



Investigation of Optical and Scintillation Properties of Y-doped CaWO₄

Reza Irankhah^{*}, Newsha Khakpour and Omid Mirzaee^{ib}

Faculty of Materials and Metallurgical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

* Corresponding author, Email: r.irankhah@semnan.ac.ir

(Received: 1 August 2025; Revised: 29 September 2025; Accepted: 20 October 2025; Available online: 28 October 2025)

ABSTRACT

Introduction and Objectives: A scintillator is a specialized material that converts high energy radiation, including X-rays or gamma rays, into UV or visible light. Calcium tungstate (CaWO₄) represents one of the materials employed in scintillator applications. The principal emphasis of this investigation is directed towards the fabrication of CaWO₄ powder and the influence of yttrium doping on its optical characteristics.

Materials and Methods: In the present investigation, CaWO₄ powder was synthesized using Ca(NO₃)₂·4H₂O and Na₂WO₄·2H₂O as precursors via the co-precipitation technique and then calcined at 600 °C. YCl₃·6H₂O precursor was introduced as a dopant, serving as a source of Yttrium ions to enhance the properties of CaWO₄. Y-doped CaWO₄ powder was also synthesized through the co-precipitation method. The microstructural characteristics, optical properties, and scintillation performance of the synthesized samples were meticulously examined utilizing XRD, FESEM, UV-Vis spectroscopy, PL spectroscopy, and Alpha spectroscopy analyses.

Results: XRD analysis substantiated the high purity of the synthesized powders, as well as the incorporation of Y ions into the CaWO₄ crystal lattice. The morphological examination of the powders predominantly revealed a mainly spherical configuration, with dimensions measured at approximately 500-600 nm. The band gap energy, derived from the absorption spectrum, was determined to be 5.6eV for the pure CaWO₄ and 5.8eV for the Y-doped CaWO₄. Luminescence characterization of the samples indicated that their emission spectra fall within the range of 350-550 nm.

Conclusion: The scintillation properties of the samples, as assessed through pulse height spectrum analysis, revealed that the Y-doped CaWO₄ sample exhibited a significantly higher scintillation count rate intensity compared to its undoped counterpart.

Keywords: CaWO₄, Yttrium dopant, Emission, Optical properties, Scintillation properties.

How to Cite: Irankhah R, Khakpour N, Mirzaee O. Investigation of Optical and Scintillation Properties of Y-doped CaWO₄. J Adv Mater Eng. 2026;45(1):109–122. <https://doi.org/10.47176/jame.45.1.1138>

Copyright © 2026 Isfahan University of Technology, Published by IUT press.



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.



بررسی خواص نوری و سوسوزنی تنگستات کلسیم آلائیده شده با ایتريوم

رضا ایرانخواه*^{ID}، نیوشا خاکپور و امید میرزایی^{ID}

دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: r.irankhah@semnan.ac.ir

(دریافت: ۱۴۰۴/۵/۱۰، بازنگری: ۱۴۰۴/۷/۷، پذیرش: ۱۴۰۴/۷/۲۸، انتشار: ۱۴۰۴/۸/۶)

چکیده

مقدمه و اهداف: یک آشکارساز سوسوزن، ماده‌ای است که تابش‌های با انرژی بالا نظیر اشعه ایکس یا گاما را به نور مرئی و یا فرابنفش تبدیل می‌کند. تنگستات کلسیم (CaWO_4) یکی از موادی است که در کاربردهای سوسوزن استفاده می‌شود. تمرکز این پژوهش بر سنتز پودر CaWO_4 و تاثیر ایتريوم بر خواص نوری آن است.

مواد و روش‌ها: در این تحقیق، پودر CaWO_4 با استفاده از پیش‌ماده‌های نیترات کلسیم ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) و تنگستات سدیم ($\text{Na}_2\text{WO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) به روش هم‌رسوبی سنتز و سپس در دمای 600°C درجه سانتی‌گراد کلسینه شد. برای بهبود خواص این ماده، از پیش‌ماده کلرید ایتريوم ($\text{YCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)، به‌عنوان دوپنت یا تامین‌کننده یون‌های ایتريوم استفاده شد. پودر تنگستات کلسیم دوپ شده با ایتريوم نیز به روش هم‌رسوبی تهیه شد. ریزساختار، خواص نوری و خواص سوسوزنی نمونه‌های سنتز شده توسط آنالیز تفرق اشعه ایکس، میکروسکوپ الکترونی روبشی، طیف‌سنجی فرابنفش-مرئی، فوتولومینسانس و طیف‌سنجی ذرات آلفا بررسی شد.

یافته‌ها: آنالیز پراش پرتو ایکس، خلوص پودرهای سنتز شده و همچنین دوپ‌شدن یون‌های ایتريوم در ساختار تنگستات کلسیم را تایید نمود. مورفولوژی ذرات پودرها عمدتاً کروی بوده و اندازه آن‌ها 600nm – 500nm نانومتر به دست آمد. انرژی باند ممنوعه با استفاده از طیف جذبی برای نمونه‌های خالص و دوپ شده، به ترتیب برابر 5.6 و 5.8 الکترون‌ولت، به دست آمد. آنالیز نورتایی نمونه‌ها نیز نشان داد که طیف نوری آن‌ها در محدوده 550nm – 350nm نانومتر می‌باشند.

نتیجه‌گیری: نتایج خواص سوسوزنی نمونه‌ها با آنالیز طیف ارتفاع پالسی، نشان داد که نمونه دوپ شده با ایتريوم دارای شدت نرخ شمارش سوسوزنی قوی‌تری نسبت به نمونه خالص است.

واژه‌های کلیدی: تنگستات کلسیم، دوپنت ایتريوم، نشر، خواص نوری، خواص سوسوزنی.



۱- مقدمه

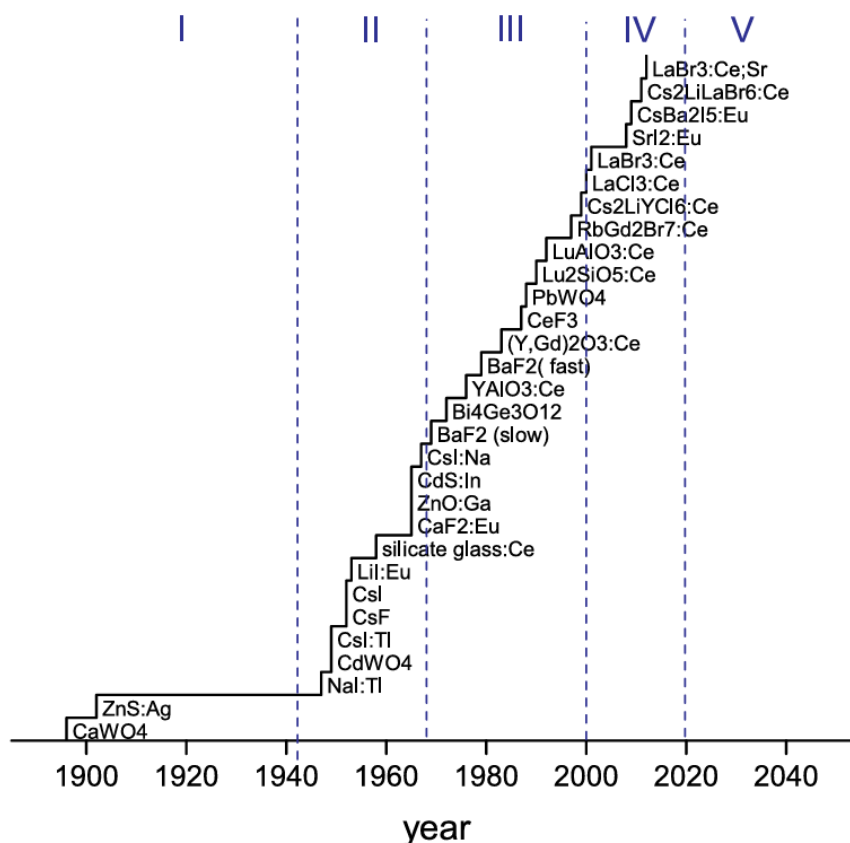
برای هزاران سال انسان تنها قادر به دیدن با نور مرئی بود، اما با پیشرفت آشکارسازها، دید انسان نسبت به سایر بخش‌های طیف الکترومغناطیسی نیز گسترش یافت. بشر به کمک این ابزارها توانسته است به‌طور موثری با چالش‌های ناشی از تابش‌ها مقابله کند. تابش‌ها در حوزه‌های گوناگونی مانند پزشکی (درمان و تشخیص)، استخراج منابع، کنترل پایانه‌های مسافربری و باری، ژئوفیزیک، اخترشناسی، استریل‌سازی، سیستم‌های بازرسی، باستان‌شناسی و سیستم‌های هشداردهنده، دارای کاربرد و اهمیت هستند. از آنجایی که برخی از تابش‌ها با چشم غیرمسلح دیده نمی‌شوند؛ بنابراین می‌توانند عوارض زیان‌باری از جمله تخریب DNA، اختلالات غدد، مشکلات گوارشی، انواع سرطان‌ها، سوختگی، حساسیت، آسیب‌های عصبی و ناباروری را به دنبال داشته باشند؛ بنابراین شناسایی تابش‌ها توسط آشکارسازها، از ضرورت بالایی برخوردار است. در سال‌های اخیر محققین بر کوچک‌تر و سریع‌تر کردن آشکارسازها متمرکز شده‌اند. اندازه کوچک‌تر، امکان استفاده در کاربردهای میدانی و قابل حمل را فراهم می‌کند و سرعت بالاتر آن‌ها نیز توانایی پردازش و تحلیل داده‌ها را در زمان کوتاه‌تر افزایش می‌دهد. این قابلیت‌ها در حوزه‌هایی مانند امداد رسانی به بلایای هسته‌ای، تشخیص سریع تهدیدهای امنیتی، تصویربرداری پزشکی و ... از اهمیت فوق العاده‌ای برخوردار هستند (۱).

