

## ساخت هیدروکسی اپتایت به روش حالت جامد و بررسی اثر عملیات حرارتی و ناخالصی بر پاسخ ترمولومینسانس آن در دزیمتری پرتوهای گاما

مهسا اربی<sup>۱</sup>، فرهود ضیائی<sup>۲</sup>، پریسا تقی پورنیار<sup>۳</sup> و حمیده دانشور<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup>گروه مهندسی هسته‌ای، دانشگاه آزاد علوم و تحقیقات تهران، تهران، ایران.

<sup>۲</sup>پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، تهران، ایران.

<sup>۳</sup>گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

\*تهران، سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده کاربرد پرتوها، کدپستی: ۱۱۳۶۵-۳۴۸۶

پست الکترونیکی: hdaneshvar@aeoi.org.ir

### چکیده

در کار پژوهشی حاضر هیدروکسی اپتایت به روش حالت جامد ساخته شد و اثر عملیات حرارتی بر پاسخ ترمولومینسانس آن با هدف دزیمتری پرتوهای گاما مورد بررسی قرار گرفت. ابتدا نمونه‌های هیدروکسی اپتایت به صورت خالص ساخته شدند. سپس نمونه‌های هیدروکسی اپتایت به روش مشابه با ناخالصی‌های تکی Ce و La با غلظت‌های ۱، ۲ و ۵ درصد مولی آلائیده و مورد مطالعه قرار گرفتند. به منظور شناسایی و بررسی تغییرات اعمال شده در ساختار ماده و در نهایت اثر آن بر پاسخ دزیمتری از دستگاه پراش پرتو ایکس استفاده شد. نتایج کار از جنبه‌های مختلف دزیمتری از جمله منحنی تغییرات درخشندگی، منحنی دز-پاسخ و محوشدگی مورد بررسی قرار گرفت. یافته‌ها نشان داد که در روش حالت جامد، ساخت در دمای بالا برای اهداف دزیمتری مناسب‌تر است.

**کلیدواژگان:** هیدروکسی اپتایت، دزیمتری پرتو گاما، ترمولومینسانس، روش حالت جامد.

### ۱. مقدمه

۷۰-۷۵ درصد استخوان دندان و ۷۰-۶۰ درصد استخوان‌های بدن را دربرگرفته است و هم‌چنین شرایط لازم برای مورد استفاده قرار گرفتن به عنوان دزیمتر ترمولومینسانس از جمله حساسیت بالا، قابلیت تکرارپذیری، پایداری بالا در مدت زمان طولانی و خطی بودن پاسخ در محدوده وسیعی از دز را داراست [۱، ۲]. چند نمونه از کاربردهای دیگر این ماده

پدیده ترمولومینسانس در مواد بسیاری دیده می‌شود ولی تنها برخی از این مواد می‌توانند برای دزیمتری پرتوها استفاده گردند. بلورهای کلسیم فسفات مواد مناسبی برای کاربردهای دزیمتری ترمولومینسانس هستند. هیدروکسی اپتایت<sup>۱</sup> (HAP) با رابطه شیمیایی  $Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$  از مهم‌ترین ترکیبات کلسیم فسفات است که تقریباً ۹۷-۹۵ درصد مینای دندان،

<sup>۱</sup> Hydroxyapatite

لانتانیدهای سریم و لانتانیوم در دمای بهینه و بررسی پاسخ دزیتمتری این نمونه‌هاست.

## ۲. مواد و روش‌ها

### ۱.۲. آماده‌سازی نمونه‌ها

در تهیه ماده هیدروکسی‌اپتایت به روش حالت جامد، از مواد کلسیم‌نیترات ( $(\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O})$ )، دی‌آمونیم‌فسفات ( $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ ) و سدیم‌بی‌کربنات ( $\text{NaHCO}_3$ ) استفاده شد. به دلیل این که کنترل استوکیومتری در روش حالت جامد بسیار دشوار است، برای داشتن وزن دقیق، وزن‌کشی توسط ترازوی دقیقی با دقت چهار رقم اعشار انجام شد. ابتدا کلسیم‌نیترات و دی‌آمونیم‌فسفات به مدت ۲۰ دقیقه در هاون آسیاب شدند تا به خوبی با هم مخلوط شوند. سپس سدیم‌بی‌کربنات به آن اضافه شد و مخلوط کردن ادامه یافت تا زمانی که مواد کاملاً با هم واکنش داده و مایع سفیدرنگی به شکل کف ایجاد شد. مواد مخلوط شده به مدت ۲۴ ساعت در دمای محیط قرار گرفت و مخلوط دوباره به حالت جامد درآمد. به منظور حذف محصولات جانبی تولید شده، شستشو با دستگاه سانتریفیوژ موجود در آزمایشگاه دزیتمتری مرکز تابش گاما، به ترتیب دو بار با اتانول، دو بار با آب یون‌زدایی شده و دوبار با آب مقطر با  $\text{rpm}=3000$  به مدت ۱۵ دقیقه انجام شد. مواد در خشک‌کن<sup>۱</sup> به مدت زمان ۶ ساعت در دمای  $80^\circ\text{C}$  قرار گرفت تا به طور کامل خشک شود. حرارت‌دهی در دماهای  $400^\circ\text{C}$ ،  $500^\circ\text{C}$ ،  $600^\circ\text{C}$ ،  $700^\circ\text{C}$ ،  $800^\circ\text{C}$  و  $900^\circ\text{C}$  هر کدام به مدت ۳ ساعت در کوره انجام گرفت. در ساخت نمونه‌های هیدروکسی‌اپتایت آلاییده با ناخالصی در کنار کلسیم‌نیترات، از نیترات لانتانیدهای سریم  $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  و لانتانیوم  $\text{La}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  نیز استفاده شد. مراحل و شرایط ساخت هیدروکسی‌اپتایت آلاییده

