

بررسی خواص دزیمتری ترمولومینسانس ذرات $Zn_3(PO_4)_2:Cu$

زهره گلشهری^۱، احسان صادقی^{۱*} و مصطفی زاهدی فر^۲

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

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

*اصفهان، کاشان، دانشگاه کاشان، دانشکده فزیک، کد پستی: ۸۷۳۱۷-۵۳۱۵۳

پست الکترونیکی: sdgh@kashanu.ac.ir

چکیده

در این پژوهش ذرات روی فسفات با ناخالصی مس به روش هم رسوبی سنتز شدند. ساختار ذرات تولید شده توسط آنالیز XRD بررسی شد که طبق نتایج به دست آمده ساختار بلوری موردنظر به درستی تشکیل شده است. همچنین ریخت‌شناسی ذرات ساخته شده توسط آنالیز SEM مورد بررسی قرار گرفت که نشان‌دهنده صفحات چهارگوش با ضخامت کمتر از ۱۰۰ نانومتر بود. منحنی ترمولومینسانس دزیمتر فسفات روی با ناخالصی مس تحت پرتو دهی گاما با استفاده از چشمه ^{60}Co ثبت و خواص دزیمتری ترمولومینسانس این فسفر مورد بررسی قرار گرفت. با استفاده از روش CGCD منحنی درخشش ترمولومینسانس مربوط به دزیمتر ساخته شده برازش شده و پارامترهای سینتیک آن تعیین شدند. طبق نتایج به دست آمده پاسخ دز این نمونه تا دز ۱۰۰۰ گری دارای رفتار خطی است. وجود رابطه خطی بین دزهای ۱۰ تا ۱۰۰۰ گری باعث کاربردهای مختلف این دزیمتر در بخش‌های پرتو دهی صنعتی، پایش و کنترل فرایندهای پرتو دهی صنعتی و همچنین پایش بخش‌هایی از راکتورها که دز بالا دارند و یا حوادث هسته ای که عموماً می‌توانند به نشت پرتو تا دزهای بالا منجر شوند، می‌شود. پارامترهای سینتیک مربوطه منحنی درخشش ترمولومینسانس دزیمتر ساخته شده مورد بررسی قرار گرفت و تکرارپذیری استفاده از آن نیز مطالعه شد.

کلیدواژگان: دزیمتری، ترمولومینسانس، روی فسفات، ناخالصی مس، تابش گاما، پاسخ دز.

۱. مقدمه

ترمولومینسانس (TL) است. ترمولومینسانس یک پدیده لومینسانس است که در اثر گرم کردن یک جامد عایق یا نیمه‌رسانا که از قبل تحت تحریک به واسطه پرتوهای یون‌ساز قرار گرفته است، مشاهده می‌شود. از جمله مهم‌ترین کاربردهای پدیده ترمولومینسانس استفاده در کاربردهای دزیمتری (Dosimetry) و عمرسنجی (Dating) است [۱-۵].

در سال‌های اخیر پرتوهای یون‌ساز به شکل گسترده‌ای در زمینه‌های مختلف علمی و عملی همچون مراکز پزشکی، مراکز هسته‌ای و آزمایشگاه‌های تحقیقاتی استفاده می‌شوند. تخمین صحیح مقدار دز جذب شده ناشی از این پرتوها یکی از دغدغه‌های اصلی استفاده از آن‌ها است. یکی از معروف‌ترین روش‌ها در تعیین دقیق مقدار دز جذب شده روش