علاوه بر این، پیشرفت در مواد و فناوری‌های آشکارسازی، این امکان را به محققین داده است که بتوانند دستگاه‌هایی با کارایی انرژی بالاتر تولید نمایند تا بتوان از آن‌ها در محیط‌هایی با منابع انرژی محدود مانند ماموریت‌های فضایی یا ایستگاه‌های نظارتی دورافتاده، استفاده نمایند. همچنین آشکارسازهای کم‌مصرف و کارآمد به توسعه سیستم‌هایی منجر شده‌اند که می‌توانند برای مدت‌های طولانی و با حداقل مداخله انسانی به کار خود ادامه دهند. آشکارسازها به سه دسته گازی، نیمه‌رسانا و سوسوزن تقسیم‌بندی می‌شوند که هر دسته از آن‌ها با توجه به ساختار و عملکرد خود، ویژگی‌های منحصر به فردی دارند. آشکارسازهای

سوسوزن در مقایسه با دیگر آشکارسازها، بازده آشکارسازی بالاتر و زمان تاخیر کمتری دارند (۲). یک ماده سوسوزن هنگام جذب تابش، ابتدا تعدادی جفت الکترون-حفره^۱ تولید می‌کند و سپس انرژی آن‌ها به یون نورتاب منتقل شده و در نهایت این یون‌ها انرژی را از حالت برانگیخته به حالت پایه منتقل کرده و طی بازترکیب الکترون-حفره‌ها در گاف انرژی، آن را از طریق نشر فوتون از دست می‌دهند. فوتون‌های نشر یافته توسط ماده سوسوزن را می‌توان توسط یک آشکارساز نوری و یا فوتومولتی پلایر^۲، از طریق تبدیل به یک جریان الکتریکی تشخیص داد. این جریان‌ها ابتدا تقویت و به سیگنال تبدیل می‌شوند که در نهایت توسط دستگاه‌های الکترونیکی مختلف اندازه‌گیری و تحلیل می‌شوند (۱ و ۳).

یک ماده ایده‌آل سوسوزن، باید دارای ویژگی‌هایی همچون بهره بالا در تبدیل انرژی ورودی به نور قابل تشخیص، تناسب خطی مقدار نور تولیدی با مقدار انرژی جذب شده توسط تابش، عدم جذب نور تولیدی در سوسوزن توسط خود آن و آزادسازی نور در زمان کوتاه و یا زمان واپاشی کوتاه با هدف تولید سریع‌تر پالس‌های نور و ... باشد. نمی‌توان تمامی این معیارها را از یک سوسوزن انتظار داشت، اما باید یک ماده سوسوزن بتواند توازنی از این معیارها را برقرار نماید (۴).

طیف الکترومغناطیسی را می‌توان به پرتوهای یونیزان و غیر یونیزان دسته‌بندی نمود. پرتوهای یونیزان مانند آلفا، گاما، ایکس و ... قادر هستند در اثر برخورد با ماده، الکترون‌ها را جدا کرده و منجر به ایجاد یون شوند. ویلیام کروکس (۵)، اولین شخصی بود که در سال ۱۹۰۳ توانست پدیده سوسوزنی را در سولفید روی مشاهده نماید. رونتگن و ادیسون نیز با تاباندن اشعه ایکس یونیزان بر باریم تتراسیانوپلاتینات، فوتون‌های مرئی مشاهده نمودند. برخی از پدیده‌ها مانند یدید سدیم، به‌عنوان اولین سوسوزن‌های مناسب در سال ۱۹۵۰ به کار گرفته شدند. پس از آن ترکیبات حاوی لیتیوم و لانتانیدها در سال‌های ۱۹۷۰ تا ۲۰۰۰ بررسی و توسعه داده شدند. در ادامه این روند، از آلانیدن مواد سوسوزن با عناصری چون Ce، Sr، Eu و ...، به‌منظور بهبود



شکل ۱- تاریخچه و روند پیدایش مواد سوسوزن طی سال‌های مختلف (۶).

روی، نیکل، منگنز و منیزیم منجر به تشکیل ساختار مونوکلینیک با نام ولفرامیت خواهند شد. در واقع تفاوت ساختاری این دو نوع ساختار مربوط به نحوه قرارگیری اتم‌های اکسیژن در اطراف تنگستن می‌باشند که به ترتیب توسط چهار و شش اتم اکسیژن احاطه می‌شود (۸).

تنگستات‌های فلزی در کاربردهایی همچون سوسوزن‌ها، فیبرهای نوری، سنسورها، دی‌الکتریک‌ها، فوتوکاتالیست‌ها و ... مورد استفاده قرار می‌گیرند. از جمله تنگستات‌های فلزی مورد استفاده در سوسوزن‌ها، تنگستات کلسیم می‌باشد. تنگستات کلسیم دارای کاربردهای متعدد دیگری مانند تصفیه آب، فوتوکاتالیست، ساخت سرامیک‌های با ثابت دی‌الکتریک پایین و ... نیز می‌باشند. در تنگستات کلسیم با ساختار شللیت، یون‌های تنگستن در قفسه‌هایی از تراهدرال‌های اکسیژن قرار گرفته و همچنین یون‌های فلزی (کلسیم) از طریق هشت یون اکسیژن احاطه می‌شوند (۹).

خواص سوسوزنی استفاده شد که همچنان این فرایند مورد تحقیق گسترده قرار می‌گیرد (۶). استفاده از لایه‌های نازک نیز به منظور کاربرد در حوزه‌های اپتوالکترونیک مانند سلول‌های خورشیدی و آشکارسازهای نوری، بسیار مورد تحقیق قرار گرفته‌اند (۷). در شکل (۱) روند توسعه سوسوزن‌ها آورده شده است. اخیراً توسعه مواد سوسوزن، از طریق آلاییدن برای دستیابی به عملکرد بهتر آن‌ها مورد توجه قرار گرفته است. با توجه به شکل (۱)، تنگستات کلسیم، از جمله قدیمی‌ترین مواد مورد استفاده در سوسوزن‌ها بوده است که همچنان تحقیق بر این ماده ادامه دارد (۶).