عبارت‌اند از: استفاده از آن به عنوان کاشتنی و ایمپلنت‌های جایگزین بافت سخت، استفاده در ساخت پروتزها برای جبران انواع نقص‌های ساختاری، استفاده از آن به عنوان جاذب به دلیل جذب بالا و نیز شناساگر ترکیبات و فلزات سمی موجود در آب [۳]. در این میان انواع مختلفی از مواد برای دزیتمتری مورد استفاده قرار می‌گیرند که از جمله آن می‌توان به  $\text{LiF: Mg, Ti}$  (TLD-100)،  $\text{CaF}_2$ ،  $\text{LiF: Mg, Cu, P}$  (GR-200)،  $\text{MgB}_4\text{O}_7$ : Dy،  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ،  $\text{CaSO}_4$ : Tm،  $\text{CaSO}_4$ : Dy،  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ،  $\text{MgB}_4\text{O}_7$ : Tm و ... اشاره کرد [۴، ۵]. تاکنون روش‌های متفاوتی برای ساخت ماده هیدروکسی‌اپتایت توسعه داده شده است که از قبیل آن می‌توان، ساخت به روش حالت جامد، مکانیکی - شیمیایی، هیدروترمال، امولسیون چندگانه، رسوب‌سازی و سئل-ژل اشاره کرد. با بهره‌گیری از این روش‌ها می‌توان بلورهایی با ابعاد نانومتر تا میکرومتر تولید کرد [۶-۸]. خاصیت ترمولومینسانس هیدروکسی‌اپتایت به دلیل این که جزئی از استخوان انسان است بسیار مورد توجه قرار گرفته است. تا به حال چندین مطالعه بر روی خواص ترمولومینسانس هیدروکسی‌اپتایت خالص و هم‌چنین آلاییده با ناخالصی‌های مختلف انجام شده است [۹، ۱۰]. از آنجایی که فرآیند ساخت و نوع ناخالصی مورد استفاده می‌تواند به شدت بر روی خواص ترمولومینسانس ماده تأثیرگذار باشد، برخی از این مطالعات نشان می‌دهد که می‌توان از این ماده به منظور دزیتمتری پرتوگاما استفاده کرد [۱۱، ۱۲]. در پژوهش حاضر، هدف استفاده از روش حالت جامد برای ساخت هیدروکسی‌اپتایت و هم‌چنین بررسی اثر عملیات حرارتی در دماهای متفاوت و اثر احتمالی آن بر پاسخ ترمولومینسانس ماده هیدروکسی‌اپتایت است. پس از تعیین دمای بهینه، مرحله دوم کار اضافه کردن غلظت‌های مختلف از ناخالصی‌های

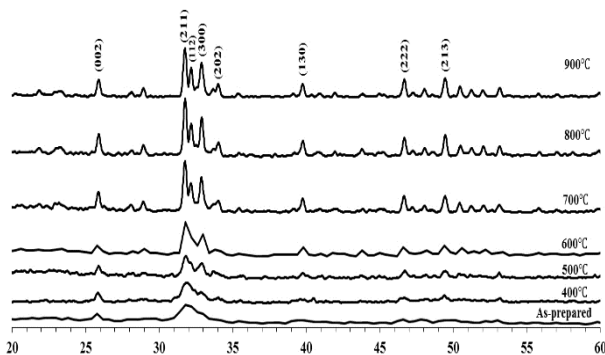
<sup>۱</sup> Dryer cabinet

ارزیابی رادیولوژیکی پژوهشگرده کاربرد پرتوها و در محدوده دمایی  $50^{\circ}\text{C}$  تا  $350^{\circ}\text{C}$ ، با آهنگ گرمایی  $5^{\circ}\text{C/s}$  خوانش شد.

### ۳. بحث و نتایج

#### ۱.۳. مشخصه‌یابی نمونه‌ها

شکل ۱ الگوهای پراش پرتو ایکس مربوط به نمونه‌های ساخته شده HAP خالص به روش حالت جامد را در دمای اتاق (که با نام As-prepared در شکل مشخص شده) و حرارت‌دهی شده در دماهای معین را نشان می‌دهد.



شکل (۱): الگوی پراش پرتو ایکس مربوط به نمونه‌های ساخته شده هیدروکسی اپتایت خالص.

