

## مطالعه‌ی اثر افزودن ناخالصی ترکیبی و فاز بلوری تشکیل یافته بر پاسخ ترمولومینسانس هیدروکسی اپتایت تولید شده به روش هیدروترمال

پریسا تقی‌پور نیار<sup>۱\*</sup>، فرهاد ذوالفقارپور<sup>۱</sup>، حمیده دانشور<sup>۲</sup>

۱. گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل- ایران  
۲. پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، تهران- ایران

### چکیده:

در این کار پژوهشی، نمونه‌های هیدروکسی اپتایت آلاینده شده با ناخالصی‌های سریم، گادولونیم و ترکیبی از این دو ناخالصی به روش هیدروترمال تولید شدند. همچنین به منظور بررسی فازهای تشکیل یافته در هر کدام از نمونه‌های تولید شده، از نرم افزار MAUD که یک نرم‌افزار برای تجزیه و تحلیل ساختار ماده با استفاده از پراش براساس روش ریتولد می‌باشد، استفاده شد. در نهایت، پاسخ دزیمتری ترمولومینسانس نمونه‌های تولید شده مورد بررسی قرار گرفت. یافته‌ها نشان داد که پاسخ ترمولومینسانس نمونه‌ی آلاینده شده با ناخالصی ترکیبی، حد میانی پاسخ ترمولومینسانس نمونه‌های آلاینده شده با یک ناخالصی است. مشخص شد که افزودن ناخالصی سریم می‌تواند پاسخ ترمولومینسانس نمونه‌ی آلاینده شده با گادولونیم را بهبود بخشد. در پایان این نتیجه حاصل شد که در صورتیکه ناخالصی گادولونیم در ماده وجود داشته باشد به منظور بهبود پاسخ ترمولومینسانس می‌توان از ناخالصی سریم استفاده کرد. همچنین نتایج حاصل از انجام آنالیز ریتولد نشان داد که فازهای تشکیل دهنده هیدروکسی اپتایت می‌تواند بر پاسخ دزیمتری ترمولومینسانس آن مؤثر باشد.

کلیدواژه‌ها: دزیمتری، ترمولومینسانس، هیدروترمال، ریتولد

## Study of the effect of adding compound dopants and crystalline formed phase on the thermoluminescence response of the synthesized hydroxyapatite through hydrothermal method

Parisa Taghipour Niar<sup>1\*</sup>, Farhad Zolfagharpour<sup>1</sup>, Hamideh Daneshvar<sup>2</sup>

1. Department of Physics, Faculty of Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran  
2. Radiation Application Research School, Nuclear Science & Technology Research Institute, Tehran, Iran

### Abstract:

In this research work, hydroxyapatite samples doped with cerium, gadolinium and a combination of these two dopants were synthesized through hydrothermal method. In order to investigate the formed phases in each of the samples, MAUD software, which is a material diffraction analysis software based on Rietveld method, was used. Finally, the thermoluminescence dosimetry response of the samples was investigated. The results showed that the thermoluminescence response of the sample doped with the compound dopants is the median limit of the thermoluminescence response of the samples doped with a dopant. It was found that the addition of cerium dopant could improve the thermoluminescence response of the sample doped with gadolinium dopant. At last, it was concluded that cerium dopant can be used to improve the thermoluminescence response, if gadolinium impurity is present in the substance. Also, the results of Rietveld refinements showed that formed phases of hydroxyapatite can affect on the thermoluminescence dosimetry response.

**Keywords:** Dosimetry, Thermoluminescence, Hydrothermal, Rietveld.

Email: taghipour@uma.ac.ir

## ۱. مقدمه

ترمولومینسانس<sup>۱</sup> (TL) یا به عبارتی دیگر لومینسانس تحریک شده با گرما، نوری است که یک ماده‌ی جامد (معمولاً یک عایق یا یک نیمه هادی)، هنگامیکه در معرض تابش‌هایی همچون پرتوهای X، پرتوهای گاما، اشعه‌ی فرابنفش و ... قرار گرفته و سپس گرم می‌شود، از خود گسیل می‌کند. در طول گرمادهی که معمولاً با نرخ ثابت انجام می‌شود، شدت TL توسط یک لوله‌ی فوتومالیتی‌پلیر (PMT)<sup>۲</sup> و یک دستگاه شمارش پالس آشکارسازی شده و بصورت تابعی از زمان یا دما ثبت می‌شود. منحنی بدست آمده، منحنی TL یا منحنی درخشش<sup>۳</sup> نامیده می‌شود.