دزیمترهای ترمولومینسانس (TL) به عنوان ابزارهای حساس و دقیق برای اندازه گیری تابش های یونیزان، کاربردهای گسترده ای در حوزه های مختلف علمی و صنعتی دارند. این دزیمترها با استفاده از مواد خاصی که قابلیت جذب انرژی تابشی را دارند، پس از گرم شدن، نور ساطع می کنند که شدت آن به مقدار تابش یونیزان دریافتی بستگی دارد به گونه ای که می توان با استفاده از پاسخ به دست آمده تخمینی از میزان دز دریافتی به دست آورد. ساخت دزیمترهای جدید ترمولومینسانس با تغییر در ساختار بلوری، ناخالصی های به کار رفته، روش ساخت و اندازه بلورها به یکی از جذاب ترین حوزه های پژوهشی در سال های اخیر بدل شده است در دهه های گذشته، سنتز نانو و میکرو بلورها با مورفولوژی و معماری قابل کنترل، توجه زیادی را در شیمی مواد به خود جلب کرده است، زیرا مشخص است که خواص مواد با عوامل هندسی آن ها مانند اندازه، ارتباط تنگاتنگی دارد [۶]. استفاده از سورفکتانت ها در فرآیند سنتز، راهی کارآمد و امیدوارکننده برای کنترل شکل و مورفولوژی مواد است. سورفکتانت نه تنها محل مطلوبی را برای رشد مجموعه های ذرات فراهم می کند، بلکه بر چگونگی ریخت شناسی و جدایی ذرات ساخته شده تأثیر می گذارد. اخیراً از مواد زیادی به عنوان سورفکتانت ها استفاده می شود که شامل موادی مانند ستیل تری متیل آمونیوم بروماید (CTAB) [۷] پلی وینیل پیرولیدون (PVP) [۸] و اسید اولئیک هستند [۹، ۱۰]. نیمه هادی مرکب VI-II مثل زینک سولفات، زینک فسفات و یا سلنید روی، چون از ترکیب چند یون مختلف ساخته می شوند، معمولاً ویژگی های الکترونیکی و نوری نانوذرات بهتری دارند و باتوجه به کاربردهای وسیع آن ها به طور گسترده مورد بررسی قرار گرفته است [۱۱، ۱۲]. کاهش اندازه ذرات به طور قابل توجهی خواص الکترونیکی و نوری ذرات را به دلیل محصور شدن کوانتومی سه بعدی الکترون ها و حفره ها هنگامی که اندازه ذره به شعاع بور اکسایتون نزدیک می شود، تغییر می دهد [۱۳]. تلاش های زیادی

برای کنترل ساختارهای الکترونیکی نانوذرات با تغییر اندازه، شکل و ترکیب آن ها صورت گرفته است. فسفات های آلاییده شده با یون های خاکی کمیاب دارای ویژگی های درخشان منحصربه فردی هستند که ناشی از پایداری و بازده کوانتومی انتشار بالا است. یکی از مواد امیدوارکننده برای ساخت دزیمترهای ترمولومینسانس، فسفات ها هستند که به دلیل ساختار بلوری مناسب و ویژگی های شیمیایی خاص خود، توانایی جذب و ذخیره انرژی تابشی را دارد. ساخت و مشخصه یابی نمونه $Zn_2(po_4)_2:Mn$ اولین بار توسط گروه Su گزارش شد [۱۴]. در مطالعات دیگری فسفر $Zn_2(po_4)_2$ با یون های آلاییده مختلف به طور کامل مورد بررسی قرار گرفته است [۱۵-۱۸]. در این تحقیق، ذرات روی فسفات با ناخالصی مس ساخته شدند و خواص ترمولومینسانس آن ها مانند منحنی درخشش، پارامترهای سینتیک و ناحیه خطی پاسخ دز در پرتو دهی گاما مورد بررسی قرار گرفته اند.

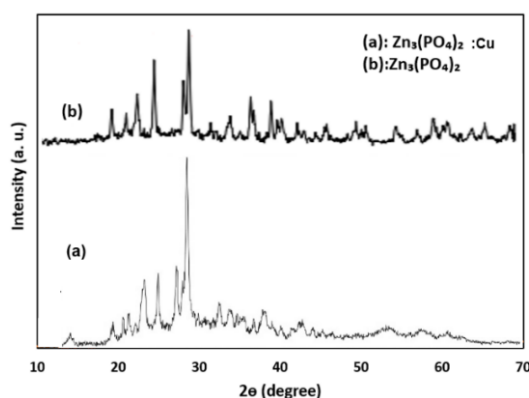
۲. مراحل آزمایش

در این پژوهش ذرات روی فسفات با ناخالصی مس به روش هم رسوبی ساخته شدند [۱۹، ۲۰]. برای ساخت هم رسوبی نانوذرات $Zn_2(po_4)_2$ از پیش ماده های فسفات روی، دی آمونیوم فسفات، نیترات مس، سدیم هیدروکساید، بریج-۳۵، استون تهیه شده از شرکت مرک و آب یون زدایی شده استفاده شد. ابتدا پیش ماده فسفات روی را در آب دیونیزه شده حل کرده، سپس دی آمونیوم فسفات در یک ظرف جداگانه در آب دیونیزه حل شدند. همچنین برای اصلاح سطح و کنترل مورفولوژی ذرات، از محلول بریج-۳۵ در استون و سدیم هیدروکساید در آب دیونیزه استفاده شد که این کار با استفاده از یک همزن مغناطیسی به مدت پنج دقیقه تا دستیابی به یک محلول شفاف انجام گرفت. محلول فسفات روی را به عنوان پایه در نظر گرفته و سپس محلول بریج به آن اضافه شد.