همان‌گونه که در شکل مشخص است در دمای اتاق (بدون عملیات حرارتی) و دماهای  $400^{\circ}\text{C}$ ،  $500^{\circ}\text{C}$  و  $600^{\circ}\text{C}$  قله‌ها بسیار پهن هستند و با افزایش دما از  $700^{\circ}\text{C}$  به بالا قله‌های مربوط به هیدروکسی اپتایت به‌خوبی قابل مشاهده است و حاکی از بلوری شدن ماده در دماهای بالاتر است. نتایج آنالیز XRD نمونه‌ها در مقایسه با مراجع ICDD<sup>1</sup> نشان می‌دهد که قله‌های حاصل با کارت استاندارد هیدروکسی اپتایت مطابقت داشته و مواد ساخته شده همگی هیدروکسی اپتایت هستند.

شکل ۲ و ۳ الگوهای پراش پرتو ایکس مربوط به نمونه‌های حاوی ناخالصی تهیه شده در دمای اتاق (که با نام As-prepared در شکل مشخص شده) و در دمای  $900^{\circ}\text{C}$  را

با ناخالصی دقیقاً مشابه با مراحل و شرایط ساخت هیدروکسی اپتایت خالص بود. تنها با این تفاوت که به نسبتی که از غلظت عامل کلسیم کاسته می‌شد، به غلظت نیترات ناخالصی اضافه می‌گشت. آزمایش‌ها برای مقادیر ناخالصی ۱، ۲ و ۵ درصد مولی انجام شد.

#### ۲.۲. آنالیز نمونه‌ها

در این مرحله برای مشخصه‌یابی نمونه‌های مختلف از دستگاه پراش پرتوی ایکس (XRD) مدل STOE STADI-MP موجود در پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای استفاده شد. الگوی پراش با استفاده از تابش  $\text{CuK}\alpha$  در ولتاژ  $40\text{ kV}$  و جریان  $40\text{ mA}$ ، در محدوده زاویه‌ای  $20 \leq 2\theta \leq 60$  به دست آمد. برای تعیین اندازه دانه‌های بلور نانو از رابطه معروف شرر استفاده شده است [5].

$$d = \frac{k\lambda}{B \cos\theta} \quad (1)$$

که در آن  $d$  قطر متوسط ذره،  $k$  فاکتور شکل،  $\lambda$  طول موج پرتوهای ایکس  $\text{CuK}\alpha$  و  $\theta$  زاویه براگ است.

#### ۳.۲. پرتودهی نمونه‌ها

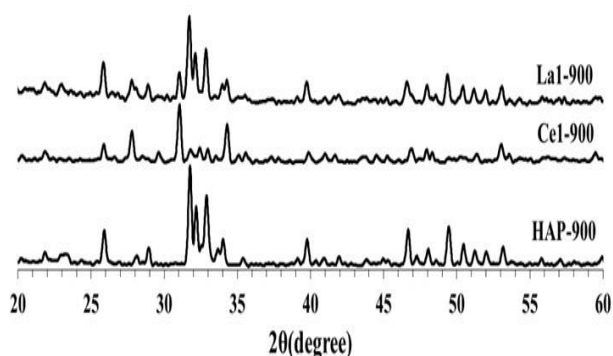
نمونه‌ها برای پرتودهی در ظروف بسیار کوچک پلاستیکی قرار گرفتند و توزین شدند. پرتودهی با استفاده از چشمه کبالت  $60$  گاماسل موجود در آزمایشگاه دزیمتری پژوهشگرده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای انجام شد. هم‌چنین میزان دز پرتودهی برای تمام نمونه‌ها در گستره  $1500 - 20$  Gy در نظر گرفته شد.

#### ۴.۲. خوانش نمونه‌ها

نمونه‌ها با استفاده از خوانشگرهای TLD مدل TLD7102 و TLD مدل Harshaw 4500 موجود در آزمایشگاه دزیمتری و

<sup>1</sup> International Centre for Diffraction Data

La5-900 همگی دارای الگوی پراش مناسبی هستند. شکل ۴ مقایسه الگوی پراش نمونه‌های آلاینده با ناخالصی و نمونه خالص را نشان می‌دهد.



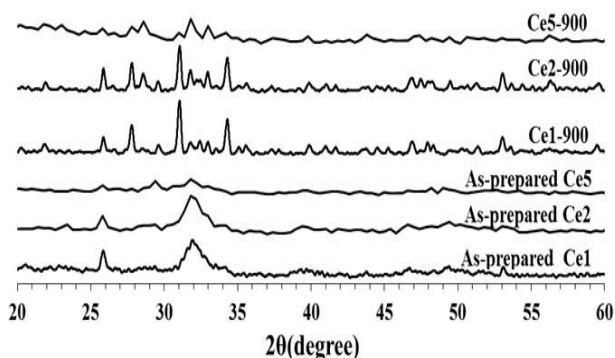
شکل (۴): مقایسه الگوی پراش پرتوی ایکس هیدروکسی‌آپتایت خالص با نمونه‌های آلاینده با ناخالصی در دمای  $900^{\circ}\text{C}$ .