موادی که رفتار ترمولومینسانس از خود نشان می‌دهند، مواد ترمولومینسانس نامیده می‌شوند و می‌توانند به عنوان آشکارساز یا دزیمتر پرتوهای یون ساز مانند پرتوهای X، پرتوهای گاما، پرتوهای بتا و نوترون مورد استفاده قرار گیرند. بسیاری از مواد معدنی طبیعی و ترکیبات غیرآلی مصنوعی پدیده‌ی ترمولومینسانس را نشان می‌دهند، اما فقط برخی از آن‌ها شرایط لازم برای مورد استفاده قرار گرفتن به عنوان دزیمتر ترمولومینسانس را برآورده می‌کنند. چنین موادی را دزیمتر ترمولومینسانس نامیده و با علامت اختصاری TLD<sup>۴</sup> نشان می‌دهند [۱-۲].

فسفات‌ها و هالو فسفات عناصر خاکی و مواد قلیایی، بطور گسترده‌ای به عنوان مواد مناسب برای دزیمتری ترمولومینسانس TLD مورد استفاده قرار می‌گیرند. بلورهای کلسیم فسفات مواد بسیار مناسبی برای کاربردهای TLD هستند [۳]. هیدروکسی اپتایت (HAP)<sup>۵</sup> با رابطه‌ی استوکیومتری  $[Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2]$ ، یک شکل غیرآلی از کلسیم اپتایت، یکی از مهم‌ترین ترکیبات کلسیم فسفات بوده و اصلی‌ترین ماده‌ی سازنده‌ی استخوان‌ها و دندان‌های انسان است بطوریکه تقریباً ۹۵-۹۷ درصد از مینای دندان، ۷۰-۷۵ درصد از استخوان دندان و ۶۰-۷۰ درصد از استخوان‌های بدن از HAP ساخته شده است [۴]. HAP یک سرامیک زیست‌سازگار و زیست‌فعال است، که قادر به تعامل و پیوند شیمیایی با استخوان است. HAP را می‌توان بطور طبیعی از منابع طبیعی استخراج کرد و یا آن را بطور شیمیایی تولید کرده و HAP مصنوعی بدست آورد. HAP طبیعی از منابع طبیعی مانند پستانداران (به عنوان مثال گاو، شتر و اسب)، جانوران آبی و دریایی (به عنوان مثال استخوان و فلس ماهی)، پوسته‌ها (به عنوان مثال پوسته تخم مرغ و پوسته صدف)، گیاهان و جلبک‌ها و منابع معدنی استخراج می‌شود. HAP مصنوعی را می‌توان با روش‌های مختلفی از جمله روش‌های خشک (واکنش حالت جامد<sup>۶</sup> و مکانیکی-شیمیایی<sup>۷</sup>)، روش‌های تر (رسوب شیمیایی<sup>۸</sup>، هیدرولیز<sup>۹</sup>، سل ژل<sup>۱۰</sup>، هیدروترمال<sup>۱۱</sup>، امولسیون<sup>۱۲</sup> و سونو شیمیایی<sup>۱۳</sup>) و فرآیندهای دمای بالا (احتراق<sup>۱۴</sup> و پیرولیز<sup>۱۵</sup>) تولید کرد [۵-۸]. ساختار

<sup>1</sup> Thermoluminescence

<sup>2</sup> Photomultiplier

<sup>3</sup> Glow Curve

<sup>4</sup> Thermo Luminescence Dosimeter

<sup>5</sup> Hydroxyapatite

<sup>6</sup> Solid-State Reaction

<sup>7</sup> Mechanochemical

<sup>8</sup> Chemical Precipitation

<sup>9</sup> Hydrolysis

<sup>10</sup> Sol-Gel

<sup>11</sup> Hydrothermal

<sup>12</sup> Emulsion

<sup>13</sup> Sonochemical

<sup>14</sup> Combustion

<sup>15</sup> Pyrolysis

بلوری HAP می‌تواند به دو شکل هگزاگونال با گروه فضایی P6<sub>3</sub>/m، مونوکلینیک با گروه فضایی P2<sub>1</sub>/b و یا ترکیبی از این دو فاز باشد [۹-۱۲].

بطور کلی، ترکیبات خالص سیگنال TL ضعیفی را نشان می‌دهند و به همین خاطر مواد دزیمتری کارآمد محسوب نمی‌شوند. با آلاینده‌ها و سایر مواد با ناخالصی‌های مناسب که به‌عنوان فعال ساز پدیده‌ی ترمولومینسانس عمل می‌کنند، بازده بسیار بالاتری حاصل می‌شود. حضور ناخالصی‌ها در شبکه موجب تشکیل سطوح انرژی در باند ممنوعه می‌شود. بعضی از این سطوح نزدیک به باند رسانش و بعضی از آن‌ها نزدیک به باند ظرفیت هستند. سطوح انرژی که به باند رسانش نزدیک‌ترند احتمال بیشتری برای به دام انداختن الکترون دارند و سطوحی که به باند ظرفیت نزدیک‌ترند احتمال بیشتری برای به دام انداختن حفره‌ها دارند. بنابراین آلاینده‌هایی که وارد شبکه‌ی بلور می‌شوند، عامل ایجاد سطوح انرژی و مراکز گیراندازی در بلور بوده و از نظر مقدار در حد چند مول درصد هستند [۱].