۳. نتایج و بحث‌ها

برای بررسی صحت تشکیل ساختار بلوری نمونه روی فسفات از الگوی پراش اشعه ایکس استفاده شد. ساختار نمونه تولید شده به وسیله پراش پرتو ایکس با استفاده از دستگاه Philips x'pert pro MPP و با استفاده از طیف‌نگاری Cu فیلتر شده با نیکل اندازه‌گیری شد.

شکل ۲، الگوی XRD نانوذرات فسفات روی ساخته شده به روش هم رسوبی را نشان می‌دهد. طبق نتیجه به دست آمده الگوی XRD به دست آمده مطابق با الگوی مرجع ۰۰-۱۳۹۰-۰۲۹ است که نشان دهنده تشکیل بلورهای $Zn_2(po_4)_2$ با ساختار Monoclinic است (شکل B۱).

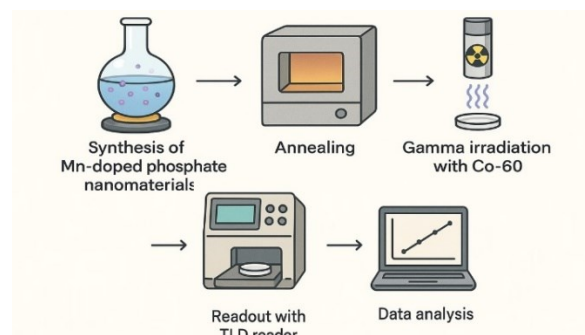


شکل (۲): الگوی پراش اشعه ایکس نمونه‌های ساخته شده روی فسفات با ناخالصی مس (a) و الگوپراش اشعه ایکس مربوط به نمونه مرجع بلورهای $Zn_2(po_4)_2$ با ساختار Monoclinic (b).

همچنین وجود اختلاف اندک بین نمونه مرجع با نمونه ساخته شده برای وجود ناخالصی مس به جای ساختار اصلی ماده است. علاوه بر آن برای مشخص شدن اندازه ذرات و مورفولوژی ساختار از آنالیز SEM استفاده شد که همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، ساختار ذرات به صورت نانو صفحاتی با ابعاد تقریبی ۲۰۰ در ۵۰۰ با ضخامت کمتر از ۱۰۰ نانومتر تشکیل شده‌اند. منحنی ترمولومینسانس هر دزیمتر از اصلی ترین داده‌های مربوط به آن دزیمتر است که بررسی و

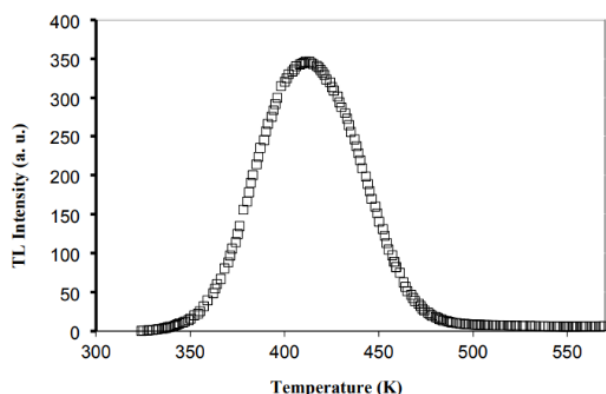
ناخالصی نیترات مس برای ساخت نمونه $Zn_2(po_4)_2:Cu(0/1 \text{ mol}\%)$ نیز در این مرحله به مخلوط قبلی افزوده شد. محلول دی آمونیوم فسفات نیز در حالی که مخلوط به دست آمده قبلی بر روی همزن مغناطیسی قرار داشت به آن‌ها اضافه شد. در نهایت محلول سدیم هیدروکساید به آرامی اضافه شد و اختلاط به مدت ۵ دقیقه ادامه یافت. در این مرحله رسوب نمونه مورد نظر تشکیل شد که با سانتریفیوژ کردن و چند بار شستشو با آب از محلول کاملاً جدا شد. سپس در آون به مدت ۵ ساعت در دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد خشک و در دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱ ساعت کلسینه شد.

