



سنتز هیدروکسی اپتایت آلاییده با ناخالصی تکی و ترکیبی و بررسی اثر فاز بلوری تشکیل یافته بر پاسخ ترمولومینسانس آن در مقابل پرتوهای گاما

پریسا تقی‌پور نیار^۱، فرهاد ذوالفقارپور^۱، فرهود ضیائی^۲، حمیده دانشور^{۲*}

۱. گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه محقق اردبیلی، صندوق پستی: ۱۷۹، اردبیل - ایران
۲. پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۳۶۵-۳۴۸۶، تهران - ایران

*Email: hdaneshvar@aeoi.org.ir

مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۵/۳۰ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۱۰/۲۵

چکیده

در این کار پژوهشی، نمونه‌های هیدروکسی اپتایت آلاییده با ناخالصی‌های سریم، گادولونیم و ترکیبی از این دو ناخالصی به روش هیدروترمال سنتز شدند. به منظور بررسی فازهای بلوری تشکیل یافته در هر کدام از نمونه‌های سنتز شده، از کد MAUD که یک نرم‌افزار برای تجزیه و تحلیل ساختار ماده با استفاده از پراش بر اساس روش ریتولد است، استفاده شد. پاسخ دزیمتری ترمولومینسانس نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفت و یافته‌ها نشان داد که پاسخ ترمولومینسانس نمونه آلاییده با ناخالصی ترکیبی، سطح میانی پاسخ ترمولومینسانس نمونه‌های آلاییده با یک ناخالصی است. مشخص شد که افزودن ناخالصی سریم می‌تواند پاسخ ترمولومینسانس نمونه آلاییده با گادولونیم را بهبود بخشد. هم‌چنین نتایج حاصل از انجام آنالیز ریتولد نشان داد که فازهای تشکیل‌دهنده هیدروکسی اپتایت می‌تواند بر پاسخ دزیمتری ترمولومینسانس آن مؤثر باشد.

کلیدواژه‌ها: دزیمتری، ترمولومینسانس، هیدروترمال، روش ریتولد، فاز کریستالی، هیدروکسی اپتایت

Synthesis of hydroxyapatite doped with single and compound dopants and study upon the effect of crystal phase on its thermoluminescence response irradiated by gamma rays

P. Taghipour Niar¹, F. Zolfagharpour¹, F. Ziaie², H. Daneshvar^{2*}

1. Department of Physics, Faculty of Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, P.O. Box: 179, Ardabil - Iran

2. Radiation Application Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 11365-3486, Tehran - Iran

Research Article

Received 21.8.2021, Accepted 15.1.2022

Abstract

In this research work, hydroxyapatite samples doped with cerium, gadolinium, and a combination of these two dopants were synthesized through the hydrothermal method. MAUD code, a material diffraction analysis software based on the Rietveld method, was used to investigate the formed crystal phases in synthesized samples. The thermoluminescence dosimetry response of the samples was investigated, and the results showed that the thermoluminescence response of the sample doped with the compound dopants is the median level of the thermoluminescence response of the samples doped with one dopant. It was found that adding cerium dopant could improve the thermoluminescence response of the sample doped with gadolinium. Also, the results of Rietveld refinements showed that the formed phases of hydroxyapatite could affect the thermoluminescence dosimetry response.

Keywords: Dosimetry, Thermoluminescence, Hydrothermal, Rietveld method, Crystal phase, Hydroxyapatite



۱. مقدمه

ترمولومینسانس^۱ (TL) شامل دو واژه است، ترمو به معنای گرما و لومینسانس به معنای گسیل نور.

ترمولومینسانس یا به عبارت دیگر لومینسانس تحریک شده با گرما، نوری است که یک ماده جامد (معمولاً یک عایق یا یک نیمه‌هادی)، هنگامی که در معرض تابش یون‌ساز قرار گرفته و سپس گرم می‌شود، از خود گسیل می‌کند [۱، ۲].

بنابراین روش دزیمتری ترمولومینسانس به این ترتیب انجام می‌گیرد: (۱) ابتدا ماده ترمولومینسانس توسط پرتوهای یون‌ساز هم‌چون پرتوهای X و گاما، اشعه فرابنفش، پرتوهای بتا و نوترون، پرتوهای شده (۲) ماده پس از پرتوگیری در داخل دستگاه خوانش‌گر قرار گرفته و در محدوده دمایی مشخصی (معمولاً ۵۰°C تا ۳۵۰°C) با نرخ گرمادهی ثابتی گرم می‌شود. در طول گرمادهی، شدت ترمولومینسانس توسط یک لوله فوتومالتی‌پلایر (PMT)^۲ و یک دستگاه شمارش پالس آشکارسازی شده و به‌صورت تابعی از زمان یا دما ثبت می‌شود و یک منحنی به دست می‌آید که منحنی TL یا منحنی درخشش^۳ نامیده می‌شود و شامل یک یا چند قله است. در واقع منحنی درخشش خروجی بار الکتریکی خوانش‌گر برحسب دماست. قله دمایی در منحنی درخشش دارای بیش‌ترین شدت بوده و دارای پایداری بالایی است و تحت تأثیر اثرات محوشدگی قرار نمی‌گیرد. این مشخصه برای تعیین دقیق دز مفروض نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد. مبنای استفاده از دزیمتری ترمولومینسانس بر این است که مقدار تابش لومینسانس کلی با مقدار دز جذب شده از تابشی که ماده در معرض آن قرار گرفته متناسب است. افزایش شدت منحنی درخشش با افزایش دز را می‌توان به این حقیقت نسبت داد که با افزایش دز، به تدریج دام‌های بیش‌تری که منشأ قله درخشش هستند، پر می‌شوند. یادآور می‌شود که تکرار حرارت‌دهی نمی‌تواند هیچ‌گونه گسیل نوری تولید کند، مگر این‌که نمونه مجدداً توسط تابش‌های یون‌ساز پرتودهی شود [۳، ۴].

موادی که رفتار ترمولومینسانس از خود نشان می‌دهند، مواد ترمولومینسانس نامیده می‌شوند و می‌توانند به عنوان آشکارساز یا دزیمتر پرتوهای یون‌ساز مورد استفاده قرار گیرند. بسیاری از مواد معدنی طبیعی و ترکیبات غیرآلی مصنوعی خاصیت ترمولومینسانس را نشان می‌دهند، اما فقط برخی از آن‌ها شرایط لازم برای مورد استفاده قرار گرفتن به عنوان دزیمتر

1. Thermoluminescence
2. Photomultiplier
3. Glow Curve

ترمولومینسانس را برآورده می‌کنند. چند مورد از این شرایط عبارتند از عایق یا نیمه‌رسانا بودن، قابلیت ذخیره کردن انرژی در هنگام قرار گرفتن در برابر پرتوهای یون‌ساز، حساسیت بالا، قابلیت تکرارپذیری، پایداری بالا در مدت زمان طولانی، خطی بودن پاسخ در محدوده وسیعی از دز. چنین موادی را دزیمتر ترمولومینسانس نامیده و با علامت اختصاری TLD^۴ نشان می‌دهند [۵، ۶].

بلورهای کلسیم فسفات مواد بسیار مناسبی برای کاربردهای دزیمتری ترمولومینسانس TLD هستند و به‌طور گسترده‌ای به عنوان مواد مناسب برای TLD مورد استفاده قرار می‌گیرند [۷]. هیدروکسی اپتایت (HAP)^۵ با رابطه استوکیومتری $[Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2]$ ، یک شکل غیرآلی از کلسیم اپتایت، یکی از مهم‌ترین ترکیبات کلسیم فسفات بوده و اصلی‌ترین ماده سازنده استخوان‌ها و دندان‌های انسان است؛ به‌طوری‌که تقریباً ۹۵-۹۷ درصد از مینای دندان، ۷۵-۷۰ درصد از استخوان دندان و ۷۰-۶۰ درصد از استخوان‌های بدن از HAP ساخته شده است [۸]. HAP یک سرامیک زیست‌سازگار و زیست‌فعال است، که قادر به تعامل و پیوند شیمیایی با استخوان نیز است [۹-۱۱].