## ۲. مواد و روش‌ها

### ۲.۱. تهیه‌ی نمونه‌ها

در این کار، از روش هیدروترمال برای تولید نمونه‌های HAP استفاده شد. روش هیدروترمال بر مبنای کاری است که در پژوهشکده علوم و فناوری مواد در دانشگاه علوم زمین چین انجام شده است [۱۳]. در این روش از نیترات کلسیم Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>·4H<sub>2</sub>O (99% Merck)، دی آمونیوم فسفات (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> (99% Merck)، سود NaOH (99%)، اولئیک اسید (oleic acid (99% Fluka)، و اتانول (ethanol (99% Sigma Aldrich) به‌عنوان مواد اولیه و نیز از نیترات لانتانیدها برای آلاینده‌ها با ناخالصی‌ها استفاده شد. در ابتدا سود با آب مقطر مخلوط شده و پس از آن مقادیر مورد نیاز از اولئیک اسید و اتانول به مخلوط اضافه گردید. سپس عامل کلسیم اضافه شد و به مدت نیم ساعت واکنش ادامه پیدا کرد. سپس عامل فسفات اضافه شد و به مدت یک ساعت این روند ادامه یافت. افزودن ناخالصی به این ترتیب انجام شد که به نسبتی که از غلظت عامل کلسیم کاسته شد، به غلظت نیترات ناخالصی اضافه گردید، به گونه‌ای که در رابطه‌ی استوکیومتری Ca<sub>10-x</sub> M<sub>x</sub> (PO<sub>4</sub>)<sub>6</sub> (OH)<sub>2</sub> نسبت  $[Ca + M]/P = 1.67$  ثابت باشد. همچنین اضافه کردن ناخالصی ترکیبی نیز باید به گونه‌ای باشد که در رابطه‌ی استوکیومتری Ca<sub>10-x-y</sub> M<sub>1x</sub> M<sub>2y</sub> (PO<sub>4</sub>)<sub>6</sub> (OH)<sub>2</sub> نسبت  $[Ca + M_1 + M_2]/P = 1.67$  ثابت باشد. نمونه‌های HAP تولید شده ابتدا با ۵ درصد مولی عنصر ناخالصی گادولونیم و سپس ۲ درصد مولی عنصر ناخالصی سریم و در نهایت با ترکیبی از ۵ درصد گادولونیم و ۲ درصد سریم آلاینده شد. برای راحتی از نماد Ce<sub>2</sub>Gd<sub>5</sub> و Ce<sub>2</sub>, Gd<sub>5</sub> برای این نمونه‌ها استفاده می‌شود که در آن عددهای ۲ و ۵ در کنار نام ناخالصی نشان‌دهنده‌ی درصد مولی مربوط به آن ناخالصی می‌باشد. مواد تولید شده در داخل اتوکلاو با دمای ۱۲۰°C به مدت ۸ ساعت قرار گرفتند. پس از این مرحله، چندین مرتبه، مخلوط با سیکلوهگزان و اتانول توسط دستگاه سانتریفیوژ شستشو داده شد. سپس در دمای ۱۱۰°C به مدت ۲۴ ساعت خشک شد. مرحله نهایی ساخت، کلسینه کردن نمونه‌ها در دمای ۸۰۰°C و به مدت ۲ ساعت بود.

## ۲.۲. روش‌های آنالیز

### ۲.۲.۱. آنالیز به روش XRD

الگوی پراش نمونه‌ها به روش XRD<sup>۱</sup> با استفاده از تابش  $k\alpha$  مربوط به مس در ولتاژ ۴۰ kV و جریان ۴۰ mA و در محدوده‌ی زاویه‌ای  $20 < 2\theta < 60$  و با استفاده از دستگاه STOE STADI-MP موجود در پژوهشکده مواد و سوخت هسته‌ای پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای بدست آمد (شکل ۱). برای تعیین اندازه‌ی بلورک از رابطه‌ی شرر (رابطه ۱) استفاده می‌شود.