به‌طور کلی، تنگستات‌های فلزی با فرمول شیمیایی MWO_4 با کاتیون‌های دو ظرفیتی M ، براساس اندازه کاتیون، دارای ساختارهای شللیت^۳ و یا ولفرامیت^۴ می‌باشند. کاتیون‌هایی مانند سرب، باریم، کلسیم و استرانسیم در این تنگستات‌ها، منجر به تشکیل ساختار تراگونال با نام شللیت و کاتیون‌هایی مانند کبالت،

انرژی عالی به آلاینده‌های مختلف با یکدیگر، منجر به این شده است که از این ماده به‌عنوان لومینسانس و سوسوزن استفاده شود (۲۰). از بیسموت می‌توان به‌عنوان دوپنت در این ماده برای بهبود خواص لومینسانس، کاتالیستی و حسگری آن استفاده نمود. در تحقیقی که توسط داس و همکاران (۲۰) انجام شد، از دوپنت‌های لیتیوم و بیسموت به‌طور هم‌زمان در تنگستات کلسیم با هدف افزایش نشر استفاده شد. آلاییدن یون‌های سه‌ظرفیتی در مکان‌های دوظرفیتی تنگستات کلسیم، منجر به ایجاد جاهای خالی کلسیم در شبکه می‌شود. این جاهای خالی خواص فوتولومینسانس را تضعیف می‌کند؛ بنابراین استفاده هم‌زمان از یون‌های قلیایی در کنار یون‌های سه‌ظرفیتی، منجر به بهبود خاصیت مذکور خواهد شد (۲۰). زو و همکاران (۲۱)، از دوپنت‌های بیسموت و ساماریم در تنگستات کلسیم با هدف ساخت حسگرهای نوری حرارتی استفاده نمودند. پایلکارای و همکاران (۲۲)، رفتار فوتولومینسانس و ترمولومینسانس تنگستات کلسیم دوپ شده با ساماریم به‌روش حالت جامد را بررسی نمودند. با افزایش مقدار ساماریم از ۰/۰۱ تا ۰/۰۵ درصد، جابجایی پیک به سمت زوایای کوچک‌تر اتفاق افتاد که دلیل آن را به تفاوت در شعاع‌های یونی مرتبط دانستند. همچنین مقدار باند ممنوعه نیز از ۴/۲۲ الکترون-ولت در ۰/۰۱ درصد به ۴/۸۳ الکترون-ولت در ۰/۰۵ درصد افزایش یافت. این محققین ترکیب $Ca_{1-x}Sm_{(2/3)x}WO_4$ با مقدار $x=0/02$ را ترکیبی مناسب برای LEDها معرفی نمودند (۲۲). در تحقیقی دیگر که توسط دانشکودی و همکاران (۲۳) انجام شد، تنگستات کلسیم با روش هم‌رسوبی و در حضور سورفکتانت‌های متفاوت سنتز شد. خواص لومینسانس و کاتالیستی این ترکیبات در تخریب متیلن بلو بررسی شد. چن و همکاران (۲۴)، نانوذرات تنگستات کلسیم را با روش حلال-گرما، در حضور افزودنی‌های مختلف سنتز نمودند. بررسی خواص فوتولومینسانس نمونه‌ها نشان داد که با طول‌موج تحریک ۲۴۷ نانومتر، پیک‌های نشر در طول‌موج ۴۱۷ نانومتر مشاهده شد (۲۴).

براساس مرور بر منابع مطالعاتی و بررسی‌های به‌عمل‌آمده توسط نویسندگان، تحقیقاتی در مورد آلاییدن تنگستات کلسیم با

از تنگستات کلسیم در حوزه‌هایی همچون نورتابی، ترمولومینسانس، میزبان لیزر استفاده می‌شود و همچنین به‌دلیل خاصیت فسفرسانس آبی آن در طول‌موج ۴۳۳ نانومتر، در اسیلوسکوپ‌ها و مواد سوسوزن برای تشخیص پرتوهایی مانند گاما و ایکس استفاده می‌شود (۱۰). تاکنون اشکال مختلفی از مواد سوسوزن مانند تک‌بلور، پودری، کامپوزیتی و ... مورد بررسی قرار گرفته‌اند. مواد سوسوزن تک‌بلور، دارای پراکنندگی و یا پراش و جذب فوتون‌های تولیدی نبوده و بنابراین دارای بازدهی بالایی می‌باشند. اما فناوری تولید آن‌ها پیچیده و هزینه‌بر می‌باشد؛ بنابراین استفاده از سوسوزن‌های غیرآلی، پودری و ... مورد توجه قرار گرفته‌اند (۱۱ و ۱۲). همچنین روش‌های مختلفی برای تهیه تنگستات‌های فلزی متفاوت مانند حالت جامد، آب-گرما، کندوپاشی، سل‌ژل، رسوب شیمیایی بخار، کنده‌کاری لیزری، سونوشیمی، نمک مذاب و ... گزارش شده است (۱۶-۱۳).

یکی از موضوعات مهم در حوزه تنگستات‌های فلزی، دوپ کردن یا آلاییدن آن‌ها با هدف بهبود خواص می‌باشد. برای مثال تنگستات کلسیم هنگامی که با یون‌هایی از لانتانیدها و یا فلزات انتقالی آلاییده می‌شوند، پس از تحریک با یک پرتو قادر هستند تابش‌هایی چندرنگی از خود نشر دهند و براین‌اساس از آن‌ها در دستگاه‌هایی مانند روشنایی حالت جامد و برچسب‌های نورتاب (۱۷) و یا به‌عنوان فوتوکاتالیست استفاده می‌شود (۱۸). یو و همکاران (۱۹)، از دوپ هم‌زمان تریبوم و ساماریم به‌روش حالت جامد، توانستند موادی با قابلیت استفاده در LEDها و لامپ‌های گلخانه‌ای و به‌عبارتی فسفرهایی با نور سفید تهیه نمایند (۱۹).

تنگستات‌های فلزی قلیایی و مولیبدات‌ها، دارای ساختار شللیت بوده و دارای کاربردهای فناورانه شامل نورتاب‌ها، فوتوکاتالیست‌ها، سلول‌های خورشیدی، پیزوکاتالیست‌ها، تولید هیدروژن و ... می‌باشند. به‌دلیل ساختار خاص این دسته از مواد، می‌توان از مواد مختلفی مانند لانتانیدها، اکتینیدها و فلزات انتقالی برای مدیریت خواص آن‌ها استفاده نمود. برای مثال در تنگستات‌های کلسیم، نشر ذاتی گروه‌های یونی WO_4^{2-} و انتقال

به صورت قطره‌قطره، درحضور محلول نیترات کلسیم، به محلول تنگستات سدیم افزوده شد. درنهایت فرایند شستشو و سانتریفیوژ به‌منظور حذف ناخالصی‌ها انجام شد. رسوب نهایی در آون خشک و درنهایت پودر تنگستات کلسیم آلائیده‌شده با ایتريوم سنتز شد.

خواص ساختاری، خواص نوری و پاسخ سوسوزنی نمونه‌های سنتز شده، با استفاده از روش‌های مشخصه‌یابی مختلف مورد بررسی قرار گرفت. شناسایی فازی نمونه‌ها توسط دستگاه پراش پرتو ایکس^۵ (Bruker D8) دارای آند مس با طول‌موج $K\alpha$ برابر با ۱٫۵۴ آنگستروم انجام شد. از نرم‌افزار X-pert High Score Plus به‌منظور بررسی و شناسایی فازهای موجود و همچنین اندازه بلورک‌ها از طریق رابطه شرر^۶ در نمونه‌ها استفاده شد. ریزساختار نمونه‌ها توسط تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی نشر میدانی^۷ ZEISS -Sigma300-HV بررسی شد. میانگین اندازه ذرات توسط نرم‌افزار MIP اندازه‌گیری شد.

از طیف‌سنجی فرابنفش-مرئی بازتابش انتشاری^۸ (DRS) برای محاسبه مقدار باند ممنوعه (Shimadzu-8400s) نمونه‌ها استفاده شد. برای بررسی طیف فوتولومینسانس نمونه‌های سنتز شده، از آنالیز فوتولومینسانس استفاده شد. این آنالیز با استفاده از طیف‌سنج واریان^۹ انجام شد. خواص سوسوزنی نمونه‌ها، از طریق طیف‌سنجی ذرات آلفا و با استفاده از چشمه تابش آلفای Am^{241} بررسی شد. برای ارزیابی توانایی نمونه‌های سنتز شده در تشخیص تابش آلفا، ذرات آلفا از منبعی با سطح فعالیت ۰٫۲۲ میکروکوری منتشر شدند.

