



Original Article

# Synthesis of CsPbCl<sub>3</sub>/Graphene Oxide Perovskite Nanocubes with Enhanced Luminescence in Room-Temperature

Yeganeh Sadat Fatemipناه<sup>1, ID</sup>, Sanaz Alamdari<sup>2,\* ID</sup>, Mohammad Hossein MajlesAra<sup>1,\*\* ID</sup>

<sup>1</sup> Faculty of Physics, Kharazmi University, Tehran 15719-14911, Iran

<sup>2</sup> Department of Nanotechnology, Faculty of New Sciences and Technologies, Semnan University, Iran

Received: 2025-07-05

Revised: 2025-10-19

Accepted: 2025-10-22

**Abstract:** Luminescent and scintillator materials are extensively used in various industries, including medical imaging, therapy, security inspection, astronomy, and oil extraction. In this study, hybrid nanocomposites based on CsPbCl<sub>3</sub> nanocubes and graphene oxide (GO) were synthesized via a chemical method at room temperature. Structural characterization using X-ray diffraction (XRD) confirmed that all samples exhibited a pure cubic perovskite structure, and the incorporation of GO into the composite matrix was verified by a distinct peak in the pattern. Field emission scanning electron microscopy (FE-SEM) images revealed uniform dispersion and proper attachment of nanocubes onto GO sheets. Proton-induced ionoluminescence analysis demonstrated a remarkable increase in the intensity and quality of visible emission from CsPbCl<sub>3</sub>/GO samples compared to pure GO, indicating improved crystalline structure and enhanced optical performance of the composite. These findings show that combining perovskite nanocubes with graphene oxide is an effective approach for synthesizing luminescent materials with enhanced stability and performance, offering a promising outlook for optoelectronic applications and radiation sensors.

**Keywords:** Graphene oxide, Perovskite, Nanocomposite, Luminescence

\*Corresponding Author: [s.alamdari@semnan.ac.ir](mailto:s.alamdari@semnan.ac.ir)

\*\*Corresponding Author: [majlesara@khu.ac.ir](mailto:majlesara@khu.ac.ir)

## How to Cite This Article:

Fatemipناه Y S, Alamdari S, MajlesAra M H. Synthesis of CsPbCl<sub>3</sub>/Graphene Oxide Perovskite Nanocubes with Enhanced Luminescence in Room-Temperature. *Nanomeghyas*. 2025;12(2): 128-134. DOI: [10.22034/ns.2025.2064893.1394](https://doi.org/10.22034/ns.2025.2064893.1394)





## سنتز نانومکعب‌های پروسکایت $\text{CsPbCl}_3@GO$ با لومینسانس تقویت‌شده در دمای اتاق

یگانه السادات فاطمی پناه<sup>۱</sup>، ساناز علمداری<sup>۲\*</sup>، محمدحسین مجلس آرا<sup>۱\*\*</sup>

<sup>۱</sup>دانشکده فیزیک، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران  
<sup>۲</sup>دانشکده نانوفناوری، پردیس علوم و فناوری های نوین، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۰۴

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۷/۲۷

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۱۴

**چکیده:** مواد لومینسانس و سوسوزن در صنایع مختلفی همچون تصویربرداری پزشکی، درمان، اخترشناسی و استخراج نفت به وفور مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این پژوهش، نانوکامپوزیت‌های هیبریدی مبتنی بر نانومکعب‌های  $\text{CsPbCl}_3$  و اکسیدگرافن (GO) به روش شیمیایی و در دمای اتاق سنتز شدند. مشخصه‌یابی ساختاری با استفاده از پراش پرتو ایکس (XRD) نشان داد که تمامی نمونه‌ها دارای ساختار مکعبی خالص پروسکایت هستند و وارد شدن GO به ماتریس کامپوزیت، توسط پیک مجزا در الگو تأیید شد. تصاویر میکروسکوپ الکترونی (FE-SEM) نشان‌دهنده پراکندگی یکنواخت و اتصال مناسب نانومکعب‌ها روی صفحات GO بود. آنالیز یونولومینسانس با تحریک پروتون، بیانگر افزایش چشمگیر شدت و کیفیت تابش نمونه‌های  $\text{CsPbCl}_3/GO$  در محدوده مرئی نسبت به GO خالص بوده است که حاکی از بهبود ساختار بلوری و ارتقاء کارایی اپتیکی کامپوزیت می‌باشد. این دستاوردها نشان می‌دهد که ترکیب نانومکعب‌های پروسکایت با اکسیدگرافن، راهکاری مؤثر برای سنتز مواد نورتاب با پایداری و عملکرد تقویت‌شده محسوب می‌شود و چشم‌انداز امیدوارکننده‌ای برای کاربردهای اپتوالکترونیک و حسگرهای تابش فراهم می‌آورد.

