



Monte Carlo Simulation-Based Investigation of Epoxy/Dysprosium Composites for X-ray and Gamma-ray Shielding Across Medicine Energy Ranges

Mohammadreza Alipoor^{*}, Mahdi Eshghi^{ID} and Ruhollah Razavi

Department of Physics, Imam Hossein University, Tehran, Iran

^{*} Corresponding author, Email: mohamadrezhaalipoor1997@gmail.com

(Received: 22 July 2025; Revised: 6 October 2025; Accepted: 12 October 2025; Available online: 28 October 2025)

ABSTRACT

Introduction and Objectives: Ionizing radiation protection is essential for minimizing the harmful effects of radiation exposure. While lead has traditionally been used as a shielding material due to its high density, its toxicity and physical limitations have driven the search for safer alternatives. This study investigates the gamma-ray attenuation properties of polymer composites containing non-toxic additives, focusing on their performance in the energy range of 15 keV to 10 MeV.

Methods and Materials: Using the Geant4 simulation toolkit, the shielding efficiency of polymer composites incorporating yttrium oxide, dysprosium oxide, and zirconium dioxide was analyzed in varying concentrations. The attenuation rates and gamma-ray transmission properties of these composites were systematically evaluated.

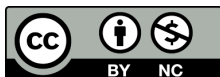
Results: The attenuation rate (intensity fraction decrease) drops uniformly with thickness, but remains consistently highest for Epoxy-5 and lowest for Epoxy-1. Below 0.5 MeV, performance is atomic number-dependent (photoelectric effect), but above this energy, all samples converge due to Compton scattering dominance. At 0.662 MeV, the average energy transferred to secondary electrons exceeds 290 keV, a value consistent across all composites, proving energy deposition is material independent.

Conclusion: Additive composition critically boosts shielding by increasing interaction probability, especially below 0.5 MeV. Epoxy-5 is superior for broad-spectrum attenuation, while Epoxy-1 is an effective, lightweight solution for shielding high-energy photons (>0.5 MeV) where Compton scattering minimizes the advantage of high-Z fillers.

Keywords: Gamma ray, Epoxy, Shielding, Polymer-Composites, Geant4.

How to Cite: Alipoor MR, Eshghi M, Razavi R. Monte Carlo simulation-based investigation of epoxy/dysprosium composites for X-ray and gamma-ray shielding across medicine energy ranges. J Adv Mater Eng. 2026;45(1):93-107. <https://doi.org/10.47176/jame.45.1.1142>

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 مبتنی بر شبیه‌سازی مونت کارلو از کامپوزیت‌های اپوکسی/دی‌سپروزیل برای محافظ اشعه ایکس و پرتو گاما در محدوده‌های انرژی پزشکی

محمدرضا علی‌پور*^{ID}، مهدی عشقی^{ID} و روح‌الله رضوی‌نژاد

گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه امام حسین(ع)، تهران، ایران
* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: mohamadrezhaalipoor1997@gmail.com

(دریافت: ۱۴۰۴/۴/۳۱، بازنگری: ۱۴۰۴/۷/۱۴، پذیرش: ۱۴۰۴/۷/۲۰، انتشار: ۱۴۰۴/۸/۶)

چکیده

مقدمه و اهداف: حفاظت در برابر پرتوهای یونیزان، برای کاهش اثرات مضر تابش بر بدن ضروری است. سرب به دلیل چگالی بالا به‌طور سنتی به‌عنوان ماده حفاظتی استفاده شده است، اما سمیت و محدودیت‌های فیزیکی آن باعث شده است که به دنبال جایگزین‌های ایمن‌تر باشیم. این مطالعه خواص تضعیف پرتو گاما و اشعه ایکس در کامپوزیت‌های پلیمری حاوی افزودنی‌های غیرسمی را بررسی می‌کند و عملکرد آن‌ها را در محدوده انرژی ۱۵ کیلوالکترون‌ولت تا ۱۰ مگاالکترون‌ولت ارزیابی می‌کند.