هیدروکسی اپتایت را می‌توان به‌طور طبیعی از منابع طبیعی استخراج کرد و یا آن را به‌طور شیمیایی سنتز کرده و HAP مصنوعی به‌دست 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^۶ و مکانیکی-شیمیایی^۷)، روش‌های تر (رسوب شیمیایی^۸، هیدرولیز^۹، سل ژل^{۱۰}، هیدروترمال^{۱۱}، امولسیون^{۱۲} و سونو شیمیایی^{۱۳}) و فرایندهای دمای بالا (احتراق^{۱۴} و پیرولیز^{۱۵}) سنتز کرد [۹-۱۱].

4. Thermo Luminescence Dosimeter

5. Hydroxyapatite

6. Solid-State Reaction

7. Mechanochemical

8. Chemical Precipitation

9. Hydrolysis

10. Sol-Gel

11. Hydrothermal

12. Emulsion

13. Sonochemical

14. Combustion

15. Pyrolysis



ناخالصی‌های مناسب با در نظرگیری سهولت در دسترسی و تهیه مواد انجام شده است.

هدف از انجام این پژوهش بررسی ساختار بلوری و نیز پاسخ دزیمتری ترمولومینسانس نمونه HAP آلاینده با ناخالصی‌های سریم و گادولونیوم و ترکیبی از این دو است که با استفاده از نرم‌افزار MAUD مورد تحلیل فازی قرار گرفته و پس از پرتودهی و خوانش، پاسخ ترمولومینسانس آن‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. نوآوری این تحقیق در آرایش هیدروکسی اپتایت با ناخالصی ترکیبی و بررسی خصوصیات ترمولومینسانس آن است که تاکنون در مقالات به این موضوع پرداخته نشده است. یکی دیگر از نوآوری‌های این تحقیق بررسی فازی بلوری تشکیل یافته هیدروکسی اپتایت (هگزگونال و مونوکلینیک) به هنگام سنتز است که در تعداد اندکی از مقالات بدون در نظر گرفتن جنبه دزیمتری ترمولومینسانس مورد بررسی قرار گرفته است [۱۲-۱۵].

۲. مواد و روش‌ها

۱.۲ تهیه نمونه‌ها

در این کار، از روش هیدروترمال برای تولید نمونه‌های HAP استفاده شد. این روش بر مبنای کاری است که در پژوهشکده علوم و فن‌آوری مواد در دانشگاه علوم زمین چین انجام شده است [۱۹]. در این روش از نیترات کلسیم (Merck ۹۹٪) $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ، دی آمونیم فسفات (Merck ۹۹٪) $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ ، سود (Merck ۹۹٪) NaOH ، اولئیک اسید (Fluka ۹۹٪)، و اتانول (Sigma Aldrich ۹۹٪) به عنوان مواد اولیه و نیز از نیترات لانتانیدها برای آلاینده با ناخالصی‌ها استفاده می‌شود. در ابتدا سود با آب مقطر مخلوط شده و پس از آن مقادیر مورد نیاز از اولئیک اسید و اتانول به مخلوط اضافه می‌گردد. سپس عامل کلسیم اضافه شد و به مدت نیم ساعت واکنش ادامه پیدا می‌کند. سپس عامل فسفات اضافه شده و به مدت یک ساعت این روند ادامه می‌یابد.

افزودن ناخالصی به این ترتیب انجام شده؛ به نسبتی که از غلظت عامل کلسیم کاسته شده، به غلظت نیترات ناخالصی اضافه می‌گردد، به گونه‌ای که در رابطه استوکیومتری $\text{Ca}_{1-x} \text{M}_x(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ نسبت $[\text{Ca}+\text{M}]/\text{P}=1/67$ ثابت باشد. همچنین اضافه کردن ناخالصی ترکیبی نیز باید به گونه‌ای باشد که در رابطه استوکیومتری $\text{Ca}_{1-x-y} \text{M}_{1x} \text{M}_{2y} (\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ نسبت $[\text{Ca}+\text{M}_1+\text{M}_2]/\text{P}=1/67$ ثابت باشد. نمونه‌های HAP تولید شده ابتدا با ۵ درصد مولی عنصر ناخالصی گادولونیوم (Gd) و سپس با

ساختار بلوری HAP می‌تواند به دو شکل هگزگونال با گروه فضایی $\text{P6}_3/\text{m}$ ، مونوکلینیک با گروه فضایی $\text{P2}_1/\text{b}$ و یا ترکیبی از این دو باشد [۱۲-۱۵].

منحنی درخشش ماده هیدروکسی اپتایت دارای یک قله مشخص در حوالی 200°C است. این قله امکان مناسبی برای استفاده از این ماده در دزیمتری ترمولومینسانس فراهم می‌کند. پژوهشگران دریافته‌اند که ساختار منحنی درخشش به فاز بلوری ماده ترمولومینسانس وابسته است. تغییر فاز می‌تواند در نتیجه تغییر دما یا اعمال فشار خارجی باشد و تغییرات دمایی با استفاده از عملیات حرارتی آسان‌ترین روش جهت ایجاد تغییر فاز است. برای مثال، رینی^۱ و همکارانش تأثیر فازهای مختلف بر منحنی درخشش بوهمیت^۲ را مورد بررسی قرار داده و نشان دادند که ساختار منحنی درخشش متأثر از تغییر فاز است. از آنجایی که هرگونه تغییر در ساختار منحنی درخشش می‌تواند خطایی را در برآورد دزهای تابش ایجاد کند، از این رو مطالعه ساختار فازی به لحاظ کاربردی حایز اهمیت است [۱۶]. با توجه به این که تغییر فاز روی خواص مختلف HAP تأثیر می‌گذارد، لازم است بدانیم که آیا HAP تحت تغییر فاز ساختاری قرار دارد یا نه؟ در این مقاله به این مسأله نیز پرداخته شده است.

ترکیبات خالص، سیگنال TL ضعیفی را نشان می‌دهند و به همین خاطر مواد دزیمتری کارآمد محسوب نمی‌شوند. با آلاینده‌ها چنین موادی با ناخالصی‌های مناسب که به‌عنوان فعال ساز پدیده ترمولومینسانس عمل می‌کنند، بازده بسیار بالاتری حاصل می‌شود. به دلیل این امر در کار حاضر از ناخالصی‌های مختلفی بدین منظور استفاده شده است. 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 شبکه بلور می‌شوند، عامل ایجاد سطوح انرژی و مراکز گیراندازی در بلور بوده و از نظر مقدار در حد چند مول درصد هستند [۵]. اخیراً متخصصان از عناصر کمیاب خاکی برای افزایش خاصیت ترمولومینسانس مواد استفاده می‌کنند. از مهم‌ترین این عناصر لانتانیدها هستند. آرایش با ناخالصی نیز می‌تواند به دو صورت تکی و ترکیبی انجام شود [۱۷، ۱۸]. در این کار انتخاب

1. Rani
2. Boehmite



آنالیز کمی توسط الگوی پراش XRD، روش ریتولد^۳ است. این روش اولین بار توسط هوگو. ام. ریتولد در سال ۱۹۶۷ معرفی گردید و امروزه با گسترش استفاده از کامپیوتر، به کارگیری این روش بسیار متداول شده است. روش ریتولد از روش ریاضی حداقل مربعات برای برازش مقادیر تجربی (مشاهده شده) و تئوری (محاسبه شده) استفاده می‌کند [۲۴]. نرم‌افزار MAUD یک نرم‌افزار تحلیل و بررسی با استفاده از پراش است که براساس روش ریتولد عمل می‌کند. با استفاده از این نرم‌افزار می‌توان فازهای تشکیل‌دهنده ماده را شناسایی کرده و درصد هر کدام از فازهای تشکیل شده را به دست آورد. این نرم‌افزار را می‌توان از وبسایت (<http://maud.radiographema.eu/>) دانلود و نصب کرد [۲۵-۲۷].