۳- نتایج و بحث

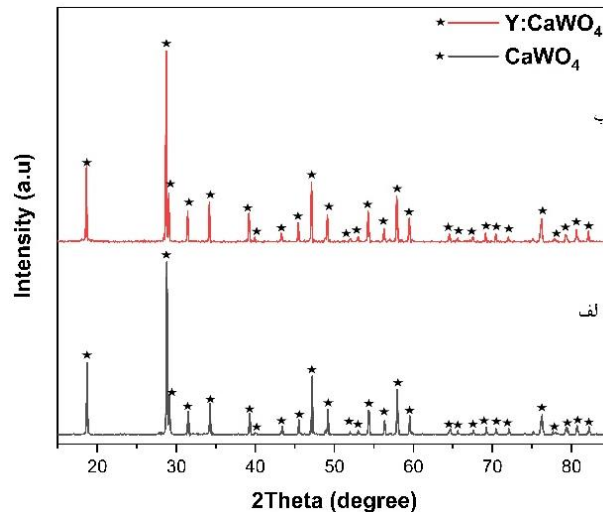
۳-۱- بررسی تفرق اشعه ایکس پودرهای سنتز شده

شکل‌های (۲-الف) و (۲-ب) الگوهای پراش پرتو ایکس نمونه‌های تنگستات کلسیم خالص و تنگستات کلسیم آلائیده (دوپ) شده با ایتريوم را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشخص شده است، تمامی پیک‌ها مربوط به ماده تنگستات کلسیم می‌باشند. الگوها تطابق کاملی با الگوی استاندارد JCPDS

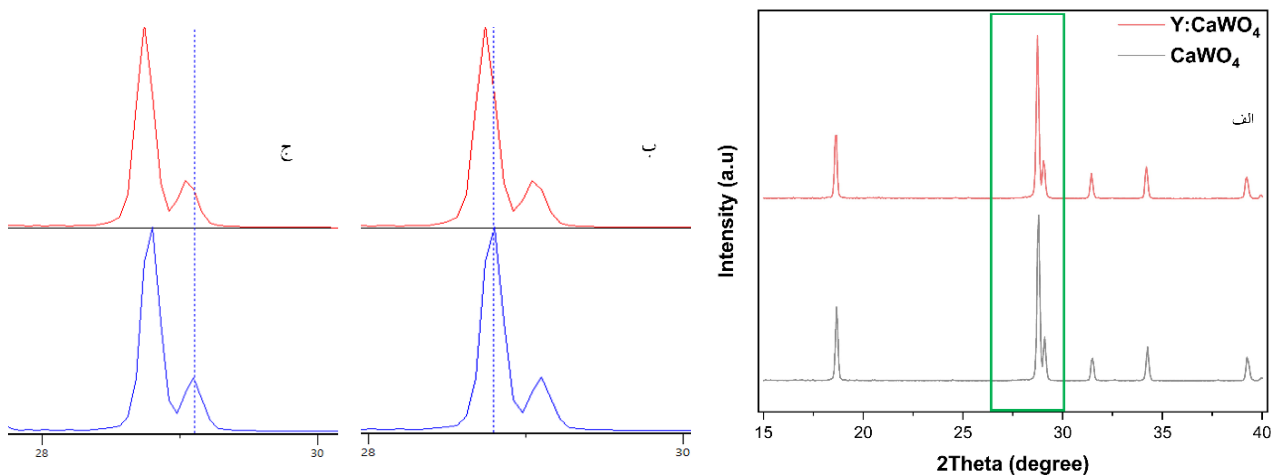
ایتريوم مشاهده نشد. با توجه به خواص نوری مناسب تنگستات کلسیم برای سوسوزنی، در پژوهش حاضر از روش هم‌رسوبی جهت سنتز ذرات تنگستات کلسیم استفاده شد. همچنین ذرات تنگستات کلسیم حاوی دوپنت ایتريوم نیز سنتز شدند. درنهایت اثر این دوپنت بر ریزساختار و خواص نوری و سوسوزنی تنگستات کلسیم بررسی شد.

۲- مواد و روش تحقیق

در این تحقیق، مواد اولیه شامل نیترات کلسیم $(Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O)$ ، تنگستات سدیم $(Na_2WO_4 \cdot 2H_2O)$ و کلرید ایتريوم $(YCl_3 \cdot 6H_2O)$ مورد استفاده قرار گرفتند. برای دستیابی به نانوذرات تنگستات کلسیم و تنگستات کلسیم آلائیده‌شده با ایتريوم از روش هم‌رسوبی استفاده شد. بدین‌منظور ابتدا مقدار مولی یکسان از نمک‌های $Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$ با جرم مولی ۲۳۶٫۱۵ گرم بر مول (مرک) و $Na_2WO_4 \cdot 2H_2O$ با جرم مولی ۳۲۹٫۸۶ گرم بر مول و خلوص ۹۹٫۹۹ درصد (مرک)، به‌طور جداگانه در بشرهای حاوی آب دیونیزه به مقدار ۱۰۰ میلی‌لیتر ریخته شدند. محلول‌ها توسط همزن مغناطیسی به‌شدت به‌هم زده شدند تا همگن گردند. سپس محلول $Na_2WO_4 \cdot 2H_2O$ به صورت قطره‌قطره روی محلول $Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$ (در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و سرعت همزن ۱۰۰ دور بر دقیقه) طی مدت ۱۸۰ دقیقه افزوده شد. با اضافه‌شدن محلول‌ها به یکدیگر و کامل شدن واکنش، رسوب سفیدرنگی حاصل شد. این رسوبات از طریق شستشو با آب مقطر، به‌منظور حذف یون‌های نیترات و یا سدیم، توسط سانتریفیوژ با سرعت ۳۰۰۰ دور بر دقیقه، جدا شدند. رسوبات حاصل در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد و به‌مدت ۱۲ ساعت در آون خشک شدند. سپس محصول خشک‌شده به مدت پنج ساعت در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد کلسینه شد. برای سنتز تنگستات کلسیم آلائیده‌شده با ایتريوم، ابتدا محلول‌های نیترات کلسیم و تنگستات سدیم به‌طور جداگانه تهیه شدند. همچنین محلول $YCl_3 \cdot 6H_2O$ با جرم مولی ۳۰۳٫۳۴ گرم بر مول و خلوص ۹۹٫۹ درصد (شرکت سیگما آلدریج) به مقدار یک درصد اتمی و



شکل ۲- الگوی تفرق اشعه ایکس: الف) تنگستات کلسیم، ب) تنگستات کلسیم آلاینده شده با ایتريوم با روش هم‌رسویی بعد از عملیات کلسینه شدن.



شکل ۳- الف) الگوی تفرق اشعه ایکس تنگستات کلسیم و تنگستات کلسیم آلاینده شده با ایتريوم سنتز شده با روش هم‌رسویی بعد از عملیات کلسینه، ب) و ج) مقایسه دو الگو با بزرگنمایی بالاتر برای بررسی جابجایی پیک‌ها.

دوپ شدن یون‌های ایتريوم در ساختار تنگستات کلسیم، آنالیز پراش اشعه ایکس در بازه محدودتر (۴۰ - ۱۵ درجه) و با گام زمانی بیشتر (دو ثانیه) انجام شد. الگوهای پراش در این حالت در شکل (۳) آورده شده است. از آنجایی که مقدار ایتريوم دوپ- شده در ساختار تنگستات کلسیم ناچیز می‌باشد، بنابراین در الگوی آن نمی‌توان پیک‌های مربوط به این عنصر و یا ترکیباتی از آن را پیدا نمود. اما آنالیز XRD نمونه تنگستات کلسیم دوپ- شده با ایتريوم نشان داد که مقداری جابجایی در زوایای این الگو

با شماره ۹۶۲۸-۹۰۰-۹۶ با ساختار شلثیت تتراگونال با گروه فضایی I 41/a و پارامترهای شبکه $a=b=5,243^{\circ}$ و $c=11,374^{\circ}$ دارند. پیک‌های با شدت بیشتر، به ترتیب در زوایای برابر $28,72^{\circ}$ ، $18,62^{\circ}$ ، $47,11^{\circ}$ و $29,04^{\circ}$ و $34,17^{\circ}$ درجه و مربوط به دسته صفحات با اندیس‌های (۱۱۲)، (۰۱۱)، (۰۲۴)، (۰۱۳) و (۰۲۰) می‌باشند. تطابق بسیار خوب این الگوها با الگوی مرجع، موید تک‌فاز بودن و خلوص بالای پودرهای سنتز شده می‌باشد، زیرا الگوهای پراش هیچ‌گونه فاز ناخالصی را نشان نمی‌دهند. به منظور بررسی دقیق‌تر

بالابودن انرژی سطحی ذرات پودر دانست که با جسییدن به یکدیگر، تمایل به کاهش انرژی سیستم را فراهم می‌کنند.

۳-۳- ارزیابی خواص نوری

برای بررسی خواص نوری نمونه‌ها و برهمکنش آن‌ها با پرتوهای فرابنفش و همچنین تعیین انرژی باند ممنوعه آن‌ها، آنالیز طیف-سنجی بازتابی پراکنده (DRS) در محدوده طول‌موج فرابنفش-مرئی انجام شد. منحنی‌های DRS نمونه‌ها در شکل (۵) آورده شده‌اند. با توجه به این شکل، بالاترین میزان جذب نور در نمونه تنگستات کلسیم در محدوده تقریبی ۳۰۰-۲۰۰ نانومتر است، درحالی‌که برای نمونه دوپ شده با ایتريوم بالاترین میزان جذب در محدوده تقریبی ۲۲۵-۱۹۰ نانومتر قرار دارد. همچنین مشاهده می‌شود که با دوپ ایتريوم در تنگستات کلسیم، پیک نمودار به سمت طول‌موج‌های کمتر جابجا شده و از طرفی شیب نمودار نیز بیشتر می‌شود. تاکنون مطالعاتی بر تاثیر افزودن ایتريوم بر تغییر انرژی باند ممنوعه تنگستات کلسیم گزارش نشده است. اما با توجه به تحقیقات مشابه که در آن از دوپنت لانتانیوم در ساختار تنگستات کلسیم استفاده شده است (۲۵)، نتایج مشابهی به دست آمده است؛ بنابراین به نظر می‌آید که دوپ ایتريوم در ساختار تنگستات کلسیم و ورود آن‌ها در ساختار شبکه، منجر به افزایش گاف انرژی شده و به عبارت دیگر الکترون‌های ظرفیت به سختی به تراز هدایت برانگیخته می‌شوند و پیک جذب نمونه دوپ شده به سمت طول‌موج‌های کمتر جابجا می‌شود. به عبارت دیگر یک جابجایی باند به طول‌موج‌های کوتاهتر اتفاق افتاده است که به معنای جذب بیشتر در منطقه فرابنفش است.