**واژگان کلیدی:** اکسیدگرافن، پروسکایت، نانو کامپوزیت، نورتابی

\* نویسنده مسئول. ایمیل: s.alamdari@semnan.ac.ir

\*\* نویسنده مسئول. ایمیل: majlesara@khu.ac.ir

**نحوه استناد به این مقاله:**

فاطمی پناه، یگانه السادات، علمداری، ساناز، مجلس آرا، محمدحسین، سنتز نانومکعب‌های پروسکایت  $\text{CsPbCl}_3@GO$  با لومینسانس تقویت‌شده در دمای اتاق. *نانو مقیاس*، ۲۰۲۵، ۱۲(۲)، ۱۳۴-۱۲۸.

DOI: [10.22034/ns.2025.2064893.1394](https://doi.org/10.22034/ns.2025.2064893.1394)



## ۱- مقدمه

در طی سالهای اخیر مواد نورتاب با بازده نوری بالا و پاسخ زمانی سریع برای آشکارسازی و ساخت سنسورهای نوری اهمیت فزاینده‌ای یافته‌اند. مواد نورتاب سوسورن قادر هستند تابش‌های یونیزان را که عموماً قابل تشخیص برای چشم انسان و آشکارسازهای متداول نوری نیستند را جذب کرده و در مدت زمان کوتاهی نوری در محدوده مرئی و یا نزدیک به مرئی از خود ساطع کنند. چنین خاصیتی موجب شده است تا این مواد به طور گسترده در حوزه‌هایی چون تصویربرداری پزشکی، بازرسی امنیتی، نجوم پرتوی ایکس، دزیمتری، آشکارسازی تابش‌های هسته‌ای مورد استفاده قرار گیرند. میزان توانایی مواد سوسوزن در تبدیل تابش‌های پرانرژی به طول موج قابل تشخیص را میتوان توسط تعدادی عامل کلیدی از جمله بازده نوری، توان متوقف سازی، زمان محوشدگی، پایداری شیمیایی و رادیویی با یک دیگر مقایسه کرد. تلاشها برای دستیابی به سوسوزنهایی با خواص سوسوزنی مطلوب، ساخت آسان، سریع و مقرون به صرفه از ابتدای کشف پدیده سوسوزنی تا کنون همواره ادامه داشته است. هرچند برای یک سوسوزن قرار گرفتن همه پارامترهای کلیدی در مطلوب ترین مقادیر کاری دشوار و چه بسا ناممکن است، اما در انتخاب، طراحی و ساخت یک سوسوزن باید سعی کرد تا موثرترین پارامترها با توجه به نوع کاربرد در حالت بهینه قرار گیرند. اخیراً دسته جدیدی از نیمرساناها به نام هالیدپروسکایتها به دلیل داشتن بازده کوانتومی فوتولومینسانس بالا، گاف انرژی کوچک، عدم نیاز به آلاینده‌ها، قابلیت کنترل نوسوسوزنی توسط گاف انرژی و وابستگی ابعادی به آن، توانایی ذاتی در جذب هر چه بیشتر تابش‌های یونساز به دلیل حضور عناصری با عدد اتمی بالا، فرآیند تولید آسان و ارزان قیمت، توجهات زیادی را به عنوان سوسوزن از ابعاد بالک تا نانوکریستالها به خود جلب کرده است. نانوبلورهای پروسکایت هالیدی