در این نرم‌افزار الگوی تجربی به صورت نقاط، الگوی محاسباتی منطبق شده به صورت خط و اختلاف بین آن‌ها (الگوی باقی‌مانده) به صورت نوار باریک در زیر هر نمودار نشان داده می‌شود. فایل متنی مورد نیاز برای استفاده در این نرم‌افزار شامل اطلاعات کریستالوگرافی ماده است که فایل اطلاعات کریستالوگرافی (CIF)^۴ نامیده می‌شود و به صورت رایگان از سایت (COD)^۵ (<http://crystallography.net/>) قابل دانلود است. همان‌گونه که ذکر شد این نرم‌افزار بر اساس روش ریتولد است که در این روش سعی می‌شود از طریق اصلاح پارامترهای شبکه، فاکتور مقیاس، پارامترهای اتمی و ... میزان اختلاف بین الگوی تجربی و محاسباتی به حداقل برسد. اما ممکن است انطباق ۱۰۰ درصدی حاصل نشود. بنابراین در این نرم‌افزار از دو کمیت sig و X^2 برای بررسی قابل قبول بودن میزان انطباق استفاده می‌شود. کمیت X^2 به صورت $(Rwp/Rexp)^2$ تعریف شده و "میزان خوب بودن انطباق"^۶ را نشان می‌دهد. مقادیر Rwp و $Rexp$ ^۷ بهترین مقدار ممکن Rwp است) باید به گونه‌ای باشند که مقدار X^2 کم‌تر از ۱ نشود. اگر مقدار کمیت sig کم‌تر از ۲ و مقدار X^2 بیش‌تر از ۱ باشد، در این صورت می‌توان گفت که تحلیل و بررسی انجام یافته قابل اعتماد و نتایج به دست آمده از آن قابل قبول می‌نماید [۲۵، ۲۸، ۲۹].

۲ درصد مولی عنصر ناخالصی سریم (Ce) و در نهایت با ترکیبی از ۵ درصد گادولونیوم و ۲ درصد سریم آلاییده شد. برای راحتی از نماد Ce_2Gd_5 و Ce_2Gd_5 برای این نمونه‌ها استفاده می‌شود که در آن عددهای ۲ و ۵ در کنار نام ناخالصی به درصد مولی مربوط به آن ناخالصی اشاره دارد. همچنین نمونه بدون آلایش با نام Pure HAP در شکل‌ها مشخص شده است.

درصدهای ۲ و ۵ در این مقاله به دلیل بهینه‌سازی انجام یافته در کار قبلی دکتر ضیایی و همکارانش انتخاب شده‌اند که در آن نمونه Ce_2 دارای بیش‌ترین پاسخ ترمولومینسانس و نمونه Gd_5 دارای کم‌ترین پاسخ ترمولومینسانس بود و هدف ما در این مقاله افزودن ناخالصی Ce_2 به منظور بررسی افزایش پاسخ ترمولومینسانس نمونه Gd_5 است [۲۰، ۲۱].

مواد تولید شده در داخل اتوکلاو با دمای $120^\circ C$ 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 $110^\circ C$ به مدت ۲۴ ساعت خشک شد. مرحله نهایی ساخت، کلسینه کردن نمونه‌ها در دمای $800^\circ C$ و به مدت ۲ ساعت بود. این فرایند با توجه به تجارب گذشته از آزمایش‌های سنتز به دست آمده است [۲۲، ۲۳].

۲.۲ روش‌های آنالیز

۱.۲.۲ آنالیز به روش XRD

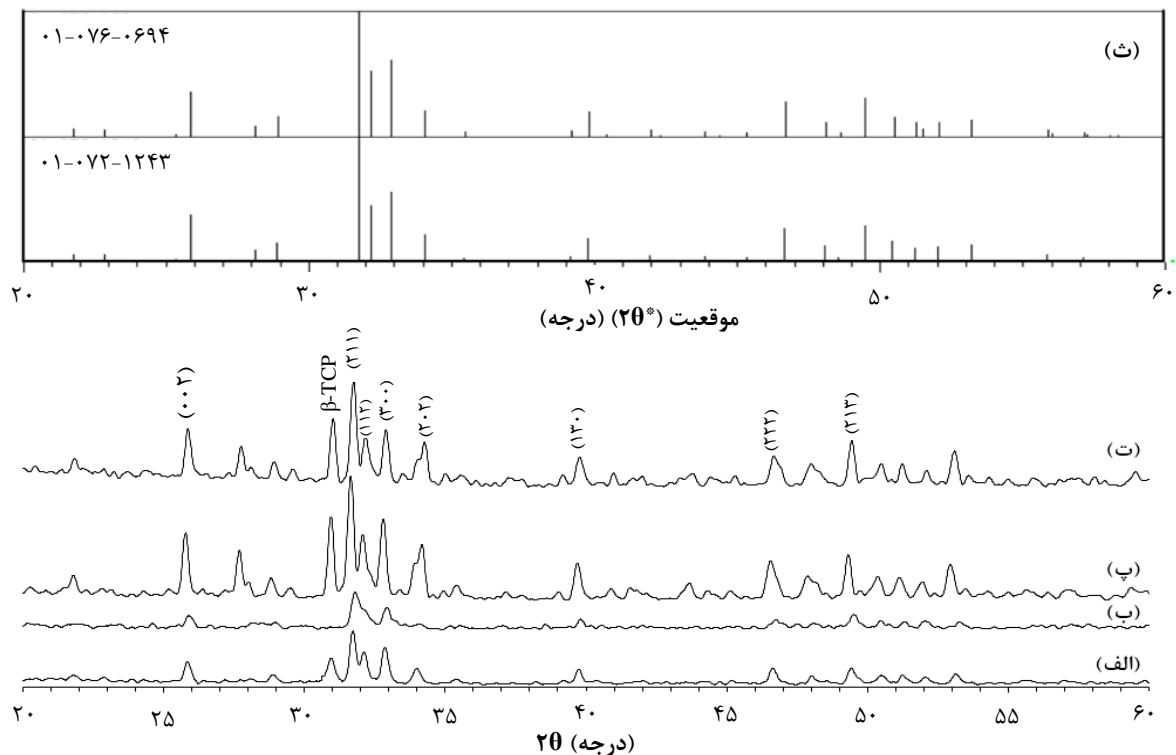
الگوی پراش نمونه‌ها که در شکل ۱ آورده شده است به روش XRD^۱ با استفاده از تابش $K\alpha$ مربوط به مس در ولتاژ ۴۰ kV و جریان ۴۰ mA و در محدوده زاویه‌ای $2\theta < 60^\circ$ و با استفاده از دستگاه STOE STADI-MP موجود در پژوهشکده مواد و سوخت هسته‌ای پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای به دست آمد.