همان‌طور که از شکل ۴ مشخص است، ناخالصی Ce تغییراتی در الگوی پراش هیدروکسی‌آپتایت ایجاد کرده درحالی‌که ناخالصی La تغییرات جزئی ایجاد کرده که این تغییرات در الگوی پراش، ناشی از جایگزین شدن لانتانیدها با عنصر کلسیم در ساختار شبکه هیدروکسی‌آپتایت بوده که به دلیل شعاع یونی متفاوت Ce و La و هندسه هماهنگی<sup>۱</sup> متفاوت، تأثیرات متفاوتی بر ساختار شبکه هیدروکسی‌آپتایت دارند [۱۳]. جزئیات این تفاوت‌ها و نحوه اثرگذاری آن‌ها در ساختار شبکه هیدروکسی‌آپتایت در کارهای بعدی مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

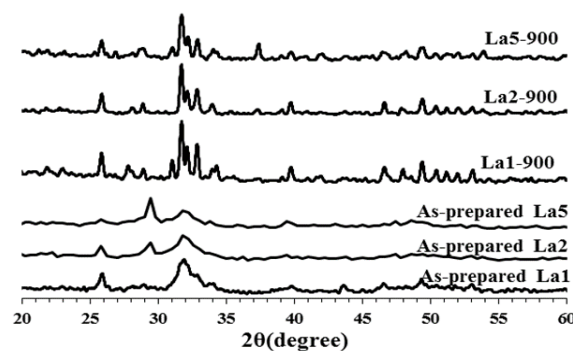
### ۲،۳. مطالعه ترمولومینسانس

شکل ۵ منحنی‌های درخشش نمونه‌های خالص ساخته شده به روش حالت جامد در حالت دمای اتاق و حرارت‌دهی شده در دماهای  $400^{\circ}\text{C}$ ،  $500^{\circ}\text{C}$ ،  $600^{\circ}\text{C}$ ،  $700^{\circ}\text{C}$ ،  $800^{\circ}\text{C}$  و  $900^{\circ}\text{C}$  و پرتودهی شده با میزان دز  $100\text{ Gy}$  را نشان می‌دهد. خوانش این نمونه‌ها با استفاده از دستگاه خوانشگر Harshaw 4500 انجام شده است.

نشان می‌دهد. نتایج آنالیز XRD نشان می‌دهد که قله‌های حاصل با کارت استاندارد هیدروکسی‌آپتایت مطابقت دارد.



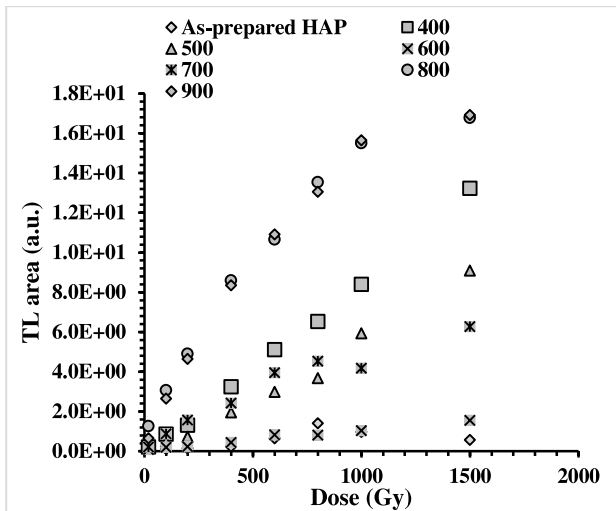
شکل (۲): الگوی پراش پرتوی ایکس هیدروکسی‌آپتایت آلاینده شده با ناخالصی Ce.



شکل (۳): الگوی پراش پرتوی ایکس هیدروکسی‌آپتایت آلاینده شده با ناخالصی La.

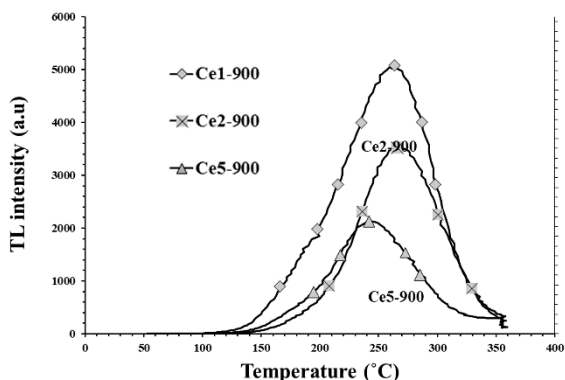
همان‌گونه که از شکل ۲ و ۳ مشخص است، تمام نمونه‌های آلاینده با ناخالصی و تهیه شده در دمای اتاق (بدون عملیات حرارتی) دارای قله‌های بسیار پهن هستند. برای رفع این مشکل نمونه‌های آلاینده با ناخالصی تحت دمای  $900^{\circ}\text{C}$  قرار گرفتند تا الگوهای پراش مناسبی به دست آیند. از شکل ۲ می‌توان نتیجه گرفت که نمونه‌های Ce1-900 و Ce2-900 دارای الگوی پراش مناسبی هستند و نمونه Ce5-900 هم‌چنان دارای الگوی نامناسبی است که این به هم‌خوردگی الگوی پراش می‌تواند در نتیجه اعمال ۵ درصد ناخالصی باشد. در شکل ۳ نیز می‌توان مشاهده کرد که نمونه‌های La1-900، La2-900 و

