impurities. *Appl. Radiat. Isot.*, 136 (2018) 111–117.
- [7] J.I. Lee, J.L. Kim, Y. Chung, K.S. Chung, H.S. Choe. Developments in the synthesis of $\text{LiF}:\text{Mg,Cu,Na,Si}$ TL material, *Radiation Protection Dosimetry*, 108, No.1, (2004), 79–83.
- [8] K. Tang, H. Cui, Y. Wang, H. Zhu, Q. Fan, Y. Mao. Influence of magnesium concentration on thermal stability in $\text{LiF}:\text{Mg,Cu,P}$, *Radiation Measurements*, 43 (2008) 1187–1190.
- [9] T.K. Gundurao, S.V. Moharil. ESR study of phosphorus-related defects in irradiated $\text{LiF}:\text{Mg,Cu,P}$ and related phosphors, *Radiation Measurements*, 42 (2007) 35–42.
- [10] A. Kelemen, D. Mesterhazy, M. Ignatovchy, V. Holovey. Thermoluminescence characterization of newly Cu-doped lithium tetraborate materials, *Radiation Physics and Chemistry*, 81 (2011) 1533–1535.
- [11] A. Gurav, T. Kodas, T. Pluym, Y. Xiong. Aerosol processing materials, *Aerosol Science and Technology*, 19 (1993) 411–452.
- [12] J. Azorin. Preparation methods of thermoluminescent materials for dosimetric applications: An overview, *Applied Radiation and Isotopes*, 83 (2014) 187–191.
- [13] Z. Zha, S. Wang, J. Zhu, G. Cai. Preparation and characteristics of $\text{LiF}:\text{Mg,Cu,P}$ thermoluminescent material, *Radiation Protection Dosimetry*, 47 No.1/4, (1993) 111–118.
- [14] J.L. Kim, J.I. Lee, A.S. Pradhan, B.H. Kim, J.S. Kim. Further studies on the dosimetric characteristics of $\text{LiF}:\text{Mg,Cu,Si-A}$ high sensitivity thermoluminescence dosimeter (TLD), *Radiation Measurements*, 43 (2008) 446–449.
- [15] M. Zahedifar, E. Sadeghi, M.R. Mozdiafard, E. Habibi. Synthesis, characteristics and thermoluminescent dosimetry features of γ -irradiated Ce doped CaF_2 nanophosphor, *Applied Radiation and Isotopes*, 78 (2013) 125–131.
- [16] G.C. Taylor and E. Lilley. The analysis of thermoluminescence glow peaks in LiF (TLD-100), *Journal of Physics D : Applied Physics*, 11 (1978) 567–581.
- [17] J.I. Lee, J.L. Kim, Y. Chung, K.S. Chung, H.S. Choe. Role of dopants in LiF TLD materials, *Radiation Measurements*, 43 (2008) 303–308.
- [18] M.K. Shoushtari, M. Zahedifar, E. Sadeghi. Preparation and thermoluminescent dosimetry features of high sensitivity $\text{LiF}:\text{Mg,Ce}$ phosphor, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 887 (2018) 128–132.
- [19] G.F. Knoll. *Radiation Detection and Measurement*, 4th edition, John Wiley and Sons, (2010).