۲.۲.۲ آنالیز ریتولد با استفاده از نرم‌افزار MAUD^۲

بررسی الگوی پراش نمونه، اطلاعات بسیاری در رابطه با ساختار بلوری ماده به دست می‌دهد که نحوه‌ی استخراج این اطلاعات خود یک کار تخصصی به شمار می‌رود. تحلیل یا پالایش اطلاعات بدین صورت است که ابتدا توسط روش XRD اطلاعات اولیه‌ای در مورد ساختار بلوری ماده به دست آورده و سپس با استفاده از روش‌های ریاضی، سعی می‌شود بهترین توافق ممکن بین محاسبات و مشاهدات در مورد قله‌های موجود در الگوی پراش، به دست آید. یکی از معروف‌ترین روش‌های

3. Rietveld
4. Crystallographic Information File
5. Crystallographic Open Database
6. Goodness of Fit Parameter
7. Weighted Profile R-Factor
8. Expected R Factor





شکل ۱. الگوی پراش XRD برای نمونه‌های HAP (الف) بدون آلیاژ، آلیاژ (ب) با Gd_5 ، Ce_2 (پ) و (ت) Ce_2Gd_5 الگوی HAP استاندارد حاصل از مراجع ICDD.

HAP مونوکلینیک با شماره کارت‌های ۰۱-۰۷۲-۱۲۴۳ و ۰۱-۰۷۶-۰۶۴۹ به ترتیب برای ساختار هگزاگونال و مونوکلینیک هستند. الگوی استاندارد HAP هگزاگونال و مونوکلینیک حاصل از مراجع ICDD در شکل ۱ نشان داده شده است. همچنین مشخص شد که یک فاز اضافی از ماده بتاتری کلسیم فسفات^۲ (β -TCP) با شماره کارت ۰۱-۰۸۶-۱۵۸۵ در داخل نمونه‌های تولید شده موجود است که این فاز در ماده به خاطر دمای بالای کلسیناسیون تشکیل شده است. زیرا در دماهای بالا این امکان وجود دارد که HAP به β -TCP تبدیل شود [۳۳، ۳۴].

همان‌گونه که از شکل ۱ می‌توان مشاهده کرد، تعدادی از قله‌ها بین شکل ۱ ب و ۱ پ جابه‌جا شده‌اند که دلیل این امر آلیاژ با ناخالصی است. آلیاژ منجر به جابه‌جایی جزئی تعدادی از قله‌ها در برخی از زوایا می‌شود که این جابه‌جایی به نوع ناخالصی، غلظت ناخالصی و محلی که ناخالصی اشغال می‌کند، بستگی دارد. دلیل اصلی جابه‌جایی قله‌ها در اثر آلیاژ، تغییر ثابت شبکه و تفاوت در شعاع یونی ناخالصی‌ها است [۳۵-۳۸].

نتایج حاصل از انجام آنالیز ریتولد با استفاده از نرم‌افزار MAUD برای HAP (الف) بدون آلیاژ و آلیاژ با Gd_5 ، Ce_2 (پ) و Ce_2Gd_5 (ت) در شکل ۲ نمایش داده شده است.

۳.۲.۲ پرتودهی نمونه‌ها

پرتودهی نمونه‌ها با استفاده از پرتوهای کبالت ۶۰ با استفاده از دستگاه گاماسیل موجود در آزمایشگاه دزیمتری پژوهشکده کاربرد پرتوها از ۲۰ Gy تا ۱۵۰۰ Gy انجام شد.

۴.۲.۲ قرائت نمونه‌ها

برای خوانش نمونه‌ها از دستگاه خوانش‌گر TLD مدل TLD۷۱۰۲ ساخت انستیتو فیزیک ایران موجود در آزمایشگاه دزیمتری پژوهشکده کاربرد پرتوها و در محدوده دمایی $50^{\circ}C$ تا $350^{\circ}C$ با آهنگ گرمایی $5^{\circ}C/s$ استفاده شد. خوانش‌گرهای ساخته شده توسط این شرکت در پژوهش‌های بسیاری مورد استفاده قرار گرفته است [۳۰، ۳۱]. فعالیت‌های مربوط به انواع آزمون‌های خوانش‌گر که شامل آزمون‌های دقت، صحت، تکرارپذیری و ... می‌شود، نیز توسط محققان انجام شده است [۳۲].

۳. بحث و نتایج

۱.۳ الگوی پراش (XRD) نمونه‌ها

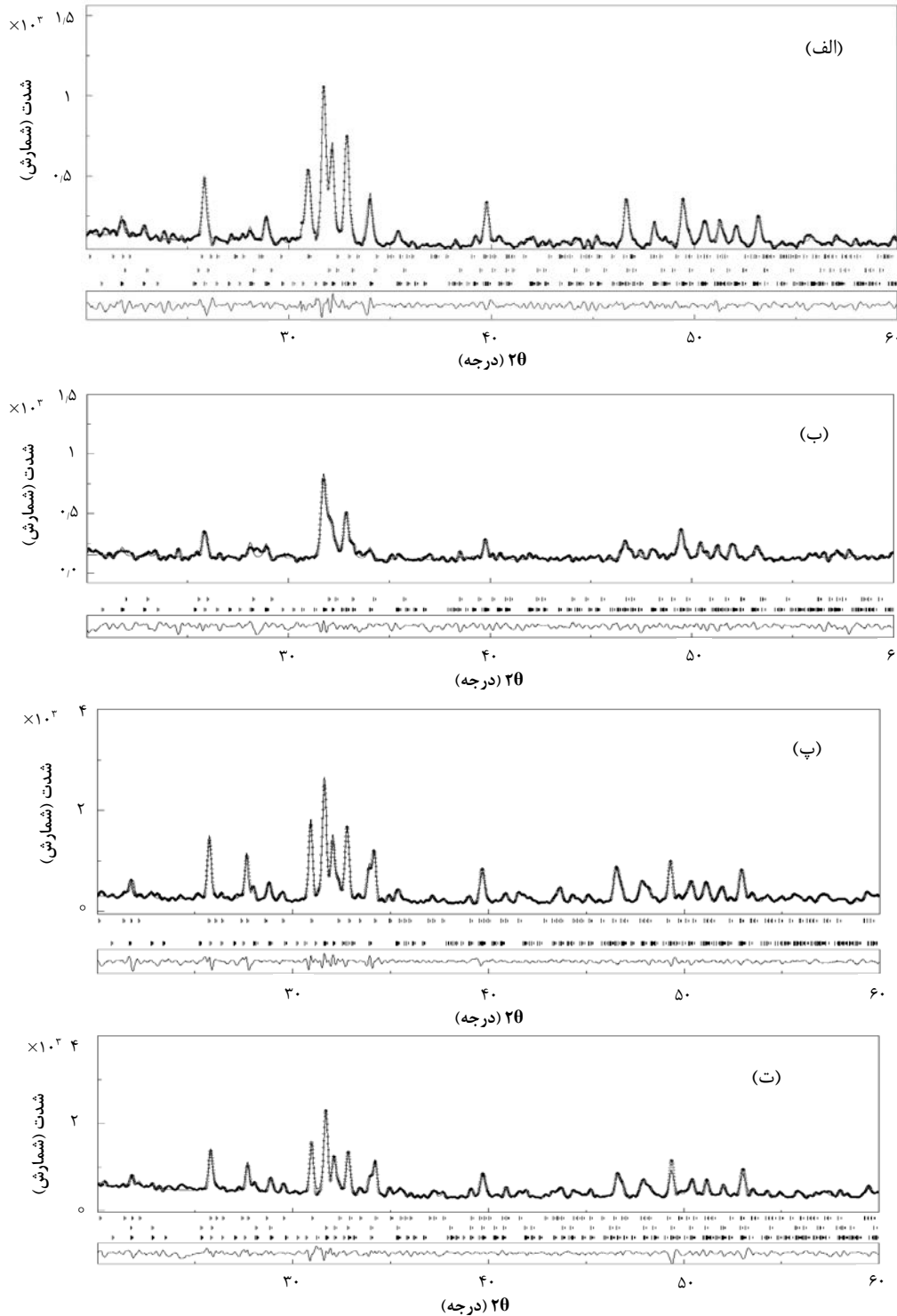
شکل (۱ الف، ب، پ و ت) به ترتیب الگوی پراش نمونه‌های HAP بدون آلیاژ، آلیاژ با Gd_5 ، Ce_2 و Ce_2Gd_5 را نشان می‌دهد.