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

### ۲.۲.۲. آنالیز ریتولد با استفاده از نرم افزار MAUD

نرم افزار MAUD<sup>۲</sup> یک نرم افزار تحلیل و بررسی با استفاده از پراش است که براساس روش ریتولد می‌باشد. با استفاده از این نرم‌افزار می‌توان فازهای تشکیل دهنده‌ی ماده را شناسایی کرده و درصد هرکدام از فازهای تشکیل شده را به دست آورد. این نرم‌افزار را می‌توان از وبسایت (<http://maud.radiographema.eu/>) دانلود و نصب کرد. فایل متنی مورد نیاز برای استفاده در این نرم‌افزار شامل اطلاعات کریستالوگرافی ماده است که فایل اطلاعات کریستالوگرافی (CIF)<sup>۳</sup> نامیده می‌شود و بصورت رایگان از سایت COD<sup>۴</sup> (<http://crystallography.net/>) قابل دانلود می‌باشد. در این نرم‌افزار پارامترهای sig و همچنین پارامتر  $X^2$  که بصورت  $(Rwp/Rexp)^2$  تعریف می‌شود و پارامتر "میزان خوب بودن انطباق" نامیده می‌شود، پارامترهای مهمی هستند که میزان خوب بودن تحلیل و بررسی را نشان می‌دهند. مقادیر  $Rwp^5$  و  $Rexp^6$  (که  $Rexp$  بهترین مقدار ممکن  $Rwp$  می‌باشد) باید به گونه‌ای باشند که مقدار  $X^2$  کمتر از ۱ نشود. اگر مقدار پارامتر sig کمتر از ۲ و مقدار پارامتر  $X^2$  بیشتر از ۱ باشد، در این صورت می‌توان گفت که تحلیل و بررسی انجام یافته قابل اعتماد و نتایج بدست آمده از آن قابل قبول می‌باشد [۱۴-۱۶].

### ۲.۲.۳. خوانش نمونه‌ها

برای خوانش نمونه‌ها از دستگاه خوانش گر TLD مدل TLD7102 ساخت انستیتو فیزیک ایران موجود در آزمایشگاه دزیمتری پژوهشکده کاربرد پرتوها و در محدوده‌ی دمایی  $50^\circ\text{C}$  تا  $350^\circ\text{C}$  با آهنگ گرمایی  $5^\circ\text{C/s}$  استفاده شد.

### ۲.۲.۴. پرتودهی نمونه‌ها

پرتودهی نمونه‌ها با استفاده از پرتوهای کبالت  $60$  با استفاده از دستگاه گاماسیل موجود در آزمایشگاه دزیمتری پژوهشکده کاربرد پرتوها تا حدود  $1500\text{Gy}$  انجام شد.

<sup>1</sup> X-ray diffraction

<sup>2</sup> Material Analysis Using Diffraction

<sup>3</sup> Crystallographic Information File

<sup>4</sup> Crystallographic Open Database

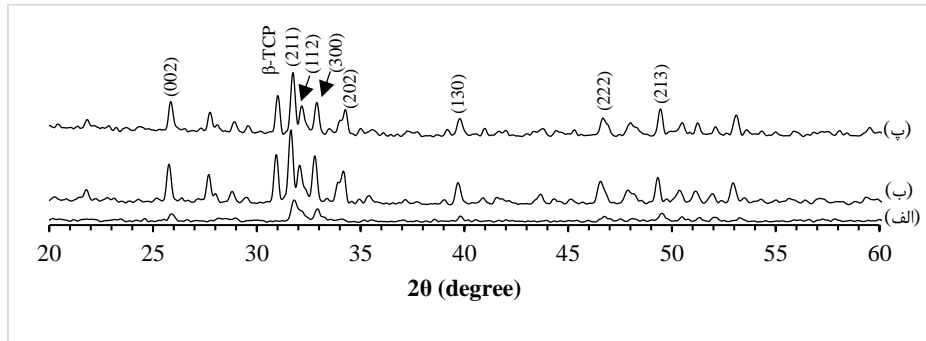
<sup>5</sup> Weighted profile R-factor

<sup>6</sup> Expected R factor

### ۳. بحث و نتایج

#### ۳.۱. الگوی پراش (XRD) نمونه‌ها

شکل (۱) الگوی پراش نمونه‌های HAP آلیبده شده با Ce2Gd5 و Ce2 را نشان می‌دهد.