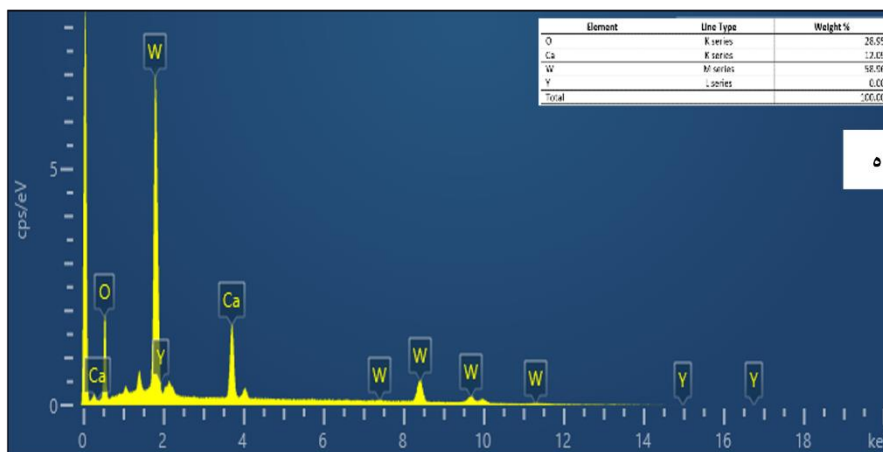
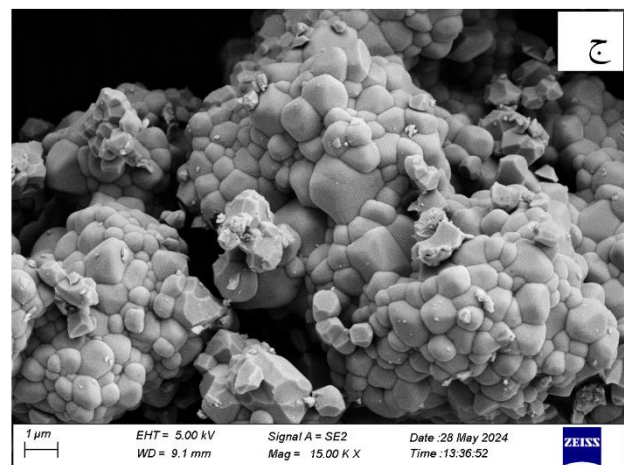
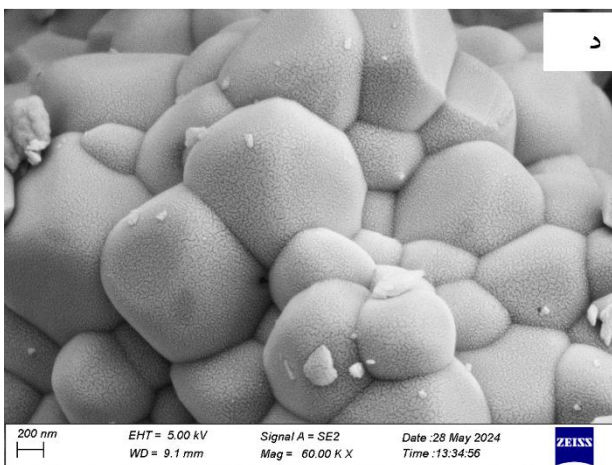
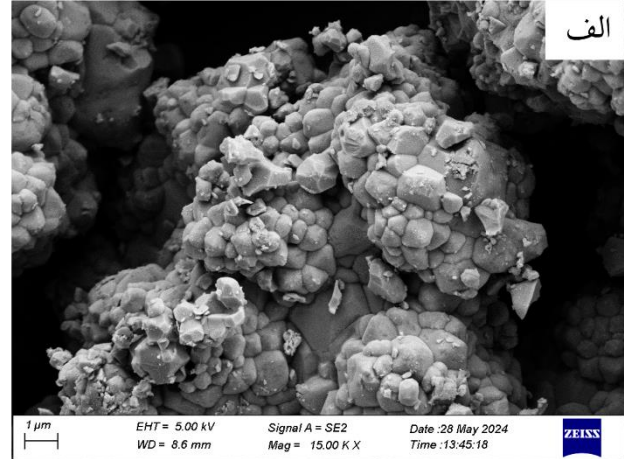
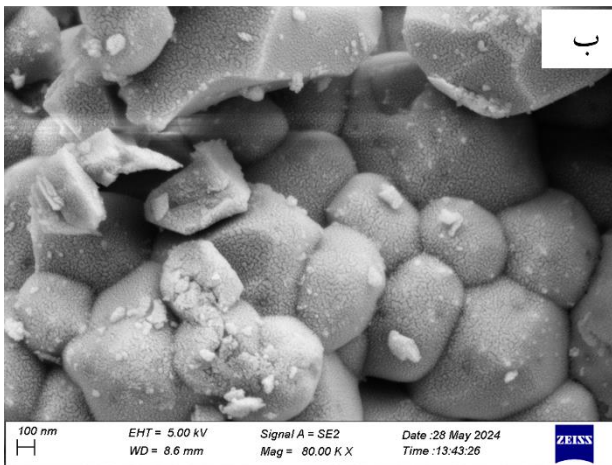
لبه جذب در اغلب نیمه‌هادی‌ها از قانون نمایی تبعیت می‌کند. با استفاده از داده‌های جذب، باند ممنوعه را می‌توان از رابطه تانوک^{۱۲} ($ah\nu = A(h\nu - E_g)^n$) محاسبه نمود (۲۶). در این رابطه A ثابت تناسب، E_g انرژی باند ممنوعه، ν بسامد فوتون، α ضریب جذب و n یک ثابت می‌باشند. مقدار n برای انتقالات الکترونی به صورت مستقیم و غیرمستقیم به ترتیب برابر ۲ و ۰.۵ می‌باشد. با توجه به شکل (۶) و منحنی‌های به دست آمده براساس این رابطه

نسبت به الگوی مربوط به نمونه تنگستات کلسیم خالص مشاهده می‌شود. همان‌طور که در بخش (ب و ج) این شکل دیده می‌شود، مقداری جابجایی پیک به سمت چپ (زوایای پراش کمتر) اتفاق افتاده است که می‌توان آن را به جایگزینی ایتريوم با کلسیم و افزایش حجم سلول واحد و به عبارتی افزایش فواصل بین صفحات بلوری و در نتیجه جابجایی زوایا به سمت چپ نسبت داد.

اندازه بلورک‌های پودرهای سنتز شده توسط رابطه شرر ($D_c = K\lambda / \beta \cos(\theta)$) و همچنین مقدار کرنش شبکه توسط رابطه $\epsilon = \beta / 4 \tan(\theta)$ محاسبه شد که در این روابط β مقدار پهنای پیک در نصف ارتفاع بیشینه^{۱۰}، K فاکتور شکل (معمولاً برابر ۰.۹) و λ طول‌موج اشعه ایکس (هدف مس که برابر ۱.۵۴ آنگستروم) هستند. محاسبات برای چهار پیک اصلی به طور جداگانه انجام شد. در نهایت میانگین اندازه بلورک‌ها و همچنین میانگین کرنش شبکه محاسبه شد. میانگین اندازه بلورک‌ها و کرنش شبکه برای تنگستات کلسیم، به ترتیب برابر ۷۰ نانومتر و ۰.۲۲ درصد و برای تنگستات کلسیم آلاییده شده با ایتريوم، به ترتیب برابر ۷۵ نانومتر و ۰.۲۱ درصد، به دست آمد. به نظر می‌آید آلاییدن تنگستات کلسیم با ایتريوم تاثیر چندانی بر اندازه بلورک‌ها نداشته است.