<sup>۱</sup> Coordination geometry

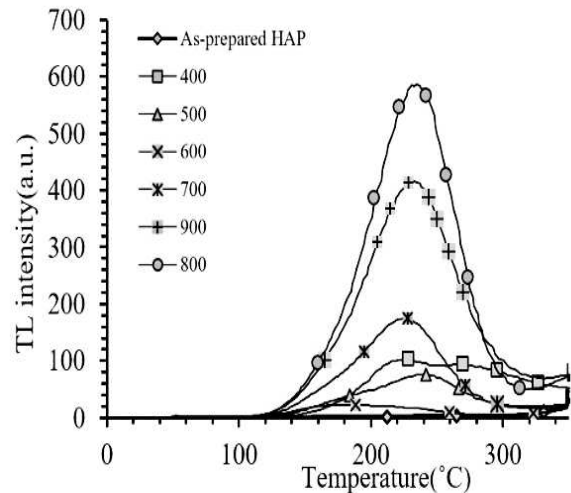


شکل (۶): منحنی دز- پاسخ نمونه‌های خالص ساخته شده.

نتایج نشان می‌دهد که منحنی دز- پاسخ نمونه‌های مربوط به دماهای  $800^{\circ}\text{C}$  و  $900^{\circ}\text{C}$  خیلی بالاتر از سایر نمونه‌هاست. شکل ۷، منحنی درخشش نمونه‌های آلیبده با Ce با غلظت ۱، ۲ و ۵ درصد مولی و حرارت‌دهی شده در دمای  $900^{\circ}\text{C}$  مربوط به پرتودهی به میزان دز ۱۰۰ Gy است. شکل ۸ منحنی درخشش نمونه‌های آلیبده با La با غلظت ۱، ۲ و ۵ درصد مولی و حرارت‌دهی شده در دمای  $900^{\circ}\text{C}$  مربوط به پرتودهی به میزان دز ۱۰۰ Gy می‌باشد. خوانش این نمونه‌های آلیبده با ناخالصی با استفاده از دستگاه خوانشگر TLD-7102 انجام شده است.



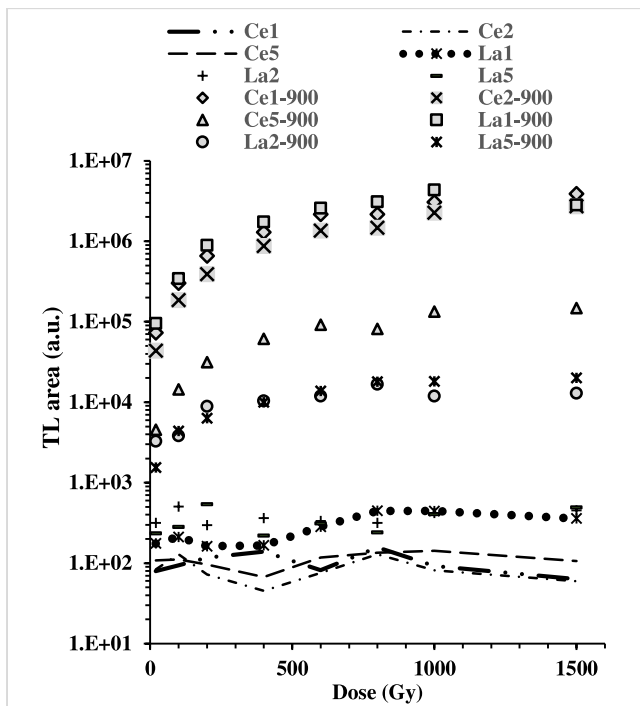
شکل (۷): منحنی درخشش نمونه‌های آلیبده با Ce با غلظت ۱، ۲ و ۵ درصد مولی در دز ۱۰۰ Gy. محور عمودی ثانویه مربوط به نمونه ۵ درصد مولی است.



شکل (۵): منحنی درخشش ترمولومینسانس هیدروکسی ایتایت خالص حرارت‌دهی شده در دماهای مختلف در دز ۱۰۰ Gy.

مقایسه منحنی‌های درخشش نشان می‌دهد که سطح زیر منحنی نمونه‌های مربوط به دماهای  $800^{\circ}\text{C}$  و  $900^{\circ}\text{C}$  خیلی بالاتر از بقیه نمونه‌ها است. لذا می‌توان نتیجه گرفت که چون سطح زیر منحنی این نمونه‌ها بالاتر است، پس بیش‌ترین پاسخ را خواهد داشت. شکل ۶ منحنی دز- پاسخ نمونه‌های هیدروکسی ایتایت خالص ساخته شده به روش حالت جامد مربوط به پرتودهی به میزان دز در گستره ۱۵۰۰-۲۰ Gy را نشان می‌دهد.