جهت بررسی خواص دزیمتری ترمولومینسانس نمونه، فرایند گرمادهی در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد در یک کوره با کنترل دمایی ± 1 درجه سانتی‌گراد به مدت ۳۰ دقیقه انجام شد و پس از آن نمونه‌ها به سرعت تا دمای اتاق سرد شدند. پرتو دهی نمونه‌ها با استفاده از چشمه ^{60}Co انجام شد و قرائت آن‌ها توسط دستگاه قرائت‌گر دزیمتری ترمولومینسانس Harshaw TLD reader مدل ۴۵۰۰ انجام گرفت. جرم نمونه در طی تمام مراحل استفاده از یک ترازو با دقت ۰/۰۰۰۱ گرم اندازه‌گیری شد و برای همه دزها جرم یکسانی مورد آزمایش قرار گرفت. شکل ۱ خلاصه‌ای از فرایند انجام شده را نشان می‌دهد.



شکل (۱): خلاصه ای از فرایند انجام شده در ساخت دزیمتر

$Zn_2(po_4)_2:Cu$ و مطالعه آن.

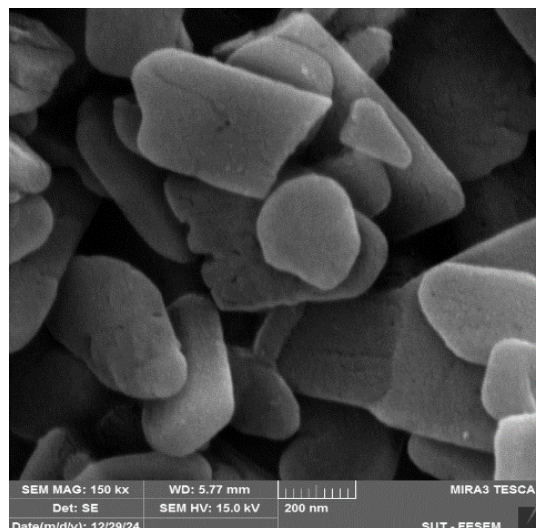


شکل (۴): منحنی درخشش ترمولومینسانس دزیمتر ساخته شده روی

فسفات با ناخالصی مس تحت پرتودهی ۵۰۰ گری دز گاما.

همان گونه که مشاهده می شود منحنی درخشش ترمولومینسانس روی فسفات با ناخالصی مس شامل یک تک قله اصلی است که نمودار ساده ای به شمار می آید و این می تواند در استفاده از این منحنی در مقاصد مختلف دزیمتری سودمند واقع شود. پارامترهای سینتیک از جمله مهمترین داده های قابل دستیابی از منحنی درخشش ترمولومینسانس هر دزیمتر هستند که می توانند برخی از مشخصات مربوط به گیراندازهای موجود در ساختار بلوری آن دزیمتر را مشخص کنند. در گام بعد سعی در تعیین پارامترهای سینتیک مربوط به منحنی درخشش نمونه ساخته شده شد. مدل های توصیف کننده پدیده ترمولومینسانس می توانند برای بررسی منحنی های ترمولومینسانس استفاده شوند. در واقع میزان انطباق پیک های تجربی و نظری را می توان با استفاده از یک برنامه کامپیوتری به دست آورد که بر الگوریتم Marquart-Levenberg منطبق است. این برنامه بر اساس تکرار استوار است که از پارامترهای هندسی قله ترمولومینسانس تجربی مانند I_m و T_m استفاده می کند و با انطباق آن با نتایج تئوری منحنی تجربی را برازش می کند. در این کار از مدل سینتیک مرتبه عام استفاده شد که معادله آن برای تعیین پارامترهای سینتیک که تابعی از شدت بیشینه و دمای بیشینه است به صورت زیر است [۲۱]:

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



شکل (۳): آنالیز SEM مربوط به نمونه $Zn_2(po_4)_3:Cu$

مطالعه آن برای استفاده از آن دزیمتر امری ضروری است. به منظور ثبت منحنی ترمولومینسانس یک دزیمتر ابتدا باید از یک رژیم گرمایی به منظور پاک سازی تله های دزیمتری آن که به هر دلیلی قبل از پرتودهی اشغال شده اند انجام گیرد. دما و زمان قرارگیری در آن دما پارامترهای مهم یک رژیم حرارتی هستند به منظور تعیین بهترین ترکیب دما و زمان نگهداری، برای دزیمتر ساخته شده روی فسفات با ناخالصی مس، دماهای ۳۵۰، ۴۰۰ و ۴۵۰ درجه سانتی گراد و زمان های ماندگاری ۱۰، ۳۰ و ۶۰ دقیقه مورد آزمایش قرار گرفتند. پس از آن نمونه های گرمادهی شده تحت تابش یکسان از پرتوگاما ^{60}Co قرار گرفتند و بهترین رژیم حرارتی که به بیشترین پاسخ ترمولومینسانس و کمترین پاسخ زمینه منجر شود به عنوان بهینه انتخاب شدند. بهترین ترکیب دما و زمان، ۴۰۰ درجه سانتیگراد به مدت ۳۰ دقیقه تعیین شد. برای پرتودهی از سامانه گاماسل واقع در سازمان انرژی اتمی ایران استفاده شد. سپس برای ثبت منحنی ترمولومینسانس نمونه پرتودهی شده در داخل دستگاه قرائت گر قرار گرفت و منحنی آن در بازه دمایی ۵۰ تا ۳۵۰ درجه سانتی گراد و با آهنگ دمایی ۲ درجه سانتی گراد بر ثانیه ثبت شد. شکل ۴ نمونه ای از نتایج به دست آمده از این آزمایش را نشان می دهد.

جدول (۱): نتایج مربوط به پارامترهای سینتیک منحنی درخشش دزیمتر روی فسفات با ناخالصی مس.

peak	b	E (eV)	T _m (K)	I _m (a. u.)
۱	۲/۰۰	۰/۹۷	۳۹۸/۱	۲۰۸/۵
۲	۱/۵۲	۰/۸۷	۴۲۶/۱	۲۲۵/۵

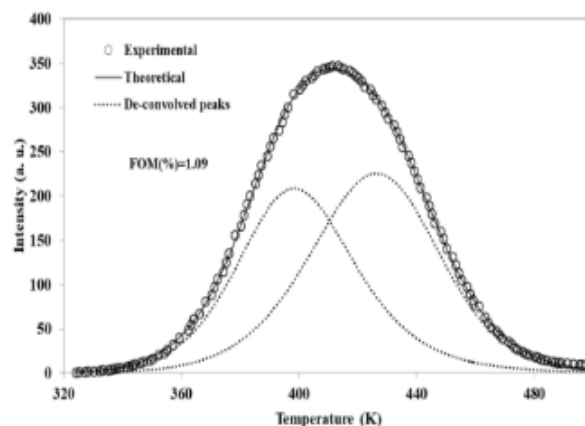
۱.۳. پاسخ دز

برخوردار از یک ناحیه پاسخ دز خطی برای دزیمترها از جمله شرایط اصلی یک دزیمتر ترمولومینسانس ایده آل است. در حقیقت پاسخ دز ترمولومینسانس نشان دهنده محدوده استفاده از دزیمتر است که در آن محدوده دز جذب شده با پاسخ ترمولومینسانس دزیمتر به صورت خطی در ارتباط است. از طرفی مدل‌های سینتیکی ترمولومینسانس برای ناحیه دور از اشباع نوشته شده‌اند که در همین ناحیه خطی پاسخ دز قرار دارد. در ادامه پاسخ ترمولومینسانس دزیمتر ساخته شده در دزهای مختلف گاما تا ۱۰۰۰ گری مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور ذرات روی فسفات با ناخالصی مس ساخته شده تحت پرتودهی در دزهای مختلف قرار گرفتند. نمونه‌ها پس از پرتودهی، با استفاده از دستگاه قرائت گر ترمولومینسانس قرائت شده و پاسخ دز ترمولومینسانس آن‌ها بر حسب دز جذب شده آن‌ها ثبت شد. نمودار پاسخ دز به دست آمده در شکل ۶ قابل مشاهده است. مقادیر انحراف مشخص شده در این شکل با توجه به مقدار استاندارد برای قرائت ۵ نمونه به دست آمد. منشأ این خطا به دقت در مراحل مختلف تاب‌کاری، پرتودهی، جرم و حتی قرائت نمونه‌ها مربوط است. دقت کوره، ترازو، سیستم پرتودهی و دستگاه قرائت گر می‌تواند ایجاد عدم قطعیت کند. هر چند خطای انسانی نیز در این مورد کاملاً دخیل است. بیشترین میزان عدم قطعیت ۹ درصد بوده است. همان‌طور که از شکل بالا قابل مشاهده است، پاسخ ترمولومینسانس در این بازه تغییر میزان دز خطی است.