مقایسه الگوهای XRD به دست آمده با مراجع ICDD^۱ نشان می‌دهد که مواد تولید شده ترکیبی از HAP هگزاگونال و



از هم قابل تشخیص هستند. در این مرحله از فایل‌های CIF با شناسه‌ی ۲۳۰۰۲۷۳ و ۷۲۱۷۸۹۲ و ۱۵۱۷۲۳۸ به ترتیب برای فازهای HAP هگزاگونال، HAP مونوکلینیک و β -TCP استفاده شده است. جزییات انجام آنالیز ریتولد در جدول ۱ آورده شده است.

همان‌گونه که از شکل ۲ مشاهده می‌شود، نمودار حاصل از آنالیز ریتولد به خوبی با الگوی پراش نمونه‌ها مطابقت دارد و تمام قله‌ها شناسایی و منطبق شده‌اند و به این معنی است که آنالیز به درستی صورت گرفته است. در این شکل نقطه‌ها نشان دهنده الگوی پراش تجربی نمونه و خط نشان‌دهنده الگوی محاسبه شده است که به دلیل انطباق خوبی که دارند به سختی



شکل ۲. نتایج آنالیز ریتولد با استفاده از نرم‌افزار MAUD برای HAP (الف) بدون آلیش، آلاییده با (ب) Gd_5 ، (پ) Ce_2 ، و (ت) Ce_2Gd_5 . نقطه‌ها نشان‌دهنده الگوی پراش نمونه و خط نشان‌دهنده نمودار حاصل از آنالیز ریتولد. موقعیت هر قله با خط‌های عمودی کوچک در زیر هر نمودار نشان داده شده است. نوار باریک در زیر هر نمودار نیز مربوط به اختلاف مقادیر تجربی (مشاهده شده) و تئوری (محاسبه شده) است.



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

نمونه	هگزآگونال (%)	مونوکلینیک (%)	β -TCP (%)
Pure HAP	۱۶,۱۶	۷۶,۳۷	۷,۴۷
Gd δ	۱۳,۴۸	۸۶,۵۱	۰
Ce γ	۰	۵۹,۱۳	۴۰,۸۶
Ce γ Gd δ	۱۰,۹۹	۴۵,۵۹	۴۳,۴۰

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

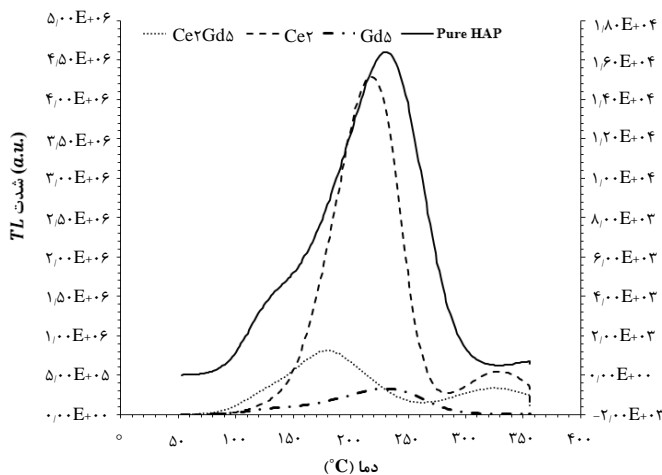
نمونه	Rwp (%)	Rexp (%)	sig
Pure HAP	۱۱,۴۴	۸,۴۸	۱,۳۴
Gd δ	۸,۵۰	۷,۱۸	۱,۴۰
Ce γ	۸,۷۳	۵,۱۸	۱,۶۸
Ce γ Gd δ	۷,۸۰	۴,۶۳	۱,۷۵

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

همان‌گونه که از جدول ۲ مشخص است، نمونه‌ها دارای ترکیبی از فازهای HAP هگزآگونال، HAP مونوکلینیک و یک فاز اضافی β -TCP هستند.

۳.۳ منحنی درخشش و پاسخ دزیمتری ترمولومینسانس

منحنی‌های درخشش نمونه‌ها در دز ۴۰۰ Gy در شکل ۳ آورده شده است. منحنی‌های درخشش در سایر دزها نیز به شکل مشابه به دست آمد. همان‌طور که از شکل ۳ مشخص است نمونه بدون آرایش درخشش ضعیف‌تری دارد که به منظور بزرگ‌نمایی و نیز مقایسه بهتر، محور عمودی مربوط به آن به صورت محور ثانویه رسم شده است. نمونه‌های آلییده درخشش بالاتری دارند که طبق توضیحاتی که در بخش مقدمه ارائه شد، این نتیجه قابل پیش‌بینی بود. دمای قله در منحنی درخشش مربوط به نمونه بدون آرایش و نمونه‌های Ce γ , Gd δ و Ce γ Gd δ به ترتیب 230°C ، 240°C و 180°C می‌باشد. ارتفاع قله نمونه Ce γ بیش‌تر از نمونه‌های دیگر است و بنابراین مساحت زیر سطح نمودار بالاتر و پاسخ بالاتری دارد. نمونه بدون آرایش کم‌ترین ارتفاع قله را دارد. بنابراین دارای کم‌ترین مساحت زیر نمودار و در نتیجه پایین‌ترین پاسخ است. در بین نمونه‌های آلییده، نمونه Gd δ دارای کم‌ترین ارتفاع قله و در نتیجه پایین‌ترین پاسخ است. ارتفاع قله نمونه ترکیبی Ce γ Gd δ حد میانی نمونه‌های تکی است. در نتیجه دارای سطح زیر نمودار و پاسخ بالاتر از نمونه Gd δ و پایین‌تر از نمونه Ce γ است. پاسخ ترمولومینسانس در هر دز، با استفاده از مساحت زیر منحنی درخشش در آن دز به دست می‌آید.

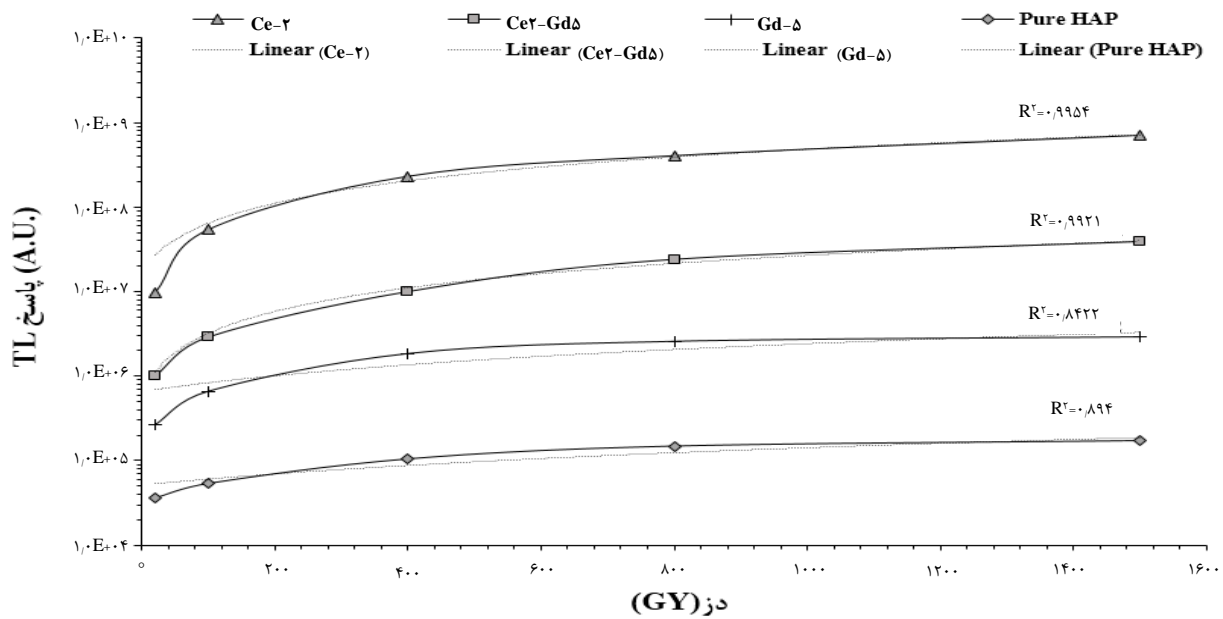


شکل ۳. منحنی درخشش برای نمونه‌های بدون آرایش و Ce γ , Gd δ و Ce γ Gd δ در دز ۴۰۰ Gy. محور عمودی ثانویه مربوط به نمونه بدون آرایش است.