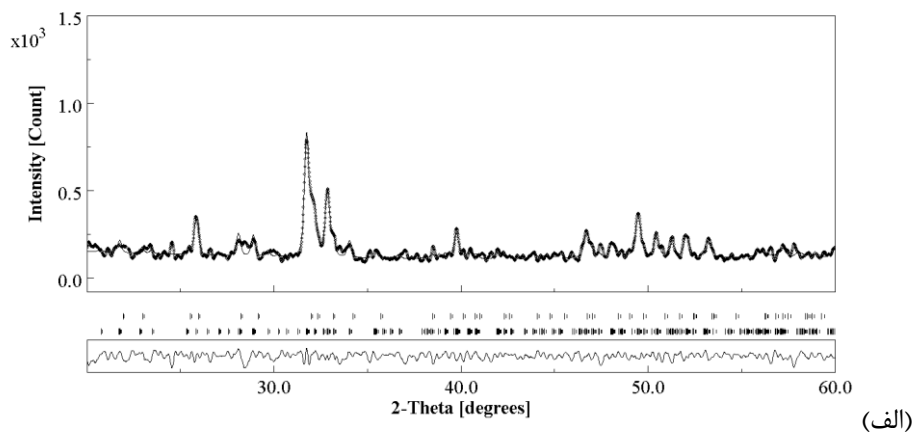


شکل ۱. نمودار الگوی پراش XRD برای نمونه‌های HAP تولید شده به روش هیدروترمال و آلیبده شده با الف) Gd5 ب) Ce2 پ) Ce2Gd5.

مقایسه‌ی الگوهای XRD بدست آمده با مراجع ICDD<sup>۱</sup> نشان می‌دهد که مواد تولید شده ترکیبی از HAP هگزاگونال و HAP مونوکلینیک با شماره کارتهای ۰۱-۰۷۲-۱۲۴۳ و ۰۱-۰۷۶-۰۶۴۹ به ترتیب برای ساختار هگزاگونال و مونوکلینیک می‌باشند. همچنین مشخص شد که یک فاز اضافی از ماده‌ی بتاتری کلسیم فسفات<sup>۲</sup> (β-TCP) با شماره کارت ۰۱-۰۸۶-۱۵۸۵ در داخل نمونه‌های تولید شده موجود می‌باشد که امکان دارد این فاز در ماده به خاطر دمای بالای کلسیناسیون تشکیل شده باشد. زیرا در دماهای بالا این امکان وجود دارد که HAP به β-TCP تبدیل شود [۱۷-۱۸].

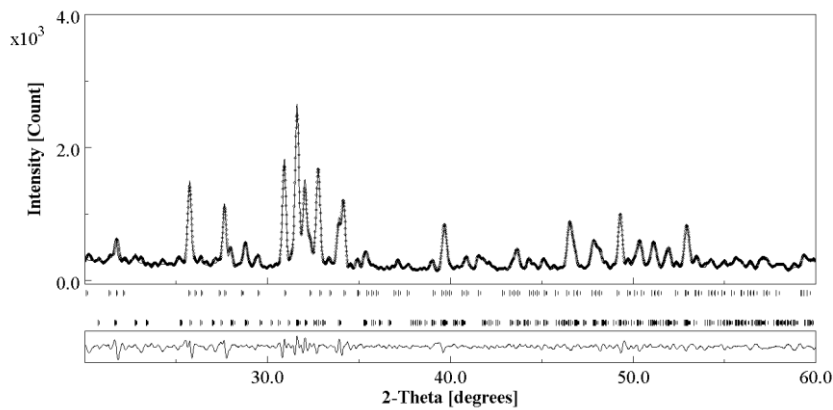
#### ۳.۲. نتایج آنالیز به روش ریتولد

نتایج آنالیز ریتولد برای نمونه‌ها با استفاده از نرم‌افزار MAUD در شکل (۲) نمایش داده شده است.

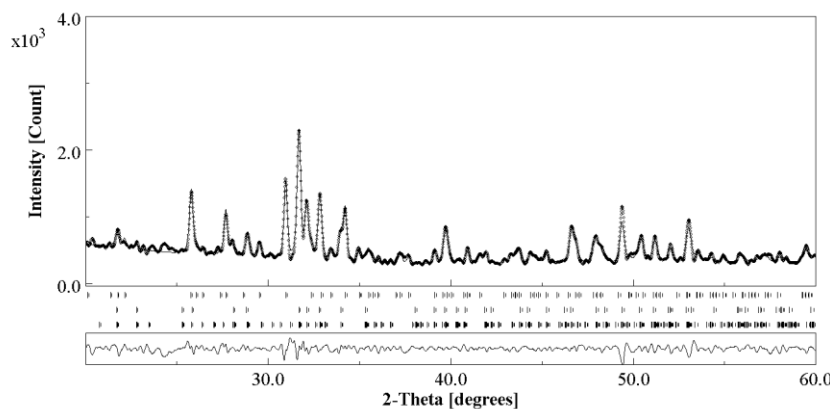


<sup>۱</sup> International Centre for Diffraction Data

<sup>۲</sup> Beta-tricalcium Phosphate



(ب)



(پ)

شکل ۲. نتایج آنالیز ریتولد با استفاده از نرم‌افزار MAUD برای الف (Gd5 ب) Ce2 پ) Ce2Gd5. نقطه‌ها نشان‌دهنده الگوی پراش نمونه و خط نشان‌دهنده نمودار حاصل از آنالیز ریتولد می‌باشد.