مواد و روش‌ها: با استفاده از ابزار شبیه‌سازی Geant4، کارایی حفاظتی کامپوزیت‌های پلیمری حاوی اکسید ایتیریم، اکسید دی‌سپروزیل و دی‌اکسید زیرکونیوم در غلظت‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت. نرخ تضعیف و خواص ترابرد پرتو گاما و اشعه ایکس در این کامپوزیت‌ها به صورت منسجم ارزیابی شد.

یافته‌ها: نرخ تضعیف به‌طور یکنواخت با ضخامت کاهش می‌یابد، اما برای Epoxy-5 به‌طور مداوم در بالاترین حد و برای Epoxy-1 در پایین‌ترین حد باقی می‌ماند. در زیر ۰/۵ مگاالکترون‌ولت، عملکرد وابسته به عدد اتمی است (اثر فوتوالکتریک)، اما بالاتر از این انرژی، همه نمونه‌ها به دلیل غلبه پراکندگی کامپتون همگرا می‌شوند. در ۰/۶۶۲ مگاالکترون‌ولت، میانگین انرژی منتقل شده به الکترون‌های ثانویه از ۲۹۰ کیلوالکترون‌ولت فراتر می‌رود، مقداری که در همه کامپوزیت‌ها ثابت است و ثابت می‌کند که رسوب انرژی مستقل از ماده است.

نتیجه‌گیری: ترکیب افزودنی با افزایش احتمال برهمکنش، به ویژه در زیر ۰/۵ مگاالکترون‌ولت، به‌طور قابل‌توجهی محافظت را افزایش می‌دهد. Epoxy-5 برای تضعیف طیف گسترده برتر است، درحالی‌که Epoxy-1 یک راه‌حل موثر و سبک برای محافظت از فوتون‌های پراانرژی است که در آن پراکندگی کامپتون مزیت پرکننده‌های با عدد اتمی بالا را به‌حداقل می‌رساند.

واژه‌های کلیدی: پرتو گاما، اپوکسی، حفاظ، کامپوزیت‌های پلیمری، Geant4.



۱- مقدمه

تابش یونیزان به‌طور گسترده در بخش‌های مختلف، از جمله بخش‌های تشخیصی و درمانی پزشکی، کاربردهای صنعتی و تحقیقات علمی استفاده می‌شود. با این حال، اثرات مضر قرار گرفتن در معرض تابش، توسعه مواد محافظ مؤثر برای محافظت از سلامت انسان و تضمین استفاده ایمن از فناوری هسته‌ای را ضروری می‌سازد. پرتو گاما و اشعه ایکس، به دلیل قدرت نفوذ بالای خود، چالش‌های قابل توجهی را در حفاظت در برابر تابش ایجاد می‌کند و طراحی مواد محافظ برای پرتو گاما و اشعه ایکس را به یک حوزه تحقیقاتی حیاتی تبدیل می‌کنند (۱ و ۲). مواد محافظ سنتی حاوی سرب، به دلیل چگالی بالا و اثربخشی آن‌ها در تضعیف پرتو گاما و اشعه ایکس، به‌طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته‌اند. با این حال، سمیت سرب، نگرانی‌های زیست‌محیطی و محدودیت‌های فیزیکی سرب، جستجو برای جایگزین‌های ایمن‌تر، سبک‌تر و مقرون‌به‌صرفه‌تر را برانگیخته است (۳-۵). این وضعیت، بر نیاز حیاتی برای تلاش‌های تحقیقاتی و توسعه مداوم با هدف شناسایی و مهندسی مواد مقرون‌به‌صرفه‌تر و کم‌خطرتر که می‌توانند به‌عنوان جایگزینی مناسب برای سرب در کاربردهای مختلف عمل کنند، تأکید می‌کند. در نهایت، اکتشاف مواد محافظ نوآورانه نه تنها پتانسیل افزایش پروتکل‌های ایمنی را دارد، بلکه به‌طور قابل توجهی بار مالی روی صنایع وابسته به فناوری‌های محافظ تشعشع را کاهش می‌دهد. در نتیجه، در سال‌های اخیر، مؤسسات تحقیقاتی متعددی در سطح جهان، مجموعه‌ای جامع از مواد محافظ در نظر گرفته شده برای طراحی حفاظت در برابر تشعشع را فرموله کرده‌اند (۶-۱۱). پیشرفت‌های اخیر در علم پلیمر، کامپوزیت‌های پلیمری را به عنوان گزینه‌های امیدوارکننده برای محافظت در برابر تشعشع معرفی کرده است. این مواد انعطاف‌پذیری، خواص سبک و توانایی ترکیب اکسیدهای فلزات سنگین به‌عنوان پرکننده برای افزایش راندمان محافظتی خود را ارائه می‌دهند. مطالعات نشان داده‌اند که کامپوزیت‌های پلیمری با افزودنی‌هایی مانند اکسید بیسموت، اکسید تنگستن و اکسید دیسپروزیوم، قابلیت‌های