( $CsPbX_3$ ) به دلیل اثر محدودیت کوانتومی، از خاموشی حرارتی جلوگیری و بازده کوانتومی بالا فراهم می‌کند و انتشار سریع برانگیخته‌های نزدیک لبه، نوردهی بسیار روشن و زمان فروپاشی کوتاهی ارائه می‌دهند. با این حال، برای جذب کامل پرتوهای ایکس پرانرژی نیاز به ضخامت کمتر از ۱ میلی‌متر است که در قالب فیلم‌های نازک یا نانوکریستال‌های پراکنده عملی نیست [۵-۱]. نانوکریستال‌های پروسکایت  $CsPbCl_3$  پایدار در آب با استفاده از تریپسین سنتز شده و به عنوان حسگر نوری برای شناسایی رادیکال هیدروکسیل در محیط آبی معرفی شدند این نانوپروب با حساسیت و گزینش‌پذیری بالا، قادر است مقادیر بسیار کم از رادیکال هیدروکسیل را در نمونه‌های واقعی آبی با مکانیسم خاموش شدن فلورسانس شناسایی کند [۱]. در مطالعه دیگری آلایش با استرانسیم (Sr) باعث افزایش پایداری ساختاری و بهبود خواص الکترونیکی و نوری  $CsPbCl_3$  شد: از جمله افزایش گاف انرژی، بهبود انتقال حامل‌ها و کاهش انرژی پیوند اکسیتون. این مطالعه نشان داد که  $CsPbCl_3$  آلاینده شده با Sr برای کاربردهای اپتوالکترونیکی آینده، از نظر پایداری و کارایی نسبت به نمونه خالص مزیت دارد [۲]. در گزارش دیگری نانوکریستال‌های تک‌بلوری  $CsPbCl_3$  در دماهای پایین، نورتابی بسیار سریع و شدیدی (با پیک باریک ۴۲۰ نانومتر و زمانی تاخیر کمتر از نانوثانیه) از خود نشان دادند، بازده نوری بالا و پاسخ فوق‌سریع این ماده در دماهای کرایوژنیک، آن را به گزینه‌ای ایده‌آل برای آشکارسازی تابش یونیزان با پاسخ فوری بدل می‌سازد [۳].

در این پژوهش نانو مکعبهای سزیوم سرب کلرید به عنوان پرکننده در ماتریس گرافن با روش ساده شیمیایی سنتز، و خواص ساختاری و نوری آن تحت تهیج‌های انرژی بالا بررسی شد. نتایج به دست آمده نشان دادند نانکامپوزیت سنتز شده در ساخت انواع سنسورهای نوری و سوسوزنی میتواند گزینه مناسب و مقرون به صرفه ای باشد.

## ۲- کارهای تجربی و آزمایشگاهی

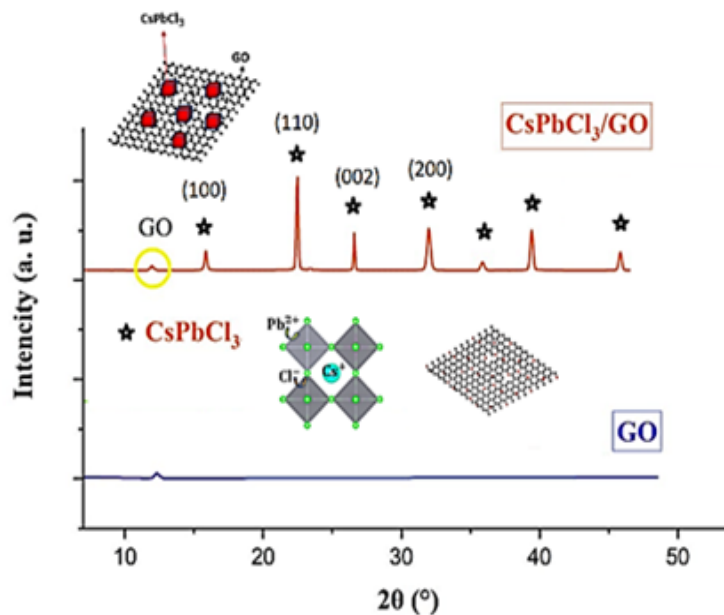
نانومکعبهای  $CsPbCl_3$  به روش سل-ژل تهیه شد. برای این منظور، کلرید سزیم (با خلوص ۹۹.۵٪، مرک آلمان) و کلرید سرب (با خلوص ۹۸٪، مرک آلمان) به عنوان مواد آغازین استفاده شدند. پودر گرافن اکسید نیز با روش هامرز تهیه گردید. کلرید سرب در ۵۰ میلی لیتر DMSO حل و محلول تا ۱۰۰ درجه سانتی گراد گرم شد. پس از حل شدن کامل، کلرید سزیم افزوده و محلول به مدت حدود ۶۰ دقیقه به حال خود گذاشته شد. سپس ۵۰ میلی لیتر تولوئن برای رسوبدهی اضافه گردید. بعد از ۱۰ دقیقه، ۵ درصد وزنی گرافن اکسید اضافه شد و ۱۰ دقیقه پس از آن، نقره به محلول اضافه گشت. نمونه نهایی سانتریفیوژ و به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۸۰ درجه سانتی گراد خشک شد و در نهایت، پودر حاصل آسیاب گردید تا به اندازه ذرات یکنواخت برسد [۴-۸]. برای بررسی فازی و ساختار بلوری نمونه‌ها از پراش پرتو ایکس (XRD)، مدل PANalytical PW3050/60 استفاده شد. ترکیب عنصری و ریزساختار نمونه‌ها با میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، مدل TESCAN Mira (III) و طیف‌سنجی انرژی-پراکنده (EDX) مطالعه شد. جهت بررسی لومینسانس، پرتو پروتون با انرژی