همانگونه که از شکل (۲) قابل مشاهده است، نمودار حاصل از آنالیز ریتولد به خوبی با الگوی پراش نمونه‌ها مطابقت دارد، و تمام قله‌ها شناسایی و منطبق شده‌اند که به این معنی است که آنالیز با موفقیت انجام شده است. در این مرحله از فایل‌های CIF با شناسه‌ی ۲۳۰۰۲۷۳، ۷۲۱۷۸۹۲ و ۱۵۱۷۲۳۸ به ترتیب برای فازهای HAP هگزاگونال، HAP مونوکلینیک و  $\beta$ -TCP استفاده شده است. جزئیات انجام آنالیز ریتولد در جدول (۱) آورده شده است.

جدول ۱. SIG, Rwp و Rexp حاصل از آنالیز ریتولد با استفاده از نرم‌افزار MAUD.

نمونه	sig	Rwp (%)	Rexp (%)
Gd5	۱/۴۰	۸/۵۰	۷/۱۸
Ce2	۱/۶۸	۸/۷۳	۵/۱۸
Ce2Gd5	۱/۷۵	۷/۸۰	۴/۶۳

همانطور که از جدول (۱) می‌توان نتیجه گرفت، مقدار پارامتر sig کمتر از ۲ و مقدار پارامتر  $X^2$  بیشتر از ۱ بدست می‌آید که نشان می‌دهد آنالیزها قابل اعتماد هستند و مقادیر به دست آمده قابل قبول می‌باشند. درصدهای فاز بلوری نمونه‌های HAP تولید شده، حاصل از انجام آنالیز ریتولد با استفاده از نرم‌افزار MAUD در جدول (۲) آورده شده است.

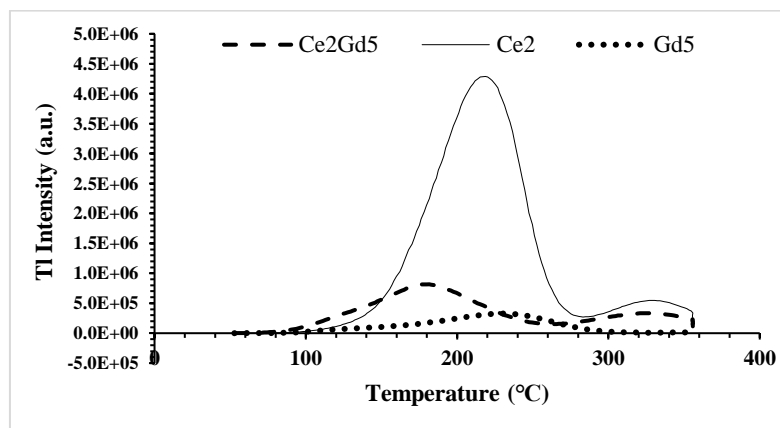
جدول ۲. درصد فازهای بلوری نمونه‌های HAP تولید شده حاصل از انجام آنالیز ریتولد با استفاده از نرم‌افزار MAUD.

نمونه	HAP (% هگزاگونال)	HAP (% مونوکلینیک)	$\beta$ -TCP (%)
Gd5	۱۳/۴۸	۸۶/۵۱	۰
Ce2	۰	۵۹/۱۳	۴۰/۸۶
Ce2Gd5	۱۰/۹۹	۴۵/۵۹	۴۳/۴۰

همانگونه که از جدول (۲) مشخص است، HAP تولید شده و آلاینده شده با ناخالصی‌ها ترکیبی از فازهای HAP هگزاگونال، HAP مونوکلینیک و یک فاز اضافی  $\beta$ -TCP می‌باشد.