که در آن (b پارامتر سینتیک) بین ۱ و ۲ است، E انرژی فعال‌سازی، T دما بر حسب کلوین، T_m دمای بیشینه و k ثابت بولتزمن است. برای تعیین میزان انطباق منحنی ترمولومینسانس تئوری و تجربی از رابطه FOM به صورت زیر استفاده شد:

$$FOM = \frac{\sum |y_{exp} - y_{fit}|}{\sum y_{fit}} \times 100 \quad (3)$$

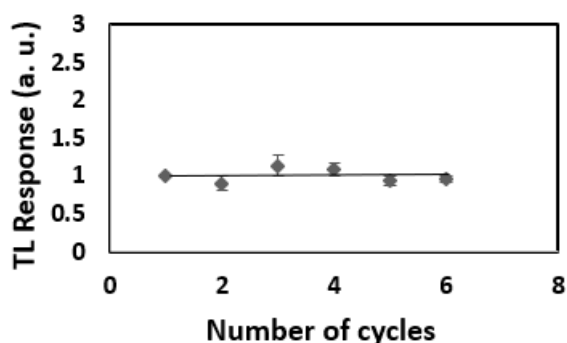
که در آن y_i مربوط به مقادیر اصلی یا داده‌های تجربی است و f_i بهترین مقداری است که از طریق این انطباق به دست می‌آید. مقادیر کمتر از ۲/۵ درصد برای FOM مقداری قابل قبول برای اطمینان از میزان انطباق نتایج تئوری و تجربی است. شکل ۵، منحنی ترمولومینسانس برازش شده نمونه ساخته شده روی فسفات با ناخالصی مس را نشان می‌دهد. مقدار FOM به دست آمده ۱/۰۹ است که نشان دهنده انطباق مناسب داده‌های تجربی با نمودار تئوری به دست آمده است. طبق نتایج به دست آمده منحنی درخشش دزیمتر ساخته شده از ۲ قله واقع شده در دماهای ۳۹۸ و ۴۲۶ کلوین تشکیل شده است.



شکل (۵): منحنی درخشش ترمولومینسانس برازش شده دزیمتر روی فسفات با ناخالصی مس (برازش با استفاده از مدل مرتبه عام انجام گرفت).

همچنین جدول ۱ نتایج مربوط به برازش انجام شده را نشان می‌دهد [۲۲]. با توجه به جدول ۱ مشاهده می‌شود که قله اول یک قله با مرتبه سینتیک ۲ است و قله دوم دارای مرتبه سینتیک ۱/۵۲ است.

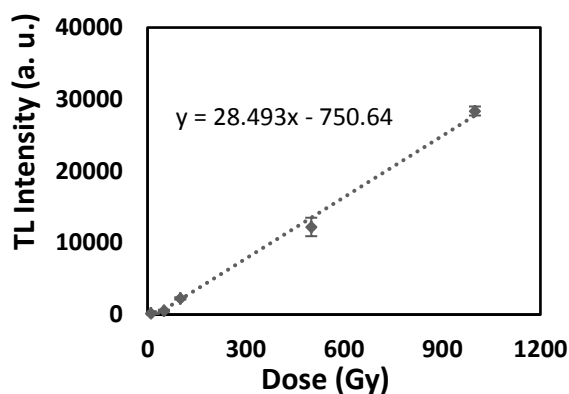
باقی ماند و نشان دهنده این است که دزیمر ساخته شده قابلیت استفاده مجدد را دارد.



شکل (۷): نمودار تکرارپذیری دزیمر ساخته شده در استفاده مکرر در ۶ مرتبه اعمال فرایندهای گرمادهی، پرتودهی و قرائت.