۲.۲ MeV و جریان ۴ nA در دمای محیط و فشار اتمسفری بر نمونه‌ها تابانده شد.

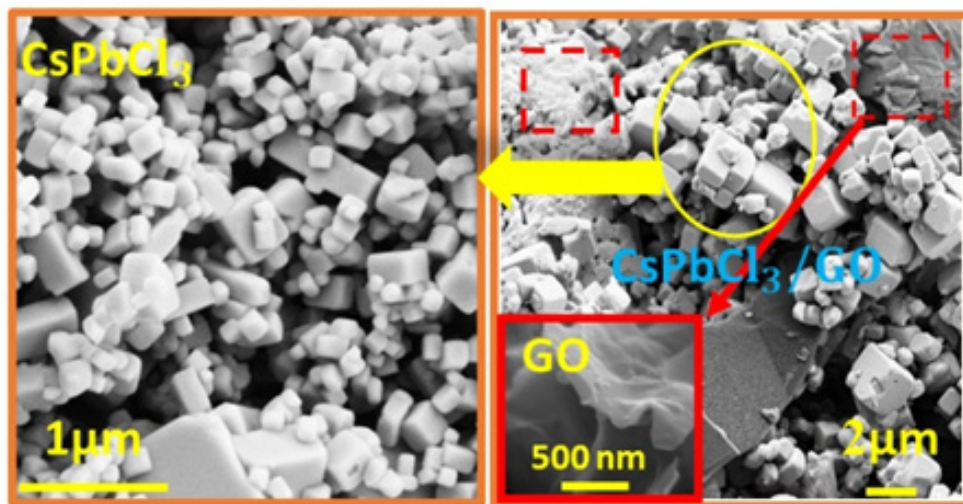
## ۳- بررسی و تحلیل نتایج

شکل ۱ الگوی XRD نمونه کاپوزیت تهیه شده و اکسیدگرافن خالص را نشان می‌دهد. با تجزیه و تحلیل پیک‌های شناسایی شده، تمام پیک‌های مشاهده شده مربوط به ساختار مکعبی پروسکایت هستند. بر اساس الگوی مرجع XRD شماره پایگاه داده JCPDS 001-018-0366، نانوذرات سنتز شده خلوص بالایی از خود نشان می‌دهند، زیرا هیچ فاز ثانویه مرتبط با ناخالصی‌ها شناسایی نشده است. شدیدترین پیک در محدوده زاویه حدودی ۲۲ درجه مشاهده می‌شود که مربوط به صفحه (۱۱۰) است. علاوه بر این، در نمونه‌های  $CsPbCl_3/GO$ ، یک پیک پهن کوچک در حدود ۱۰-۱۲ درجه، که با عنوان "GO" مشخص شده است، با اکسید گرافن مرتبط است که نشان دهنده ترکیب آن در ساختار کامپوزیت است. پیک مربوط به GO همچنان قابل مشاهده است که وجود اکسید گرافن را در کامپوزیت تأیید می‌کند [۹-۱۲].