### ۳.۳. منحنی درخشش و پاسخ دزیمتری ترمولومینسانس

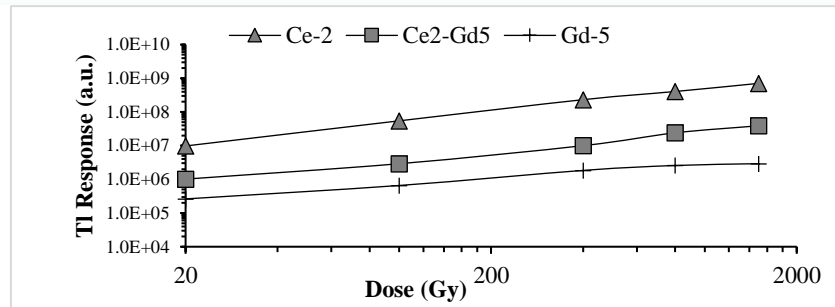
همانطور که در بخش‌های ۲-۳ و ۲-۴ ذکر شد، خوانش نمونه‌ها با استفاده از دستگاه خوانش گر TLD مدل TLD7102 و پرتودهی نمونه‌ها با استفاده از پرتوهای کبالت ۶۰ با استفاده از دستگاه گاماسل انجام شد. برای نمونه، منحنی‌های درخشش نمونه‌ها در دز ۴۰۰ Gy در شکل (۳) آورده شده است. منحنی‌های درخشش در سایر دزها نیز بطور مشابه بدست می‌آید.



شکل ۳. منحنی درخشش برای نمونه‌های Ce2Gd5 و Ce2، Gd5 در دز ۴۰۰ Gy.

پاسخ ترمولومینسانس در هر دز، با استفاده از مساحت زیر منحنی درخشش در آن دز بدست می‌آید. نمودار پاسخ ترمولومینسانس برحسب دز، برای سه نمونه‌ی ساخته شده در شکل (۴) آورده شده است.





شکل ۴. پاسخ ترمولومینسانس برحسب دز برای نمونه‌های  $Ce2 \cdot Gd5$  و  $Ce2Gd5$ .

پاسخ ترمولومینسانس نمونه‌ی  $Ce2$  تا دز  $800 \text{ Gy}$  با مقدار  $R^2 = 0.9954$  خطی بوده و پاسخ در  $1500 \text{ Gy}$  به اشباع می‌رسد. پاسخ ترمولومینسانس نمونه‌ی  $Gd5$  تا دز  $400 \text{ Gy}$  با  $R^2 = 0.9597$  خطی بوده و در  $800 \text{ Gy}$  به اشباع می‌رسد. پاسخ نمونه ترکیبی نیز تا  $800 \text{ Gy}$  با  $R^2 = 0.9921$  خطی بوده و در  $1500 \text{ Gy}$  به اشباع می‌رسد. همچنین می‌توان از شکل (۴) مشاهده کرد که پاسخ ترمولومینسانس  $Gd5$  کمتر از نمونه‌های دیگر است و پاسخ نمونه‌ی ترکیبی  $Ce2Gd5$  حد میانی پاسخ نمونه‌های آلاینده شده با یک ناخالصی می‌باشد که نشان‌دهنده‌ی این است که افزودن ناخالصی  $Ce2$  منجر به بهبود پاسخ ترمولومینسانس  $Gd5$  شده است. در پایان این نتیجه حاصل شد که در صورتیکه ناخالصی گادولونیم در ماده وجود داشته باشد به منظور بهبود پاسخ ترمولومینسانس می‌توان از ناخالصی سریم استفاده کرد. همچنین با مقایسه این نتایج با نتایج حاصل از آنالیز ریتولد، یعنی با مقایسه‌ی نتایج جدول (۲) و شکل (۴) می‌توان نتیجه گرفت که ممکن است تشکیل فاز  $\beta\text{-TCP}$  در نمونه‌های  $Ce2$  و  $Ce2Gd5$  منجر به بهبود پاسخ ترمولومینسانس شده باشد.

#### ۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله هیدروکسی اپتایت به روش هیدرترمال تولید شد و با ناخالصی‌های  $Ce2$  و  $Gd5$  و ناخالصی ترکیبی  $Ce2Gd5$  آلاینده شد. نتایج نشان داد که ساختار نمونه‌های تولید شده بصورت ترکیبی از فازهای HAP هگزگونال، HAP مونوکلینیک و همچنین فاز اضافی  $\beta\text{-TCP}$  می‌باشد. در ادامه، منحنی درخشش نمونه‌ها و نمودار پاسخ-دز بدست آمده، ارائه شد. نتایج نشان داد که افزودن ناخالصی  $Ce2$  منجر به بهبود پاسخ ترمولومینسانس ماده‌ی آلاینده شده با ناخالصی  $Gd5$  می‌شود. این نتیجه حاصل شد که در صورتیکه ناخالصی گادولونیم در ماده وجود داشته باشد می‌توان از ناخالصی سریم به منظور بهبود پاسخ ترمولومینسانس ماده استفاده کرد. همچنین از مقایسه نتایج حاصل از آنالیز ریتولد با نمودار پاسخ-دز این نتیجه حاصل شد که ممکن است تشکیل فاز  $\beta\text{-TCP}$  منجر به بهبود پاسخ ترمولومینسانس شده باشد. پس بطور کلی می‌توان نتیجه گرفت که افزودن ناخالصی و همچنین فازهای بلوری تشکیل شده در هنگام ساخت HAP می‌تواند بر پاسخ دزیمتری ترمولومینسانس تاثیرگذار باشد.