۴. نتیجه گیری

دزیمر روی فسفات با ناخالصی مس با موفقیت ساخته شد و نتایج به دست آمده از آنالیز XRD صحت روش و مواد به کار رفته در رسیدن به این ساختار بلوری را مشخص کرد. علاوه بر آن آنالیز SEM صفحاتی با ضخامت کمتر از ۱۰۰ نانومتر را نشان داد که نشان از تشکیل نانو صفحات $Zn_2(pO_4)_2 \cdot Cu$ است. منحنی درخشش ترمولومینسانس نمونه ساخته شده تحت پرتودهی گاما ثبت و مطالعه شد. طبق نتایج به دست آمده این منحنی از یک قله اصلی تشکیل شده است که متشکل از دو قله همپوش که در دماهای ۳۹۸ و ۴۲۶ کلوین واقع شده اند، است. پارامترهای سینتیک مربوط به این دو قله همپوش با استفاده از روش برازش منحنی طبق مدل سینتیک مرتبه عام تعیین شدند. ناحیه بسیار وسیع خطی پاسخ ترمولومینسانس نمونه ساخته شده، این دزیمر را به عنوان یک کاندید مناسب جهت استفاده در دزیمری در سطح دزهای بسیار بالاتر از حد پرتودهی پزشکی تشخیصی و یا پرتوگیری معمول انسان است، معرفی می کند. همچنین این فسفر طی شش چرخه بازپخت، پرتودهی و قرائت حساسیت خود را حفظ کرده و این حاکی از آن است که دزیمر ساخته شده قابلیت استفاده مجدد را نیز دارد.



شکل (۶): پاسخ ترمولومینسانس دزیمر ساخته شده روی فسفات با ناخالصی مس در دزهای مختلف گاما.

برخورداری از یک ناحیه خطی پاسخ دز تا ۱۰۰۰ گری از جمله خصوصیات مثبت برای دزیمر ساخته شده است. برای درک بهتر اهمیت این مورد باید توجه شود که پاسخ خطی دز اکثر دزیمرهای تجاری در ناحیه کمتر از ۱۰۰ و حتی ۱۰ گری قرار دارند.

۳.۲. تکرارپذیری استفاده از دزیمر ساخته شده

یکی دیگر از پارامترهایی که یک دزیمر را به دزیمر ایده آل تبدیل می کند آن است که پس از هر بار چرخه بازپخت، پرتودهی و قرائت، پاسخ ترمولومینسانس ثابت بماند و دزیمر حساسیت خود را از دست ندهد. بدین ترتیب برای تست تکرارپذیری، فرایندهای بازپخت، پرتودهی و قرائت طی شش مرتبه پی در پی بر دزیمر اعمال شد و در هر مرتبه منحنی درخشش به دست آمده ثبت شد. با رسم پاسخ ترمولومینسانس دزیمر ساخته شده بر حسب دفعات استفاده، نمودار نشان داده شده در شکل ۷ که به صورت نرمال شده به دست آمد. همان طور که به وضوح مشخص است پاسخ دزیمر در هر بار تکرار تغییر چندانی نداشته (بیشترین اختلاف نسبت به پاسخ ترمولومینسانس اولین قرائت ۱۰ درصد است) و به عبارت دیگر حساسیت دزیمر در تکرار گرمادهی، پرتودهی و قرائت ثابت