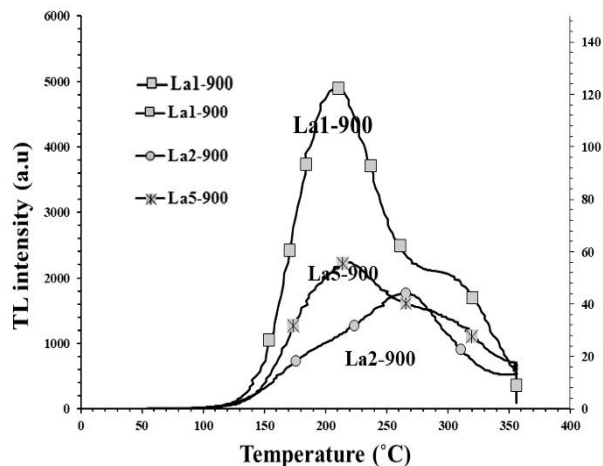
رفتار منحنی دز- پاسخ برای نمونه‌های خالص ساخته شده به روش حالت جامد در محدوده مورد بررسی خطی است. همان‌طور که در این شکل نشان داده شده است، به‌طور مشخص پاسخ نمونه‌های حرارت‌دهی شده در دماهای  $400^{\circ}\text{C}$ ،  $500^{\circ}\text{C}$  و  $700^{\circ}\text{C}$  تا ۱۵۰۰ Gy خطی است و نمونه‌های حرارت‌دهی شده در دماهای  $800^{\circ}\text{C}$ ،  $900^{\circ}\text{C}$  تا ۱۰۰۰ Gy دارای پاسخ خطی هستند.



شکل (۹): مقایسه منحنی تغییرات دز- پاسخ مربوط به نمونه‌های آلاییده با ۱، ۲ و ۵ درصد مولی ناخالصی سریم و لانتانیم.

نتایج نشان می‌دهد که بطور کلی نمونه‌های آلاییده با ناخالصی و حرارت‌دهی شده در  $900^{\circ}\text{C}$  پاسخ خیلی بالاتری نسبت به نمونه‌های بدون عملیات حرارتی دارند. همچنین در بین نمونه‌های حرارت‌دهی شده نیز نمونه‌های Ce1-900، Ce2-900 و La1-900 دارای بالاترین پاسخ هستند.

همان‌طور که در بخش قبل دیدیم نمونه‌های آلاییده با ناخالصی و ساخته شده در دمای  $900^{\circ}\text{C}$  نتایج مطلوب‌تری نسبت به نمونه‌های ساخته شده در دمای اتاق، از لحاظ منحنی درخشش و پاسخ دزیمتری ترمولومینسانس از خود نشان دادند. به همین دلیل برای بررسی اثر محوشدگی تنها نمونه‌های ساخته شده در دمای  $900^{\circ}\text{C}$  انتخاب شدند. اثر محوشدگی (برحسب درصد) در دوره‌های یک روز، یک هفته، دو هفته و یک ماه بعد از پرتودهی در دز  $800\text{ Gy}$  مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل ۱۰ اثر محوشدگی نمونه‌های آلاییده با ۱، ۲ و ۵ درصد مولی ناخالصی‌های سریم و لانتانیم ساخته شده در دمای  $900^{\circ}\text{C}$  نشان داده شده است.



شکل (۸): منحنی درخشش نمونه‌های آلاییده با La با غلظت ۱، ۲ و ۵ درصد مولی در دز  $100\text{ Gy}$ . محور عمودی ثانویه مربوط به نمونه ۵ درصد مولی است.

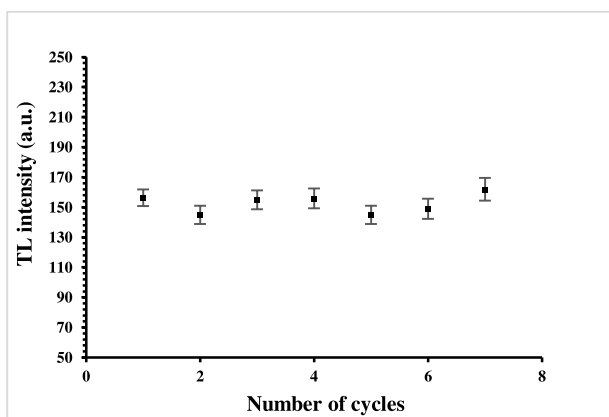
همان‌طور که از نتایج پاسخ ترمولومینسانس نمونه‌های آلاییده با ناخالصی تکی مشخص است، نمونه‌های آلاییده با Ce با غلظت‌های ۱ و ۲ درصد و La با غلظت ۱ درصد دارای بیشترین پاسخ بوده و نمونه‌های آلاییده با غلظت‌های ۵ درصد کمترین پاسخ را دارند. برای نمونه‌های آلاییده با Ce با غلظت ۱ و ۲ درصد در تمام دزها موقعیت دمایی تقریباً مشابه است. همچنین در مورد نمونه‌های آلاییده با La با غلظت ۱ درصد در تمام دزها موقعیت دمایی قله تقریباً با یکدیگر شباهت دارند.