در شکل ۲، تصاویر میکروسکوپ (FE-SEM)



شکل ۱: الگوی پراش XRD نانوکامپوزیت سنتز شده



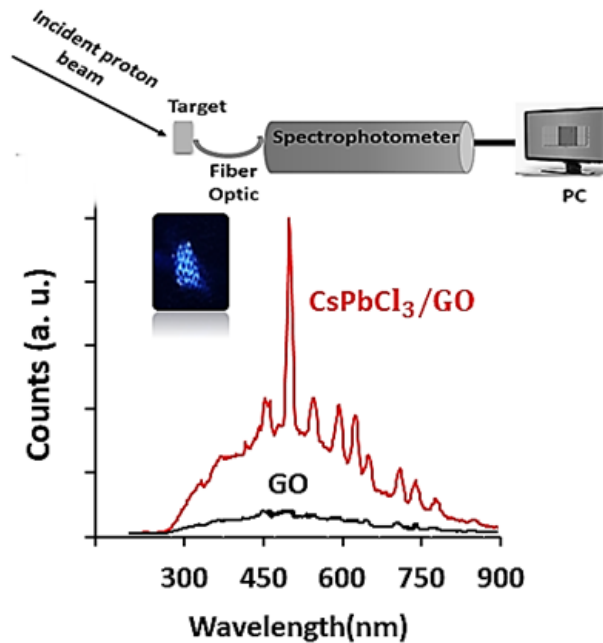
شکل ۲: تصویر FE-SEM نانوکامپوزیت سنتز شده به همراه نانومکعبهای  $\text{CsPbCl}_3$  به عنوان پرکننده و صفحات ماتریس اکسیدگرافن

مهر تأییدی بر موفقیت فرآیند ترکیب و جلوگیری از آگلومراسیون زیاد نانومکعبها (معمول در سیستم‌های فاقد ماتریس زمینه) است. این تصاویر به وضوح اثبات می‌کنند که روش سنتز به خوبی توانسته نانومکعبهای  $\text{CsPbCl}_3$  را روی صفحات GO تثبیت و توزیع کند و ساختاری هیبرید ایجاد نماید که پایه ارتقاء خواص نوری و الکترونیکی نانوکامپوزیت فراهم شده است.

در شکل ۳، یک طرحواره آزمایشگاهی به منظور ثبت طیف یونولومینسانس نمونه‌های  $\text{CsPbCl}_3/\text{GO}$  و GO تحت تابش پرتو پروتون نمایش داده شده است. در دیاگرام بالای شکل، مسیر پرتو پروتون خروجی به سمت هدف (Target) نشان داده شده که پس از برهم‌کنش با نمونه، سیگنال نوری جمع‌آوری شده توسط فیبر نوری به اسپکتروفوتومتر و سپس کامپیوتر منتقل می‌شود. تصویر کوچک داخل شکل، گسیل آبی از نمونه تحت تابش را نشان می‌دهد که گواهی بر عملکرد نورتابی نمونه است. طیف، پاسخ یونولومینسانس دو نمونه مقایسه شده است:

$\text{CsPbCl}_3/\text{GO}$  طیف یونولومینسانس قوی با پیک‌های متعدد و مشخص، که بالاترین شدت در حدود ۴۵۰-۵۰۰ نانومتر مشاهده می‌شود. این پیک‌های مشخص، نشانه ساختار بلوری منظم

دو نمونه نمایش داده شده است: سمت چپ: تصویر نمونه خالص  $\text{CsPbCl}_3$  در این تصویر، نانومکعبهای  $\text{CsPbCl}_3$  با ابعاد یکنواخت (در حدود ۱ میکرومتر یا کمتر)، به صورت خوشه‌های متراکم قابل مشاهده هستند. مورفولوژی مکعبی و سطح نسبتاً صاف و بدون ترک، نشان‌دهنده سنتز موفق ساختارهای کریستالی منظم است. سمت راست: تصویر نانوکامپوزیت  $\text{CsPbCl}_3/\text{GO}$  این بخش حضور همزمان نانومکعبهای  $\text{CsPbCl}_3$  (پرکننده) و صفحات شبه‌ورقه‌ای (ماتریس اکسیدگرافن، GO) را نمایش می‌دهد. مستطیل زرد، به نانومکعب‌های  $\text{CsPbCl}_3$  اشاره دارد و کادر قرمز پایین نیز صفحات GO را بزرگنمایی کرده است (۵۰۰ نانومتر). نانومکعب‌ها روی یا کنار صفحات GO پراکنده شده‌اند. یکنواختی نانومکعب‌ها در هر دو تصویر نشان‌دهنده کنترل خوب روی فرآیند رشد بلورهای  $\text{CsPbCl}_3$  در هر دو نمونه است. وجود صفحات GO به عنوان ماتریس زمینه، فرصتی برای توزیع مناسب فاز پرواسکایتی و افزایش سطح تماس و برهم‌کنش بین نانومکعب‌ها فراهم ساخته است. پراکندگی مناسب نانومکعب‌ها روی GO می‌تواند به بهبود انتقال بار، تقویت خواص اپتیکی و پایداری نانوکامپوزیت منجر شود. نقاط تمایز ساختاری: حضور هر دو فاز (نانومکعب و صفحه) در نمونه کامپوزیتی،