## ۵. منابع و مراجع

1. Azorin, J. 2014. Preparation methods of thermoluminescent materials for dosimetric applications: An overview. *Applied Radiation and Isotopes*, 83: 187-191.
2. Mckeever, S. W. S. 1985. Thermoluminescence of solids. London: Cambridge University Press.
3. Madhukumar, K., Varma, H. K., Manoj, K., Elias, T. S., Padmanabhan, V., Nair, C. M. K. 2007. Photoluminescence and thermoluminescence properties of tricalcium phosphate phosphors doped with dysprosium and europium. *Indian Academy of Sciences*, 30: 527-534.
4. Shafaei, M., Ziaie, F., Sardari, D., Larijani, M. M. 2015. Thermoluminescence properties of gamma-irradiated nano-structure hydroxyapatite. *Luminescence*, 31(1): 223-228.
5. Mohd Puad, N. A. S., Koshy, P., Abdullah, H. Z., Idris, M. I., Lee, T. C. 2019. Syntheses of hydroxyapatite from natural sources. *Heliyon*, 5(5): e01588.
6. A. Khanafari, T. Akbari, and M. R. Sohrabi, "Comparison of nano-hydroxyapatite productivity by *Pseudomonas aeruginosa* and *Serratia marcescense* through encapsulation method," *Nanomedicine Journal*, vol. 1, pp. 276-284, 2014.
7. N. M. Pu'ad, P. Koshy, H. Abdullah, M. Idris, and T. Lee, "Syntheses of hydroxyapatite from natural sources," *Heliyon*, vol. 5, p. e01588, 2019.
8. M. Sadat-Shojai, M.-T. Khorasani, E. Dinpanah-Khoshdargi, and A. Jamshidi, "Synthesis methods for nanosized hydroxyapatite with diverse structures," *Acta biomaterialia*, vol. 9, pp. 7591-7621, 2013.
9. H. Daneshvar, M. Shafaei, F. Manouchehri, S. Kakaei, and F. Ziaie, "Influence of morphology and chemical processes on thermoluminescence response of irradiated nanostructured hydroxyapatite," *Journal of Luminescence*, vol. 219, p. 116906, 2020.
10. 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*, vol. 17, pp. 2809-2815, 2017.
11. D. Haverty, S. A. Tofail, K. T. Stanton, and J. B. McMonagle, "Structure and stability of hydroxyapatite: density functional calculation and Rietveld analysis," *Physical Review B*, vol. 71, p. 094103, 2005.
12. R. Pérez-Solis, J. Gervacio-Arciniega, B. Joseph, M. Mendoza, and A. Moreno, "Synthesis and characterization of a monoclinic crystalline phase of hydroxyapatite by synchrotron X-ray powder diffraction and piezoresponse force microscopy," *Crystals*, vol. 8, p. 458, 2018.
13. Ma, T., Xia, Z., & Liao, L. (2011). Effect of reaction systems and surfactant additives on the morphology evolution of hydroxyapatite nanorods obtained via a hydrothermal route. *Applied Surface Science*, 257(9), 4384-4388.
14. A. Barrera-Villatoro, C. Boronat, T. Rivera-Montalvo, V. Correcher, J. Garcia-Guinea, and J. Zarate-Medina, "Cathodo- and thermally stimulated luminescence characterization of synthetic calcium phosphates," *Spectroscopy Letters*, vol. 51, pp. 22-26, 2018.
15. Lutterotti, L. (2010). Total pattern fitting for the combined size-strain-stress-texture determination in thin film diffraction. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 268(3-4), 334-340.
16. B. H. Toby, "R factors in Rietveld analysis: how good is good enough?," *Powder diffraction*, vol. 21, pp. 67-70, 2006.
17. Y. Pan, J.-L. Huang, and C. Shao, "Preparation of  $\beta$ -TCP with high thermal stability by solid reaction route," *Journal of materials science*, vol. 38, pp. 1049-1056, 2003.
18. X. Guo, H. Yan, S. Zhao, Z. Li, Y. Li, and X. Liang, "Effect of calcining temperature on particle size of hydroxyapatite synthesized by solid-state reaction at room temperature," *Advanced Powder Technology*, vol. 24, pp. 1034-1038, 2013.