در شکل ۹ منحنی تغییرات دز- پاسخ برای تمام نمونه‌های آلاییده با ناخالصی (در دو حالت بدون عملیات حرارتی و حرارت‌دهی تحت دمای  $900^{\circ}\text{C}$ ) در مقیاس لگاریتمی رسم شده است. به علت تفاوت فاحش پاسخ دزیمتری نمونه‌ها در دو حالت بدون عملیات حرارتی و حرارت‌دهی تحت دمای  $900^{\circ}\text{C}$  این شکل در مقیاس لگاریتمی ترسیم شده است.

نتایج نشان می‌دهد که نمونه‌های حرارت‌دیده با غلظت‌های مختلف از ناخالصی سریم تا  $1500\text{ Gy}$  دارای پاسخ خطی هستند. نمونه‌های آلاییده با ناخالصی لانتانیم با غلظت ۱، ۲ و ۵ درصد به ترتیب تا  $1000\text{ Gy}$ ،  $800\text{ Gy}$  و  $800\text{ Gy}$  دارای پاسخ خطی هستند.

چنانچه از شکل بالا ملاحظه می‌شود ارتفاع قله بعد از پرتودهی و در یک بازه زمانی تقریباً ثابت می‌ماند. در حالی که مساحت زیر سطح نمودار در حال تغییر و کاهش است. دلیل این امر به باز ترکیب دام‌های کم عمق مربوط می‌شود. ضمناً در صورت استفاده از ارتفاع منحنی درخشش به عنوان پاسخ دزیتر، میزان محوشدگی بسیار ناچیز می‌نماید.

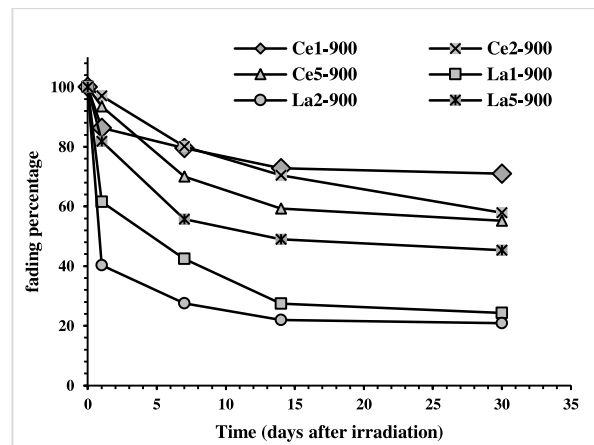
در شکل ۱۲ میزان تکرارپذیری نمونه Ce1-900 نشان داده شده است. آزمایش تکرارپذیری در دز ۸۰۰ Gy انجام شده است. میزان انحراف معیار داده‌ها در آزمایش تکرارپذیری کمتر از ۶ درصد می‌باشد.



شکل (۱۲): نمودار تکرارپذیری نمونه آلییده با ۱ درصد ناخالصی سریم ساخته شده در دمای ۹۰۰°C و دز ۸۰۰ Gy

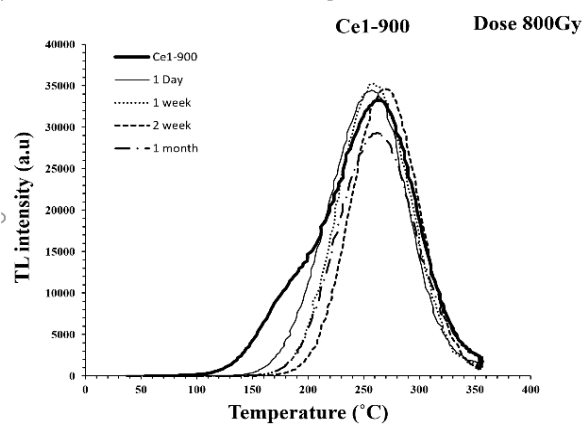
#### ۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش ساخت هیدروکسی ایتایت خالص به روش حالت جامد با موفقیت انجام شد. نتایج نشان داد با افزایش دما از ۷۰۰°C به بالا قله‌های مربوط به هیدروکسی ایتایت به خوبی قابل مشاهده است. با استفاده از معادله شرر اندازه متوسط بلورکها ۳۵ nm برآورد شد. سطح زیر منحنی درخشش نمونه‌های با دماهای ۸۰۰°C و ۹۰۰°C بالاتر است، یعنی پاسخ این نمونه‌ها از بقیه‌ی نمونه‌ها بیشتر است. هم‌چنین تغییرات دز- پاسخ نمونه‌های هیدروکسی ایتایت تا دز ۶۰۰ Gy خطی است. به‌طور کل می‌توان نتیجه گرفت که اعمال عملیات



شکل (۱۰): نمودار محوشدگی نمونه‌های آلییده با ۱، ۲ و ۵ درصد مولی ناخالصی سریم و لانتانیم ساخته شده.