۳-۲- بررسی مورفولوژی ذرات

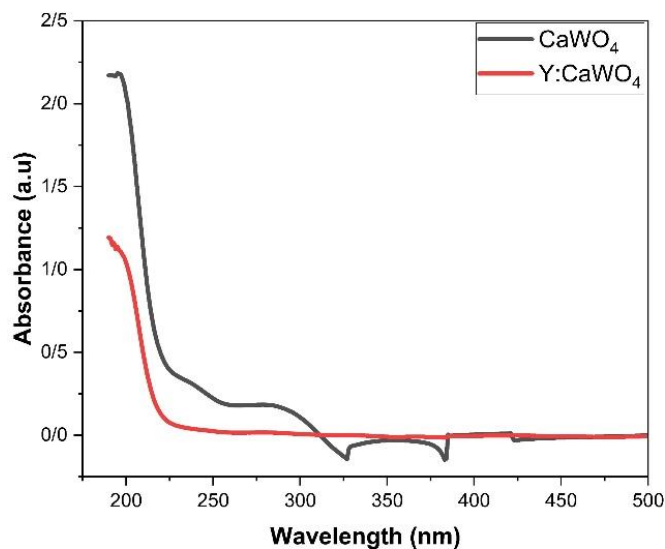
در شکل (۴)، تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی گسیل میدانی نمونه‌ها در دو بزرگنمایی متفاوت نشان داده شده است. همان‌طور که در این تصاویر مشخص است، ذرات تقریباً کروی شکل بوده و توزیع آن‌ها تقریباً نرمال است. متوسط اندازه ذرات تقریبی نمونه‌ها با استفاده از نرم افزار MIP به ترتیب برابر ۶۶۰ و ۵۶۵ نانومتر به دست آمد. آنالیز طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس^{۱۱} نیز حضور عناصر کلسیم، تنگستن و اکسیژن را در پودر تأیید می‌کند. همچنین مقادیر ناچیز ایتريوم در طیف قابل مشاهده نمی‌باشد؛ بنابراین آنالیزهای XRD و EDS نشان دادند که این پودرها با خلوص بالا به روش هم‌رسوبی سنتز شده‌اند. لازم به ذکر است که اتصال ذرات به یکدیگر ناشی از آگلومره شدن آن‌ها در اثر کلسینه شدن می‌باشند. این امر را می‌توان ناشی از



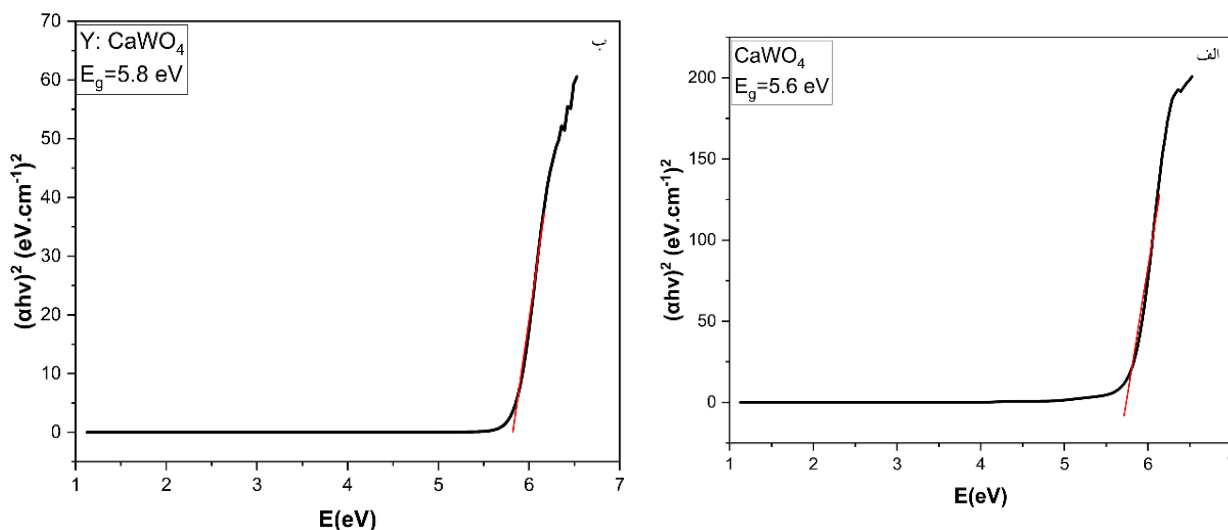
شکل ۴- مورفولوژی ذرات پودرهای سنتز شده در بزرگنمایی‌های متفاوت: الف و ب) تنگستات کلسیم، ج و د) تنگستات کلسیم آلائیده شده با ایتريوم، ه) آنالیز EDS از پودر تنگستات کلسیم آلائیده شده با ایتريوم.

تقریبی برای نمونه تنگستات کلسیم و تنگستات کلسیم دوپ شده، به ترتیب برابر ۵/۶ و ۵/۸ الکترون ولت بدست آمد. مقادیر انرژی باند ممنوعه در تحقیقات انجام شده توسط سایر

از طریق تماس کردن خطی مستقیم در قسمت خطی آن‌ها و محل تقاطع آن با محور افقی، می توان مقادیر انرژی باند ممنوعه را به صورت تقریبی به دست آورد. مقدار انرژی باند ممنوعه



شکل ۵- منحنی‌های طیف‌سنجی فرابنفش-مرئی نمونه‌ها.

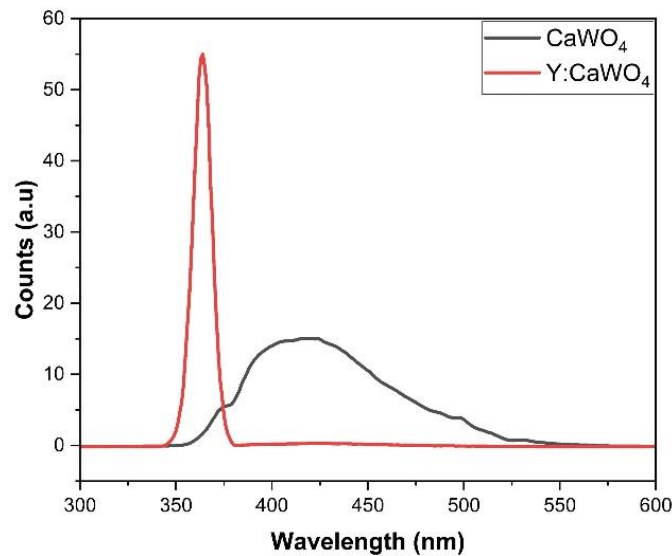


شکل ۶- طیف جذبی براساس رابطه تائوک و محاسبه انرژی باند ممنوعه برای: الف) تنگستات کلسیم و ب) تنگستات کلسیم دوپ شده با ایتیریم.

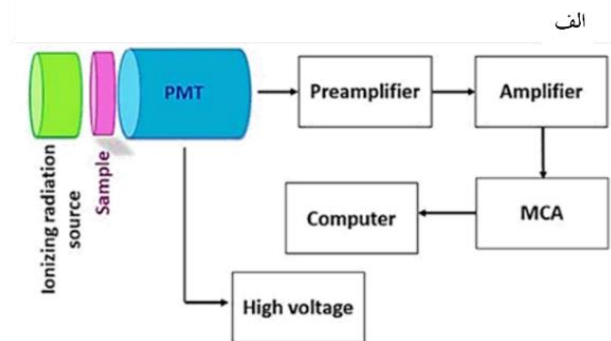
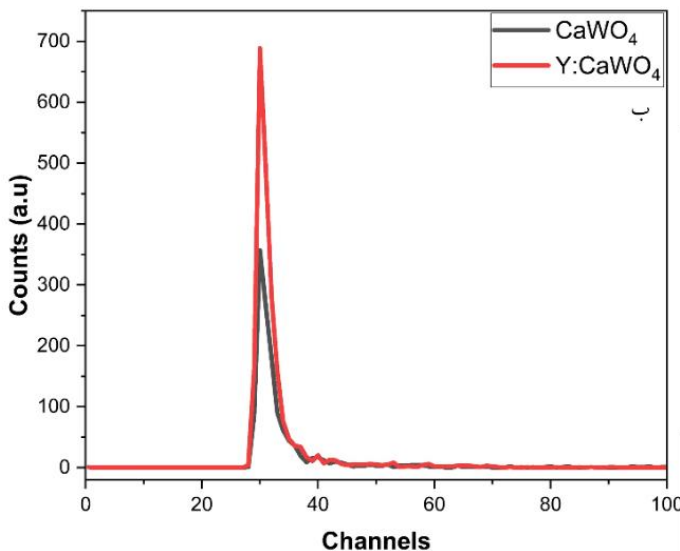
آلاییده شده با ایتیریم نسبت به نمونه خالص را می‌توان به واسطه افزایش عیوب موجود در شبکه و اعوجاج چندوجهی‌های موجود در ساختار تنگستات کلسیم نسبت داد (۱۷).