شکل ۳: طرحواره چیدمان اندازه گیری و طیف یونولومینسانس نانوکامپوزیت سنتز شده و اکسیدگرافن

#### ۴- نتیجه گیری

در این پژوهش، نانومکعب‌های  $\text{CsPbCl}_3$  به روش ساده و با استفاده از مواد اولیه با خلوص بالا و همچنین گرافن اکسید تهیه شده به روش هامرز، با موفقیت سنتز و به صورت نانوکامپوزیت‌های  $\text{CsPbCl}_3/\text{GO}$  آماده شدند. الگوی پراش XRD نمونه‌های سنتز شده، خلوص ساختاری بالا و شکل گیری کاملاً فاز مکعبی پروسکایت را تایید کرد و وجود پیک مجزا مربوط به  $\text{GO}$  نشان دهنده حضور موثر اکسیدگرافن در ساختار کامپوزیت بود. تصاویر FE-SEM، توزیع یکنواخت و اندازه مناسب نانومکعب‌های  $\text{CsPbCl}_3$  را نشان داد و ادغام موفق این نانومکعب‌ها روی صفحات ماتریس  $\text{GO}$  را اثبات کرد؛ امری که بر افزایش سطح تماس، پراکندگی بهینه و احتمال جلوگیری از آگلومراسیون دلالت دارد و می‌تواند پایداری و خواص الکترونیکی نمونه را ارتقاء بخشد. آزمون یونولومینسانس تحت تابش پرتو پروتون نیز نشان داد که نانوکامپوزیت  $\text{CsPbCl}_3/\text{GO}$  دارای شدت و ساختار طیفی بسیار مطلوب‌تری نسبت به  $\text{GO}$  خالص است؛ وجود پیک‌های عصر در ناحیه مرئی و شدت بالاتر

و کارایی بالا در تولید تابش تحت تحریک ذرات باردار است. اکسیدگرافن شدت سیگنال بسیار کمتر و گسترده‌تر، بدون پیک مشخص، که گویای عدم وجود ساختار بلوری نورده و عملکرد ضعیف‌تر در یونولومینسانس است. افزایش چشمگیر شدت یونولومینسانس در نمونه مرکب  $\text{CsPbCl}_3/\text{GO}$  نسبت به  $\text{GO}$  خالص، نشان دهنده نقش کلیدی فاز پرواسکایتی ( $\text{CsPbCl}_3$ ) در بهبود کارایی اپتیکی است. ماهیت چندپیک طیف نمونه مرکب، حکایت از وجود انرژی‌های گذار متفاوت و تقویت کارایی تابش دارد. حضور تصویر گسیل آبی در گوشه شکل، تاییدی بر نورتابی قابل مشاهده با چشم غیرمسلح می‌باشد. در این آزمایش، تاباندن پرتو پروتون به نانوکامپوزیت  $\text{CsPbCl}_3/\text{GO}$  نسبت به  $\text{GO}$  خالص، افزایش قابل توجهی در شدت و ساختار پیک یونولومینسانس ایجاد کرد؛ این نتایج بیانگر بهبود توانایی تابش و انتقال انرژی، و نقش موثر فاز  $\text{CsPbCl}_3$  در نانوکامپوزیت است. نتایج مطالعه اخیر نیز نشان داد که گرافن اکسید باعث افزایش چقرمگی و انعطاف فیلم می‌شود [۱۳].