نمودار پاسخ ترمولومینسانس بر حسب دز، برای نمونه‌های ساخته شده در شکل ۴ در مقیاس خطی-لگاریتمی رسم شده است.

از شکل ۴ می‌توان مشاهده کرد که نمونه بدون آرایش دارای پایین‌ترین پاسخ ترمولومینسانس و نمونه Ce γ دارای بالاترین پاسخ است. پاسخ ترمولومینسانس نمونه بدون آرایش تا دز ۴۰۰ Gy با مقدار $R^2=0,8940$ ، پاسخ خطی بوده و پاسخ در ۸۰۰ Gy به اشباع می‌رسد. پاسخ نمونه Ce γ تا دز ۱۵۰۰ Gy با مقدار $R^2=0,9954$ خطی بوده و پاسخ تا ۱۵۰۰ Gy به اشباع نمی‌رسد. پاسخ نمونه Gd δ تا دز ۴۰۰ Gy با $R^2=0,8422$ خطی بوده و در ۸۰۰ Gy به اشباع می‌رسد. پاسخ نمونه ترکیبی نیز تا ۱۵۰۰ Gy با $R^2=0,9921$ خطی بوده و تا ۱۵۰۰ Gy به اشباع نمی‌رسد. پاسخ نمونه Ce γ و نمونه ترکیبی تا دز ۱۵۰۰ Gy خطی است. بنابراین این دو نمونه برای دزیمتری در محدوده دز مورد بررسی ما یعنی ۲۰-۱۵۰۰ Gy قابل استفاده بوده و نمونه بهینه به لحاظ خطی بودن پاسخ هستند.





شکل ۴. پاسخ ترمولومینسانس برحسب دز برای نمونه‌های HAP بدون آلیش و آلاییده با Ce^{2+} ، Gd^{3+} و $\text{Ce}^{2+}\text{Gd}^{3+}$.

۴.۳ اثر محوشدگی

برای بررسی اثر محوشدگی، نمونه‌ها ابتدا تا 400°C و به مدت نیم ساعت در کوره بازپخت شده و پس از آن تا 400 Gy تابش داده شدند. اثر محوشدگی پاسخ در نمونه‌ها در بازه زمانی تقریباً ۳۰ روز پس از پرتودهی بررسی شد. پاسخ TL با استفاده از همان تجهیزات خوانش‌گر و در آهنگ گرمایی 5°C/s انجام شد. درصد محوشدگی نمونه‌ها در شکل ۵ نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل مشخص است، نمونه بدون آلیش در اولین روز پس از پرتودهی تقریباً ۹۸ درصد و پس از گذشت دو هفته تقریباً ۸۰ درصد پاسخ اولیه را داراست و بعد از آن پاسخ کاهش می‌یابد. به طوری که پس از ۳۰ روز حدود ۷۰ درصد از پاسخ اولیه را دارد که نشان‌دهنده محوشدن پاسخ است. بنابراین زمان بهینه بین پرتودهی و خوانش برای این ماده حداکثر دو هفته پس از پرتودهی برآورد شد. نمونه Ce^{2+} به لحاظ محوشدگی وضعیت مناسب‌تری دارد زیرا در بازه زمانی ۳۰ روزه بیش‌تر از ۹۰ درصد پاسخ اولیه را داراست و بنابراین زمان بهینه بین پرتودهی و خوانش برای آن در بازه مورد بررسی در این پژوهش، ۳۰ روز می‌باشد. زمان بهینه برای نمونه Gd^{3+} یک روز و برای نمونه $\text{Ce}^{2+}\text{Gd}^{3+}$ در همان روز پرتودهی می‌باشد. پس می‌توان نتیجه گرفت که نمونه Ce^{2+} نمونه بهینه از لحاظ اثر محوشدگی است زیرا ۳۰ روز پس از پرتودهی نیز قابلیت خوانش دارد. اما نمونه ترکیبی نتیجه مطلوبی به لحاظ اثر محوشدگی نشان نمی‌دهد که ممکن است دلیل این امر اعمال ۷ درصد ناخالصی باشد.

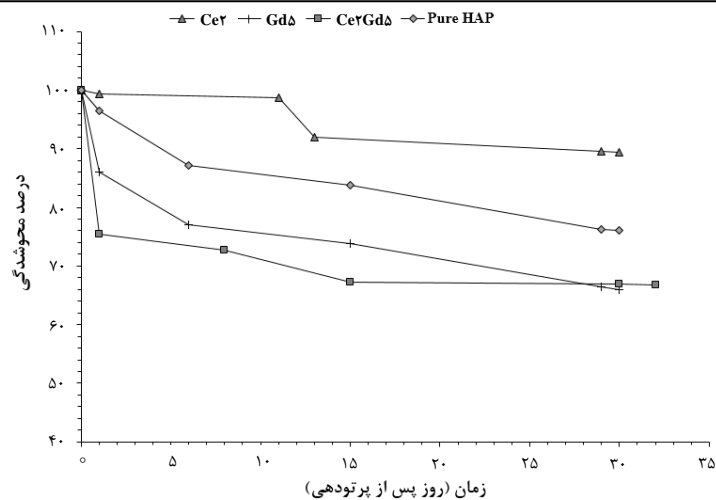
۵.۳ تکرارپذیری

پس از جمع‌بندی نتایج به دست آمده در بخش‌های قبل، نمونه بهینه برای اهداف دزیمتری در این تحقیق نمونه آلاییده با ناخالصی تکی سریم تعیین شد. در این بخش بررسی تکرارپذیری پاسخ برای نمونه بهینه انجام شده است. جهت برگشتن دام‌ها و یا بازترکیب ساختار مراکز به حالت اولیه قبل از پرتودهی، از بازپخت استاندارد استفاده شده است. این فرایند حرارتی در دمای 400°C و به مدت نیم ساعت انجام شده است. شکل ۶ نتایج تکرارپذیری برای نمونه آلاییده با Ce^{2+} را در ۵ مرحله نشان می‌دهد. درصد تغییرات پاسخ کمتر از $\pm 7\%$ به دست آمد.