نتایج آنالیز نورتابی در شکل (۷) آورده شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، طیف نشری نمونه تنگستات کلسیم در محدوده ۳۵۰-۵۵۰ نانومتر ظاهر شده است و بیشینه نشر نمونه در ۴۲۰ نانومتر قرار دارد. این بازه در نمونه دوپ شده بسیار محدودتر و در طول موج‌های کمتر و با شدت بیشتری قابل

محققین متفاوت گزارش شده است. برای مثال سایید و همکاران (۲۷)، مقدار باند ممنوعه را ۶٫۱، ۶٫۵ و ۶٫۸ الکترون‌ولت برای تنگستات کلسیم گزارش نمودند. در تحقیقی دیگر یوردانوا و همکاران (۲۸)، مقدار باند ممنوعه را براساس شرایط متفاوت سنتز در بازه ۲٫۶۷ تا ۵٫۳۶ الکترون‌ولت گزارش نمودند. در سایر تحقیقات نیز اعداد گزارش شده در شرایط متفاوت، در بازه ۳٫۸۷-۵٫۴ (۲۹)، ۴٫۸۳ (۳۰)، ۳٫۹-۴٫۰۱ (۳۱) الکترون‌ولت بوده‌اند. یکی از دلایل بالاتر بودن مقدار انرژی باند ممنوعه نمونه



شکل ۷- طیف نورتایی نمونه‌های سنتز شده.



شکل ۸- الف) طرحواره‌ای از فرایند تجربی سوسوزنی نمونه‌ها، ب) طیف ارتفاع پالسی نمونه‌های سنتز شده.

باعث می‌شود که فرایند تهییج و نشر در طول موج‌های کمتر و به عبارت دیگر در انرژی‌های بیشتر صورت گیرد.

۳-۴- ارزیابی خواص سوسوزنی

خواص سوسوزنی نمونه‌ها تحت تابش پرتو آلفا بررسی شد. فرایند تجربی اندازه‌گیری سوسوزنی و نتایج این آزمون با عنوان طیف ارتفاع پالسی در شکل (۸) آورده شده است. همان‌طور که مشخص است نمونه دوپ شده نسبت به نمونه خالص، شدت

مشاهده است. پیک مشاهده شده در منحنی نورتاب تنگستات کلسیم را ناشی از انتقال بار (الکترون) از اکسیژن به فلز تنگستن در گروه‌های WO_4^{2-} و همچنین جاهای خالی ایجاد شده در ساختار نسبت داده‌اند (۳۲). طیف نشری این ماده را ناشی از انتقال بار از حالت 5d مربوط به یون‌های تنگستن به حالت 2p مربوط به یون‌های اکسیژن نیز نسبت داده‌اند (۳۳). از سوی دیگر، انتقال طیف نشری به طول موج‌های کمتر در نمونه دوپ شده را می‌توان به افزایش انرژی باند ممنوعه نسبت داد؛ چراکه این امر

۳- اندازه میانگین تقریبی ذرات سنتز شده برای تنگستات کلسیم و تنگستات کلسیم دوپ شده با ایتريوم، در حدود ۶۶۰ و ۵۶۵ نانومتر به دست آمد.

۴- بررسی های DRS نمونه ها نشان داد که بالاترین میزان جذب نور در نمونه های تنگستات کلسیم و تنگستات کلسیم دوپ شده با ایتريوم، به ترتیب در محدوده ۲۰۰-۳۰۰ و ۱۹۰-۲۲۵ نانومتر بوده و همچنین مقدار انرژی باند ممنوعه تنگستات کلسیم در اثر آلاییدن با ایتريوم افزایش (۵/۶ در مقایسه با ۵/۸ الکترون ولت) می یابد.

۵- نتایج آنالیز نورتایی نمونه تنگستات کلسیم نیز نشان داد که طیف نوری در محدوده ۳۵۰-۵۵۰ نانومتر با بیشینه نشر در ۴۲۰ نانومتر واقع شده است که با آلاییدن آن مقداری جابجایی در طیف مشاهده شد.

۶- بررسی خواص سوسوزنی نمونه ها تحت تابش آلفا نشان داد که نمونه دوپ شده با ایتريوم، دارای ارتفاع پالسی بالاتری نسبت به نمونه خالص می باشد.

تشکر و سپاسگزاری

هزینه تحقیق حاضر توسط نویسندگان مقاله تامین شده است و این تحقیق حمایت خاصی از موسسات عمومی، صنعتی و غیرانتفاعی دریافت نکرده است.

تضاد منافع

نویسندگان مقاله اذعان دارند هیچ نوع تضاد منافی با شخص، شرکت یا سازمانی برای این پژوهش ندارند.

سهم نویسندگان

رضا ایرانخواه: طراحی و ایده پردازی مطالعه، آزمایش ها و جمع آوری داده ها، تحلیل و تفسیر داده ها، اعتبارسنجی، مدیریت پروژه و نگارش نهایی. نیوشا خاکپور: طراحی و ایده پردازی مطالعه، آزمایش ها و جمع آوری داده ها. امید میرزایی: طراحی و ایده پردازی مطالعه، آزمایش ها و جمع آوری داده ها.

نرخ شمارش سوسوزنی قوی تری نشان داده است. این پدیده در مورد نمونه های تنگستات کلسیم دوپ شده با ایتريوم در تحقیقات سایر محققین گزارش نشده است، اما در موارد مشابه (مانند افزودن اربوم به تنگستات سرب، افزودن سرب به تنگستات کادمیم)، این پدیده را مرتبط با تغییر در ساختار الکترونی و سطح انرژی ها در اثر آلاییدن دانسته اند (۳۴). این محققین علت افزایش سوسوزنی را به تاثیر یون های آلاییده بر ساختار نواری و بهبود تله های انرژی و کاهش نقص های ساختاری و بهبود بازترکیب تابشی نسبت داده اند. در نمونه خالص، نقص های بلوری مانند جاهای خالی و یا ناهنجاری های مرزی می توانند مسیرهای بازترکیب غیرتابشی ایجاد نموده و باعث کاهش نورتایی شوند. اما افزایش آلاینده ها، می تواند بخشی از این نقص ها را جبران کرده و نواقص مطلوبی ایجاد نماید که بازترکیب الکترون-حفره را در مسیر تابشی تقویت نماید (۳۴). ورود یون های ایتريوم به شبکه تنگستات کلسیم می تواند باعث تغییر در توزیع اوربیتال های انرژی شده و ترازهای جدیدی در داخل باند ممنوعه ایجاد نماید. این ترازها بازترکیب الکترون-حفره را تسهیل نموده و بنابراین منجر به افزایش شدت سوسوزنی خواهد شد. این یافته ها نشان می دهد که تنگستات کلسیم دوپ شده قادر است به طور موثری تابش های یونیزان نامرئی را به فوتون های مرئی تبدیل نماید. این نتایج نشان می دهد که تنگستات کلسیم دوپ شده با ایتريوم می تواند گزینه مناسبی برای حسگرهای نوری و آشکارسازهای سوسوزنی در مواردی همچون تصویربرداری پزشکی باشد.

۴- نتیجه گیری

نتایج مهم حاصل از این تحقیق به صورت زیر می باشند:

- ۱- پودرهای تنگستات کلسیم و تنگستات کلسیم آلاییده شده با ایتريوم با خلوص بسیار بالا با روش هم رسوبی سنتز شدند.
- ۲- اندازه بلورک های پودرهای سنتز شده در حدود ۷۵-۷۰ نانومتر بوده و بررسی های اشعه ایکس نشان داد که با دوپ کردن ایتريوم در شبکه تنگستات کلسیم، زوایای پراش به مقادیر کمتری جابجا می شوند.