D2TC04631H

- [4] Pali R., Khan M.Z., Sahu A., et al. Alkali silicates codoped with NIR-emitting RE ( $\text{Nd}^{3+}$  and  $\text{Yb}^{3+}$ ) ions for thermometry applications. *Journal of Fluorescence*, 2024. <https://doi.org/10.1007/s10895-024-03794-7>
- [5] Fang L., Luo D., Zhang J., Wang F., Zhang J., Zheng Z., Xu Z., Huang G. Ultrasound-assisted Zn-doped  $\text{CsPbCl}_3$  perovskite nanocrystals through Mn co-doping approach with bright luminescence and stability. *Optical Materials*, 2025, 161: 116823. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2025.116823>
- [6] Van de Voorde M., Hudry D., Busko D., Richards B.S., Saive R.  $\text{CsPbCl}_3:\text{Yb}^{3+}$  nanocrystals: Adverse effects of colloiddally stable ytterbium-rich reaction by-products on luminescent down-conversion performance. *Optical Materials: X*, 2025, 26: 100407. <https://doi.org/10.1016/j.omx.2025.100407>
- [7] He T., Li J., Ren C., Xiao S., Li Y., Chen R., Lin X. Strong two-photon absorption of Mn-doped  $\text{CsPbCl}_3$  perovskite nanocrystals. *Applied Physics Letters*, 2017, 111(21): 211105. <https://doi.org/10.1063/1.5006268>
- [8] Alamdari S., Majles Ara M.H., Tafreshi M.J. Synthesize and optical response of  $\text{ZnO}/\text{CdWO}_4:\text{Ce}$  nanocomposite with high sensitivity detection of ionizing radiations. *Optics & Laser Technology*, 2022, 151. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2022.107990>
- [9] Azadmehr S., Alamdari S., Tafreshi M.J. Flexible and transparent highly luminescent sensor based on doped zinc tungstate/graphene oxide nanocomposite. *European Physical Journal Plus*, 2025, 140: 284. <https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-025-06216-0>
- [10] Hajiebrahimi M., Alamdari S., Mirzaee O., et al. Flexible cerium-doped tungstate oxide/titanium dioxide nanocomposite for high-sensitivity energy conversion in optical applications. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2025, 36: 103. <https://doi.org/10.1007/s10854-024-14141-8>
- [11] Hemmati M., Tafreshi M.J., Ehsani M.H., Alamdari S. Highly sensitive and wide-range flexible sensor based on hybrid  $\text{BaWO}_4@\text{CS}$  nanocomposite. *Ceramics International*, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.05.347>
- [12] Alamdari S., Taheri S., Heydari E., et al. Flexible mixed oxides thin films: zinc oxide/cadmium tungstate/chitosan for optical devices. *Optical and Quantum Electronics*, 2024, 56: 443. <https://doi.org/10.1007/s11082-023-06078-9>

تابش، گواه کارایی بالای ساختار بلوری و نقش مثبت ترکیب با GO در بهبود خواص اپتیکی این نانوکامپوزیت می‌باشد. در مجموع، نتایج این مطالعه بیانگر آن است که سنتز ترکیبی  $\text{CsPbCl}_3/\text{GO}$  منجر به دستیابی به ساختار نانویی پایدار، یکنواخت و با خواص نوری تقویت‌شده شده که می‌تواند در زمینه‌های اپتوالکترونیک و حسگرهای تابش، گزینه‌ای عالی محسوب شود.

## تعارض منافع

نویسندگان این مقاله بدین وسیله اعلام می‌دارند که در ارتباط با انجام، تحلیل، نگارش و انتشار این پژوهش، هیچ‌گونه تعارض منافع مالی، شخصی، علمی یا سازمانی وجود ندارد.

## قدردانی و تشکر

این پژوهش تحت حمایت مادی بنیاد ملی علم (INSF) برگرفته از طرح شماره 4030721 انجام شده است.

## منابع

- [1] Kailasa S.K., Makwana K.P., Deshpande M.P., Choi Y., Stephanie R., Park C.Y., Park T.J. Synthesis of trypsin protected  $\text{CsPbCl}_3$  fluorescent nanocrystals for hydroxyl radical sensing. *Microchimica Acta*, 2025, 192(5): 217. <https://doi.org/10.1007/s00604-025-07070-8>
- [2] Kovalenko M., Bovgyra O., Chornodolskyy Y., Pidhornyi O., Pushak A., Voloshinovskii A. Electronic structure of Sr-doped  $\text{CsPbCl}_3$  crystal: First-principles investigation. *Low Temperature Physics*, 2025, 51(4): 339-347. <https://doi.org/10.1063/10.0035837>
- [3] Mykhaylyk V.B., Rudko M., Kraus H., Kapustianyk V., Kolomiets V., Vitoratou N., Chornodolskyy Y., Voloshinovskii A.S., Vasylechko L. Ultra-fast low temperature scintillation and X-ray luminescence of  $\text{CsPbCl}_3$  crystals. *Journal of Materials Chemistry C*, 2023, 11: 656-665. <https://doi.org/10.1039/>