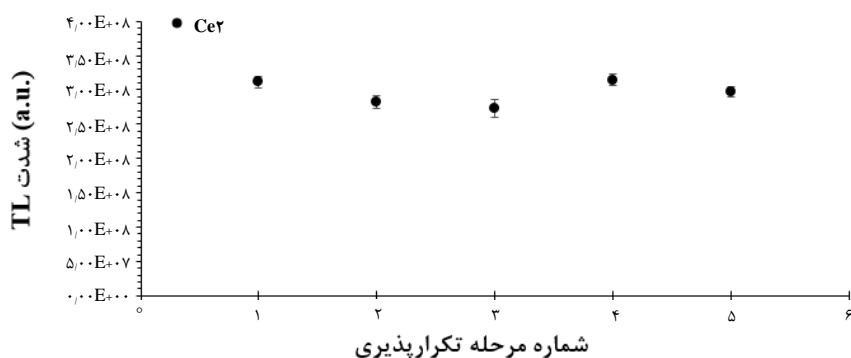
۴. نتیجه‌گیری

در تعدادی از مقالات اثر افزودن انواع ناخالصی تکی به هیدروکسی اپتایت در حین سنتز بررسی شده است [۱۸، ۲۰، ۲۱، ۲۹، ۳۰]. اما تاکنون اثر افزودن ناخالصی ترکیبی به هیدروکسی اپتایت و بررسی خواص ترمولومینسانس آن گزارش نشده است. در کار حاضر، هدف اصلی بررسی پاسخ دزیمتری نمونه ترکیبی در قیاس با نمونه تکی و همچنین اثرات فازی است. در این کار پژوهشی نمونه آلاییده با Gd^{3+} که دارای پاسخ به مراتب پایین‌تر است، با ناخالصی Ce^{2+} که دارای پاسخ بالاتری است، ترکیب شد. هدف بررسی و امکان‌سنجی بهبود پاسخ دزیمتری در نمونه با پاسخ پایین‌تر بود.





شکل ۵. تغییرات درصد محوشدگی نمونه‌های HAP بدون آلابش و آلابیده با Gd_5 ، Ce_2 و Ce_2Gd_5 .



شکل ۶. نمودار تکرارپذیری پاسخ در ۵ مرحله برای نمونه Ce_2 .

دمای بسیار پایینی ظاهر می‌شود که برای اهداف دزیمتری نتیجه مناسبی در بر ندارد. همچنین اثر محوشدگی نمونه ترکیبی نیز مطلوب نبوده و به نظر می‌آید که علت این امر اعمال ۷ درصد ناخالصی است. با این وجود، نمونه ترکیبی پاسخ خطی را تا دز ۱۵۰۰ Gy حفظ می‌کند که به دلیل حضور ناخالصی سریم در آن است.

پس باید این نکته را در نظر گرفت که ترکیب کردن ناخالصی‌ها همیشه مناسب‌ترین گزینه نبوده و این کار دارای مزایا و معایبی است که باید مطابق با ماده‌ی مورد نظر و ناخالصی‌های انتخاب شده مورد بررسی قرار گیرد.

از سوی دیگر، علی‌رغم به‌کارگیری روش یکسان در عملیات حرارتی در سنتز و کلسینه کردن نمونه‌ها، فاز β -TCP با درصد بالایی در نمونه آلابیده با سریم ظاهر شده است، اما در نمونه آلابیده با گادولونیوم ظاهر نشده است. بنابراین وجود یک نوع خاص از ناخالصی در شکل‌گیری یک فاز مؤثر است.

به‌طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که افزودن ناخالصی و همچنین فازهای بلوری تشکیل شده در هنگام ساخت HAP می‌تواند بر پاسخ دزیمتری ترمولومینسانس تأثیرگذار باشد.

نتایج نشان داد که ساختار نمونه‌های تولید شده به صورت ترکیبی از فازهای HAP هگزاگونال، HAP مونوکلینیک و همچنین فاز اضافی β -TCP است.

نمونه بدون آلابش دارای پایین‌ترین پاسخ ترمولومینسانس است که همان‌گونه که در بخش مقدمه ذکر شد، این نتیجه قابل پیش‌بینی بود. در میان نمونه‌های آلابیده، نمونه Ce_2 و Gd_5 به ترتیب دارای کم‌ترین و بیش‌ترین پاسخ ترمولومینسانس هستند. پاسخ نمونه ترکیبی Ce_2Gd_5 حد میانی پاسخ نمونه‌های آلابیده با یک ناخالصی است و نشان می‌دهد که افزودن ناخالصی Ce_2 منجر به بهبود پاسخ ترمولومینسانس Gd_5 شده است. از این‌رو در صورتی که ناخالصی گادولونیوم در ماده وجود داشته باشد به منظور بهبود پاسخ ترمولومینسانس می‌توان از ناخالصی سریم نیز استفاده کرد. همچنین از مقایسه این نتایج با نتایج حاصل از آنالیز ریتولد، می‌توان نتیجه گرفت که تشکیل فاز β -TCP در نمونه‌های Ce_2 و Ce_2Gd_5 منجر به بهبود پاسخ ترمولومینسانس شده است. علی‌رغم بهبود پاسخ ترمولومینسانس، با وجود این‌که دمای این‌که قله‌های نمونه‌های ناخالصی تکی Ce_2 و Gd_5 بالاست، اما قله نمونه ترکیبی در



12. H. Daneshvar, et al., *Influence of morphology and chemical processes on thermoluminescence response of irradiated nanostructured hydroxyapatite*, *J. Lumin.*, **219** (2020), doi: 10.1016/j.jlumin. 2019. 116906.
13. H. Li, et al., *Growth Mechanism of Surfactant-Free Size-Controlled Luminescent Hydroxyapatite Nanocrystallites*, *Cryst. Growth Des.*, **17(5)**, 2809–2815 (2017), doi: 10.1021/acs.cgd.7b00258.
14. D. Haverty, et al., *Structure and stability of hydroxyapatite: Density functional calculation and Rietveld analysis*, *Phys. Rev. B-Condens. Matter Mater. Phys.*, **71(9)**, 94103 (2005), doi: 10.1103/PhysRevB.71.094103.
15. R. Pérez-Solis, et al., *Synthesis and characterization of a monoclinic crystalline phase of hydroxyapatite by synchrotron X-ray powder diffraction and piezoresponse force microscopy*, *Crystals*, **8(12)**, 458 (2018), doi: 10.3390/cryst8120458.
16. G. Rani, P.D. Sahare, *Effect of phase transitions on thermoluminescence characteristics of nanocrystalline alumina*, *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms*, **311**, 71–77 (2013), doi: 10.1016/j.nimb. 2013.06.018.
17. V.S.M. Barros, et al., *ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA NUCLEAR-ABEN Rare earth doped aluminum oxide dosimeter prepared by combustion synthesis*, 7-10 (2007), [Online]. Available: <https://pdfs.semanticscholar.org/60f1/ef510c6517a2642b273a81aadff6e9f8ac33.pdf>.
18. H. Daneshvar, et al., *The role of La, Eu, Gd, and Dy lanthanides on thermoluminescence characteristics of nano-hydroxyapatite induced by gamma radiation*, *SN Appl. Sci.*, **1(10)**, (2019), doi: 10.1007/s42452-019-1162-4.
19. T. Ma, Z. Xia, L. Liao, *Effect of reaction systems and surfactant additives on the morphology evolution of hydroxyapatite nanorods obtained via a hydrothermal route*, *Appl. Surf. Sci.*, **257(9)**, 4384–4388 (2011), doi: 10.1016/j.apsusc.2010.12.067.
20. H. Daneshvar, *Synthesis and Study of Thermoluminescence Properties of Nanostructured Hydroxyapatite Doped with Impurities*, *Nuclear Science & Technology Research Institute*, (2020), doi: 10.3139/124.110445.
21. H. Daneshvar, et al., *Synthesis and evaluation of thermoluminescence properties of cerium-coated nanostructured hydroxyapatite from a dosimetric perspective*, *26th Iranian Nuclear Conference*, (2020), (In Persian).
22. M. Shafaei, et al., *The effect of sintering on thermoluminescence response of hydroxyl apatite nano-structure synthesized via hydrolysis method from dosimetric point of view*, *Iran. J. Radiat. Saf. Meas.*, **2(4)**, 13-18 (2014), doi: 10.22052/2.4.13.
23. M. Shafaei, et al., *Study on carbonated hydroxyapatite as a thermoluminescence dosimeter*, *Kerntechnik*, **80(1)**, 66-69 (2015), doi: 10.3139/124.110484.