واژه‌نامه

1. electron-hole pair
2. photomultiplier
3. scheelite
4. wolframite
5. X-ray diffraction (XRD)
6. Scherrer
7. field emission scanning electron microscopy (FESEM)
8. diffuse reflectance spectroscopy (DRS)
9. Varian spectrophotometer
10. full width at half maximum (FWHM)
11. energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS)
12. Tauc

مراجع

1. Vuori S. Reversible photochromism of synthetic hackmanites in radiation detection and quantification [PhD thesis]. Finland: University of Turku; 2023.
2. Papadopoulos L. Rise time of scintillation emission in inorganic and organic scintillators. NIM A. 1997;401(2):322-328. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(97\)82050-5](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(97)82050-5)
3. Moseley ODI, Doherty TAS, Parmee R, Anaya M, Stranks SD. Halide perovskites scintillators: unique promise and current limitations. J Mater Chem C 2021;9(35):11588-11604. <https://doi.org/10.1039/D1TC01595H>
4. Knoll Glenn F. Radiation detection and measurement. 4th ed. New York: Wiley; 2010.
5. Crookes W. The emanations of radium. Proc R Soc Lond. 1903;71(467-476):405-408. <http://doi.org/10.1098/rspl.1902.0116>
6. Dorenbos P. The quest for high resolution γ -ray scintillators. Opt Mater: X 2019;1:100021. <https://doi.org/10.1016/j.omx.2019.100021>
7. Soleymani F. Analysis of microstructural changes, morphology and optical properties of the surface of copper oxide thin layers due to annealing for use in optoelectronic devices. J Adv Mater Eng. 2024;43(2): 17-28. <https://doi.org/10.47176/jame.43.2.1062>
8. Kuzmin A, Purans J. Local atomic and electronic structure of tungsten ions in AWO_4 crystals of scheelite and wolframite types. Radiat Meas. 2001;33(5):583-586. [https://doi.org/10.1016/S1350-4487\(01\)00063-4](https://doi.org/10.1016/S1350-4487(01)00063-4)
9. Zhang Z, Wang W, Jiang D, Xu J. Synthesis of dumbbell-like $\text{Bi}_2\text{WO}_6/\text{CaWO}_4$ composite photocatalyst and application in water treatment. Appl Surf Sci. 2014; 292:948-953. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2013.12.084>
10. Phuruangrat A, Thongtem T, Thongtem S. Synthesis, characterisation and photoluminescence of nanocrystalline calcium tungstate. J Exp Nanosci. 2010;5(3):263-270. <http://dx.doi.org/10.1080/17458080903513276>
11. Fiserova L, Janda J. Scintillation powders for the detection of neutrons. IEEE Trans Nucl Sci. 2018; 65(8):2140-2146. <http://doi:10.1109/TNS.2018.2818299>
12. Sahi SK. Synthesis and characterization of nanocomposite scintillators for radiation detection. [PhD thesis]. Texas: University of Texas at Arlington; 2016.
13. Nishigaki S, Yano S, Kato H, Hirai T, Nonomura T. $\text{BaO-TiO}_2\text{-WO}_3$ microwave ceramics and crystalline BaWO_4 . J Am Ceram Soc. 1988;71(1):11-17. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1988.tb05769.x>
14. Woo Seok C, Yoshimura M, Masahiro MY. Hydrothermal, hydrothermal-electrochemical and electrochemical synthesis of highly crystallized barium tungstate films. Jpn J Appl Phys. 1997; 36(3R):1216. <https://doi.org/10.1143/jjap.36.1216>
15. Esaka T. Ionic conduction in substituted scheelite-type oxides. Solid State Ion. 2000;136-137:1-9. [http://dx.doi.org/10.1016/S0167-2738\(00\)00377-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0167-2738(00)00377-5)
16. Breedon M, Spizzirri P, Taylor M, Plessis J, McCulloch D, Zhu J, et al. Synthesis of nanostructured tungsten oxide thin films: a simple, controllable, inexpensive, aqueous sol-gel method. CG & Design 2010;10(1):430-439. <https://doi.org/10.1021/cg9010295>
17. Almeida MAP, Lima JRO, Filho PNL, Li MS, Longo E, Cavalcante LS. Effect of Zn^{2+} ions on the structure, morphology and optical properties of CaWO_4 microcrystals. J Sol-Gel Sci Technol. 2014;72:648-654. <https://doi.org/10.1007/s10971-014-3550-y>
18. Neto NFA, Dias BP, Tranquilin RL, Longo E, Li M, Bomio MRD, et al. Synthesis and characterization of Ag^+ and Zn^{2+} co-doped CaWO_4 nanoparticles by a fast and facile sonochemical method. J Alloys Compd. 2020;823:153617. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.153617>
19. Wu H, Niu P, Pei R, Zheng Y, Jin W, Li XM, et al. Tb^{3+} and Sm^{3+} co-doped CaWO_4 white light phosphors for plant lamp synthesized via solid state method: phase, photoluminescence and electronic structure. J Lumin. 2021;236:118146. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2021.118146>
20. Das P, Balhara A, Das D, Sudarshan K, Gupta SK, Samanta S, et al. Oxygen vacancy sensitized energy transfer and tunable emission in Li^+ codoped $\text{CaWO}_4:\text{Bi}^{3+}$. J Mol Struct. 2025;1321:139988. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2024.139988>

21. Zhou S, Meng Q. The optical temperature sensing performance of Bi³⁺, Sm³⁺ co-doped CaWO₄ phosphors. *Ceram Int.* 2024;50(18):33647-33655. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.06.181>
22. Paikaray R, Badapanda T, Mohapatra H, Richhariya T, Brahme N, Tripathy SN. Structural, photoluminescence, and thermoluminescence behaviors of samarium doped CaWO₄ phosphor. *Mater Sci Eng B* 2023;294:116511. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2023.116511>
23. Dhanushkodi S, Aslam M, Sasikumar S, Murugan J, Nadezhda K, Mikhailovich A, et al. Effect of surfactants on the luminescence, bonding, and catalytic properties of CaWO₄ spheres. *J Taiwan Inst Chem Eng.* 2024;164:105660. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2024.105660>
24. Chen S-J, Li J, Chen X-T, Hong J-M, Xue Z, You X-Z. Solvothermal synthesis and characterization of crystalline CaWO₄ nanoparticles. *J Cryst Growth.* 2003;253(1):361-365. [https://doi.org/10.1016/S0022-0248\(03\)01089-3](https://doi.org/10.1016/S0022-0248(03)01089-3)
25. Yuan L, Yub J, Wang S, Huang K, Rena X, Sun Y, et al. UV-vis absorption shift of mixed valance state tungstate oxide: Ca_{0.72}La_{0.28}WO₄. *Mater Lett.* 2015; 143:212-214. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2014.12.115>
26. Thongtem T, Kungwankunakorn S, Kuntalue B, Phuruangrat A, Thongtem S. Luminescence and absorbance of highly crystalline CaMoO₄, SrMoO₄, CaWO₄ and SrWO₄ nanoparticles synthesized by coprecipitation method at room temperature. *J Alloys Compd.* 2010;506:475-481. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2010.07.033>
27. El Sayed ME, Naji S, Murshed MN, Samir A. Cation substitution for tunable electronic, optical and scintillation properties of Pb_{1-x}Ca_xWO₄ materials: A density functional theory study. *Results Phys.* 2021;30:104826. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2021.104826>
28. Iordanova R, Gancheva M, Koseva I, Tzvetkov P, Ivanov P. The influence of high-energy milling on the phase formation, structural, and photoluminescent properties of CaWO₄ nanoparticles. *Materials* 2024; 17(15):3724. <https://doi.org/10.3390/ma17153724>
29. Ferré T, Cavignac T, Jobic S, Latouche C. A computational study of CaWO₄: raman spectrum, intrinsic defects, and excited state properties. *Comput Mater Sci.* 2023;228:112323. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2023.112323>
30. Bakovets VV, Yushina IV, Antonova OV, Zolotova ES. Bandgap-width correction for luminophores CaMoO₄ and CaWO₄. *Opti Spectrosc.* 2017;123(3): 399-403. <https://doi.org/10.1134/S0030400X17090053>
31. Nobre FX, Muniz R, Do Nascimento ER, Amorim RS, Silva RS, Almeida A, et al. Hydrothermal temperature dependence of CaWO₄ nanoparticles: structural, optical, morphology and photocatalytic activity. *J Mater Sci: Mater Electron.* 2021;32(8):9776-9794. <https://doi.org/10.1007/s10854-021-07490-1>
32. Dabre K, Dhoble SJ, Lochab J. Synthesis and luminescence properties of Ce³⁺ doped MWO₄ (M=Ca, Sr and Ba) microcrystalline phosphors. *J Lumin.* 2014;149:348-352. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2014.01.048>
33. Wu H, Hu Y, Kang F, Li N. Enhancement on afterglow properties of Eu³⁺ by Ti⁴⁺, Mg²⁺ incorporation in CaWO₄ matrix. *J Mater Res.* 2012; 27(6):959-964. <https://doi.org/10.1557/jmr.2012.16>
34. Hosseinpour M, Abdoos H, Alamdari S, Menendez JL. Flexible nanocomposite scintillator detectors for medical applications: a review. *Sensor Actuat A-Phys.* 2024;378:115828. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sna.2024.115828>