۵. مراجع

1. F. Abbasi, E. Sadeghi, M. Zahedifar. Dating two ancient samples by thermoluminescence method and the effect of the plateau region on the age of the samples. *J. Radiat. Safety Measurement* 11 (3) (2022) 127–132.
 2. F. Almasifard, E. Sadeghi, M. Zahedifar, S. Harooni. Synthesis of MgSO₄ nanoparticle doped with Cu by hydrothermal method and investigation of its thermoluminescence properties in gamma irradiation. *J. Radiat. Safety Measurement* 6 (2) (2017) 7–12.
 3. M. Farahmandjou, N. Golabiyani. Solution combustion preparation of nano-Al₂O₃: synthesis and characterization. *J. Mater. Sci: Mater. Elect.* 26 (2015) 300–305.
 4. N. Salah, Z. H. Khan, S. S. Habib. Nanoparticles of Al₂O₃:Cr as a sensitive thermoluminescent material for high exposures of gamma rays irradiations. *Nucl. Instrum. Met. Phys. Res. Sec. B* 269 (4) (2011) 401–404.
 5. M. K. Shoushtari, M. Zahedifar, E. Sadeghi. Preparation and thermoluminescent dosimetry features of high sensitivity LiF:Mg,Ce phosphor. *Nucl. Instrum. Met. Phys. Res. Sec. A* 887 (2018) 128–132.
 6. A. P. Alivisatos. Semiconductor clusters, nanocrystals, and quantum dots. *Science* 271 (5251) (1996) 933–937.
 7. Y. J. Song, R. M. Garcia, R. M. Dorin, H. R. Wang, Y. Qiu, E. N. Coker, W. A. Steen, J. E. Miller, J. A. Shelnutt. Synthesis of platinum nanowire networks using a soft template. *Nano Letters* 7 (12) (2007) 3650–3655.
 8. Z. L. Xiu, M. K. Lü, G. J. Zhou, F. Gu, H. P. Zhang, D. Xu, D. Yuan. A facile soft template synthesis and characterization of PbHAsO₄
 9. J. X. Jiang, J. Liu, C. Liu, G. W. Zhang, X. H. Gong, J. N. Liu. Roles of oleic acid during micropore dispersing preparation of nano-calcium carbonate particles. *Appl. Surf. Sci.* 257 (16) (2011) 7047–7053.
 10. N. Niu, P. P. Yang, W. X. Wang, F. He, S. L. Gai, D. Wang, J. Lin. Solvothermal synthesis of SrMoO₄:Ln (Ln = Eu³⁺, Tb³⁺, Dy³⁺) nanoparticles and its photoluminescence properties at room temperature. *Mater. Res. Bull.* 46 (3) (2011) 333–339.
 11. A. L. Smith. Luminescence of three forms of zinc orthophosphate:Mn. *J. Elect. Soc.* 98 (9) (1951) 363–368.
 12. J. Wang, S. B. Wang, Q. Su. Synthesis, photoluminescence and thermostimulated-luminescence properties of novel red long-lasting phosphorescent materials β-Zn₃(PO₄)₂:Mn²⁺,M³⁺ (M = Al, Ga). *J. Mater. Chem.* 14 (16) (2004) 2569–2574.
 13. C. Maurel, T. Cardinal, M. Bellec, L. Canioni, B. Bousquet, M. Treguer, J. J. Videau, J. Choi, M. Richardson. Luminescence properties of silver zinc phosphate glasses following different irradiations. *J. Luminescence* 129 (12) (2009) 1514–1518.
 14. J. Wang, Q. Su, S. B. Wang. Photoluminescence properties of manganese activated zinc phosphate phosphors. *Mater. Res. Bull.* 40 (2005) 590–598.
 15. J. F. Gu, B. Yan. Controlled synthesis and photoluminescence of Zn₃(PO₄)₂:Eu³⁺ nanocrystal via hydrothermal process. *J. Optoelectronics Adva. Mater.* 10 (2) (2008) 405–409.
 16. W. Y. Shen, J. Lin, M. Yu, X. M. Han. Citrate-gel synthesis and luminescent properties of α-Zn₃(PO₄)₂ doped with Eu³⁺. *J. Rare Earths* 22 (1) (2004) 87–90.
 17. C. G. Ma, S. Jiang, X. J. Zhou. Energy transfer from Ce³⁺ to Tb³⁺ and Eu³⁺ in zinc phosphate glasses. *J. Rare Earths* 28 (1) (2010) 40–42.
 18. Y. Y. Liu, Z. S. Zou, X. L. Liang, S. F. Wang, Z. W. Xing, G. R. Chen. Energy transfer and photoluminescence of zinc phosphate glasses co-doped with Tb³⁺ and Mn²⁺. *J. Amer. Ceramic Soc.* 93 (7) (2010) 1891–1893.
 19. B. Grzmil, B. Kic and K. Lubkowski. Studies on obtaining of zinc phosphate nanomaterials. *Rev. Adv. Mater. Sci.* 14 (2007) 46–48.
۲۰. ا. حبیبی. اتصال نانوذرات پلاسمونیک طلا و نقره به کلروفیلین مس سدیم و ساخت نانوساختار Zn₃(PO₄)₂ خالص و آلییده شده با مس و منگنز به عنوان نانوساختارهای کارآمد برای کاربرد در درمان فتودینامیک. دانشگاه کاشان، ۱۴۰۳.

21. 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.
22. H. G. Balian, N. W. Eddy. Figure of merit (FOM), an improved criterion over the normalized chi-squared test for assessing goodness-of-fit of gamma-ray spectra peaks. *Nucl. Instrum. Methods* 145 (1977) 389–395.