۵. تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله بر خود لازم می‌دانند که از زحمات مسئولان محترم آزمایشگاه دزیمتری مرکز تابش گاما، پژوهشکده کاربرد پرتوها، جناب آقای ابراهیم زرین و جناب آقای سید مهدی بطحایی و هم‌چنین مسئول محترم آزمایشگاه ترمولومینسانس، جناب آقای دکتر امیر مصلحی قدردانی نمایند.

مراجع

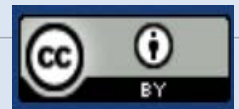
1. Y. Kirsh, *Kinetic Analysis of Thermoluminescence*, *Phys. Status Solidi*, **129(1)**, 15-48 (1992), doi: 10.1002/pssa.2211290102.
2. Y. Fukuda, et al., *Thermoluminescence of hydroxyapatite doped with copper*, *Radiat. Prot. Dosimetry*, **47(1-4)**, 205–207 (1993), doi: 10.1093/oxfordjournals.rpd.a081733.
3. R. Alvarez, et al., *Thermoluminescent characteristics of synthetic hydroxyapatite (SHAp)*, *Appl. Radiat. Isot.*, **83**, 192-195 (2014), doi: 10.1016/j.apradiso. 2013.04.011.
4. M. Shafaei, F. Ziaie, N. Hajiloo, *Thermoluminescence properties of micro and nano structure hydroxyapatite after gamma irradiation*, *Kerntechnik*, **81(6)**, 651-654 (2016), doi: 10.3139/124.110579.
5. J. Azorin, *Preparation methods of thermoluminescent materials for dosimetric applications: An overview*, *Appl. Radiat. Isot.*, **83**, 187-191 (2014), doi: 10.1016/j.apradiso.2013.04.031.
6. S.W.S. McKeever, R.H. Bube, *Thermoluminescence of Solids*, *Cambridge University Press*, **40(4)**, (1987), doi: 10.1063/1.2819986.
7. K. Madhukumar, et al., *Photoluminescence and thermoluminescence properties of tricalcium phosphate phosphors doped with dysprosium and europium*, *Bull. Mater. Sci.*, **30(5)**, 527-534 (2007), doi: 10.1007/s12034-007-0082-x.
8. M. Shafaei, et al., *Thermoluminescence properties of gamma-irradiated nano-structure hydroxyapatite*, *Luminescence*, **31(1)**, 223–228 (2016).
9. N.A.S. Mohd Pu'ad, et al., *Syntheses of hydroxyapatite from natural sources*, *Heliyon*, **5(5)**, e01588 (2019), doi: 10.1016/j.heliyon.2019.e01588.
10. A. Khanafari, T. Akbari, M.R. Sohrabi, *Comparison of nano-hydroxyapatite productivity by Pseudomonas aeruginosa and Serratia marcescense through encapsulation method Nano-hydroxyapatite productivity by encapsulation method*, *Nanomed J Orig. Res.*, **1(4)**, 276-284 (2014), [Online]. Available: <http://nmj.mums.ac.ir>.
11. M. Sadat-Shojai, et al., *Synthesis methods for nanosized hydroxyapatite with diverse structures*, *Acta Biomater.*, **9(8)**, 7591-7621 (2013), doi: 10.1016/j.actbio.2013.04.012.



24. H.M. Rietveld, *A profile refinement method for nuclear and magnetic structures*, *J. Appl. Crystallogr.*, **2**(2), 65-71 (1969), doi: 10.1107/S0021889869006558.
25. L. Lutterotti, *Total pattern fitting for the combined size-strain-stress-texture determination in thin film diffraction*, *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms*, **268**(3-4), 334-340 (2010), doi: 10.1016/j.nimb.2009.09.053.
26. L. Lutterotti, *Maud: a Rietveld analysis program designed for the internet and experiment integration*, *Acta Crystallogr. Sect. A Found. Crystallogr.*, **56**(s1), s54-s54 (2000), doi: 10.1107/s0108767300021954.
27. L. Lutterotti, *MAUD: Material Analysis Using Diffraction*, <http://www.ccp14.ac.uk/ccp/web-mirrors/lutterotti/~luttero/maud/index.html>.
28. B.H. Toby, *R factors in Rietveld analysis: How good is good enough?*, *Powder Diffr.*, **21**(1), 67-70 (2006), doi: 10.1154/1.2179804.
29. A. Barrera-Villatoro, et al., *Cathodo- and thermally stimulated luminescence characterization of synthetic calcium phosphates*, *Spectrosc. Lett.*, **51**(1), 22-26 (2018), doi: 10.1080/00387010.2017.1405993.
30. A. Zarinfar, M. Shafaei, F. Ziaie, *Synthesis, Characterization and Thermoluminescence Properties of Nano-Structure Gadolinium Doped Hydroxyapatite (HAP:Gd)*, *Procedia Mater. Sci.*, **11**, 293-298 (2015), doi: 10.1016/j.mspro.2015.11.075.
31. F. Ziaie, N. Farhadi Moein, M. Shafaei, *Thermoluminescent characteristics of nano-structure hydroxyapatite:Dy*, *Kerntechnik*, **79**(6), (2014), doi: 10.3139/124.110445.
32. M.M. Mohammadi, S.M. Hosseini Pooya, *Type testing of model 7200 automatic TLD reader*, *Radiat. Prot. Dosimetry*, **174**(1), (2017), doi: 10.1093/rpd/ncw100.
33. Y. Pan, J.L. Huang, C.Y. Shao, *Preparation of β -TCP with high thermal stability by solid reaction route*, *J. Mater. Sci.*, **38**(5), 1049-1056 (2003), doi: 10.1023/A:1022354015226.
34. X. Guo, et al., *Effect of calcining temperature on particle size of hydroxyapatite synthesized by solid-state reaction at room temperature*, *Adv. Powder Technol.*, **24**(6), 1034-1038 (2013), doi: 10.1016/j.appt.2013.03.002.
35. M. Ginting, et al., *Preparation and characterization of zinc oxide doped with ferrite and chromium*, *AIP Conference Proceedings*, AIP Publishing LLC, 030062 (2017), doi: 10.1063/1.4991166.
36. P. Chand, A. Gaur, A. Kumar, *Effect of Cr and Fe doping on the structural and optical properties of ZnO nanostructures*, *Int. J. Chem. Nucl. Mater. Metall. Eng.*, **8**, 1238-1241 (2014), doi: 10.5281/zenodo.1097046.
37. M. Meyer, L.C. Damonte, *Study of Co and Fe-doped ZnO milled nanopowders*, *Powder Technology*, **286**, 371-377 (2015), doi: 10.1016/j.powtec.2015.07.006.
38. P.C. Patel, S. Ghosh, P. Srivastava, *Effect of impurity concentration on optical and magnetic properties in ZnS: Cu nanoparticles*, *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, **93**, 148-152 (2017), doi: 10.1016/j.physe.2017.06.009.

COPYRIGHTS

©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.

**استناد به این مقاله**

پریسا تقی پور نیار، فرهاد ذوالفقارپور، فرهود ضیائی، حمیده دانشور (۱۴۰۲)، سنتز هیدروکسی اپتایت آلاییده با ناخالصی تکی و ترکیبی و بررسی اثر فاز بلوری تشکیل یافته بر پاسخ ترمولومینسانس آن در مقابل پرتوهای گاما، ۱۰۳، ۴۷-۵۷

DOI: [10.24200/NST.2023.1339](https://doi.org/10.24200/NST.2023.1339)

Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1339.html