همان‌طور که از شکل فوق می‌توان مشاهده کرد، نمونه‌های آلییده با سریم محوشدگی کمتری نسبت به نمونه‌های آلییده با لانتانیم دارند. هم‌چنین در بین نمونه‌های آلییده با سریم نیز نمونه Ce1-900 کمترین میزان محوشدگی را دارد و در طول یک ماه بعد از پرتودهی تا حدود ۸۰٪ پاسخ خود را حفظ می‌کند. نمونه‌های Ce2-900 و Ce5-900 نیز به ترتیب ۷۳٪ و ۷۱٪ از پاسخ خود را حفظ می‌کنند. نمونه آلییده با La2-900 دارای بیشترین میزان محوشدگی بوده و در این دوره زمانی یک ماهه بیش از ۸۰ درصد پاسخ اولیه خود را از دست می‌دهد. در شکل ۱۱ منحنی درخشش نمونه Ce1-900 در طول این دوره یک‌ماهه رسم شده است.



شکل (۱۱): نمودار منحنی درخشش نمونه آلییده با ۱ درصد ناخالصی سریم ساخته شده در دمای ۹۰۰°C.

ناخالصی نیز بر ساختار ماده و نتایج به دست آمده تأثیرگذار است. به لحاظ محوشدگی در روش حالت جامد، نمونه‌های آلاییده با سریم و در بین آن‌ها نمونه Ce با غلظت ۱ درصد مولی در دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد دارای کمترین اثر محوشدگی است و در طول یک ماه بعد از پرتودهی تا حدود ۸۰٪ پاسخ خود را حفظ کرده است. یادآور می‌شود که در صورت استفاده از ارتفاع منحنی درخشش به عنوان پاسخ دزیتر، میزان محوشدگی بسیار ناچیز و قابل اغماض خواهد بود.

حرارتی در دمای بالاتر از ۷۰۰°C برای اهداف دزیتری مناسب است. هم‌چنین در نمونه‌های آلاییده با ناخالصی Ce و La با غلظت‌های ۱٪، ۲٪، ۵٪ مولی، نمونه‌های آلاییده با Ce با غلظت‌های ۱ و ۲ درصد مولی در دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد دارای بیش‌ترین پاسخ از دیدگاه دزیتری ترمولومینسانس هستند و نمونه‌های آلاییده با غلظت‌های ۵ درصد مولی در دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد کمترین پاسخ را دارند. پس می‌توان نتیجه گرفت که علاوه بر غلظت ناخالصی، نوع

## ۵. مراجع

- [1] C. Sikalidis. *Advances in Ceramics: Synthesis and Characterization, Processing and Specific Applications*. BoD-Books on Demand. (2011).
- [2] H. Li, L. Mei, H. Liu, Y. Liu, L. Liao, and R. V. Kumar. Growth Mechanism of Surfactant-Free Size-Controlled Luminescent Hydroxyapatite Nanocrystallites, *Crystal Growth & Design*. 17.5 (2017) 2809-2815.
- [3] A. Costescu, I. Pasuk, F. Ungureanu, A. Dinischiotu, M. Costache, F. Huneau, et al. Physico-chemical properties of nano-sized hexagonal hydroxyapatite powder synthesized by sol-gel. *Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures*. 5.4 (2010) 989-1000.
- [4] C. Sunta, *Unraveling thermoluminescence*. 202 (2015).
- [5] H. Daneshvar, M. Shafaei, F. Manouchehri, S. Kakaie, and F. Ziaie. Influence of morphology and chemical processes on thermoluminescence response of irradiated nanostructured hydroxyapatite. *Journal of Luminescence*. (2019).
- [6] M. Shafaei, F. Ziaie, and N. Hajiloo. Thermoluminescence properties of micro and nano-structure hydroxyapatite after gamma irradiation. *Kerntechnik*. 81(2016) 651- 654
- [7] M. Shafaei, F. Ziaie, D. Sardari, and M. Larijani. Study on carbonated hydroxyapatite as a thermoluminescence dosimeter. *Kerntechnik*. 80 (2015) 66-69.
- [8] A. Khanfari, T. Akbari and M. R. Sohrab. Comparison of nano-hydroxyapatite productivity by *Pseudomonas aeruginosa* and *Serratia marcescens* through encapsulation method. *Nanomedicine Journal*. 1(2014) 276-284.
- [9] M. R. Chapman, A. G. Miller and T. G. Stoebe. Thermoluminescence in hydroxyapatite. *Medical Physics*. (1979) 494-499.
- [10] F. Ziaie, Moein, N. Farhadi and M. Shafaei. Thermoluminescent characteristics of nano-structure hydroxyapatite:Dy. *Kerntechnik*. 79(6) (2014) 500-503.
- [11] M. Shafaei, F. Ziaie, D. Sardari and M. Larijani. The effect of sintering on thermoluminescence response of hydroxyl apatite nano-structure synthesized via hydrolysis method from dosimetric point of view. *IJRSM*. 2.4 (2014) 13-18.
- [12] A. Zarinfar, M. Shafaei and F. Ziaie. Synthesis, Characterization and Thermoluminescence Properties of Nano-Structure Gadolinium Doped Hydroxyapatite (HAP: Gd). *Procedia Materials Science*. 11 (2015) 293-298.
- [13] J. F. Cawthray, A. L. Creagh, C. A. Haynes and C. Orvig, Ion Exchange in Hydroxyapatite with Lanthanides. *Inorg. Chem*. 54.4 (2015) 1440-1445.