تضعیف قابل توجهی از خود نشان می‌دهند و آن‌ها را به جایگزین‌های مناسبی برای محافظ‌های مبتنی بر سرب تبدیل می‌کنند (۱۲-۱۵). محققان، کامپوزیت‌های مختلفی از جمله پلی متیل متاکریلات، پلی اتیلن با چگالی بالا، پلی وینیل کلراید، کامپوزیت‌های پلیمری رزینی، لاستیک سیلیکونی، آجرهای پلیمری اپوکسی و پلی استر را مورد بررسی قرار داده‌اند (۱۶-۲۱). به‌عنوان مثال، دجنگاه و همکاران (۲۰) و هاشمی و همکاران (۲۱)، نشان داده‌اند که کامپوزیت‌های پلیمری انعطاف‌پذیر با افزودنی‌های فلزی یا سرامیکی، می‌توانند به‌طور مؤثر از پرتو گاما و اشعه ایکس محافظت کنند و در عین حال محدودیت‌های مواد سنتی را برطرف کنند. این یافته‌ها، بر اهمیت توسعه مواد محافظ مبتنی بر پلیمر نوآورانه متناسب با کاربردهای خاص تأکید می‌کنند. اپوکسی‌ها به دلیل خواص مکانیکی، حرارتی و شیمیایی برتر خود به‌طور گسترده در کامپوزیت‌های پلیمری استفاده می‌شوند. ترکیب پرکننده‌های عناصر سنگین این ویژگی‌ها را بیشتر تقویت می‌کند. کامپوزیت‌هایی که عناصر سنگین را در خود جای می‌دهند، می‌توانند به توزیع یکنواختی در سراسر ماتریس پلیمری دست یابند که به‌طور قابل توجهی پیوند شیمیایی را افزایش داده و برهمکنش‌های مولکولی بین ماتریس و پرکننده را تقویت می‌کند. این بهبود منجر به بهبود خواص مکانیکی و فیزیکی کامپوزیت‌های پلیمری حاصل می‌شود (۲۲ و ۲۳).

یور و همکاران (۲۴)، گزارش دادند که پراکندگی و پیوند مؤثر بین پرکننده و پلیمر منجر به افزایش استحکام کششی، مدول و سختی می‌شود. علاوه بر این، کوان و همکاران (۲۵)، تأکید کردند که عملیات شیمیایی که چسبندگی پرکننده/ماتریس را افزایش می‌دهند، خواص مکانیکی بهتری را به همراه دارند. بین و همکاران (۲۶)، در مورد چگونگی نقش توزیع همگن پرکننده و پیوند شیمیایی در بهبود خواص مکانیکی کامپوزیت بحث کردند. در نهایت، فیری و همکاران (۲۷)، توضیح دادند که توزیع یکنواخت پرکننده‌ها در ماتریس‌های پلیمری، برهمکنش‌های مولکولی را افزایش می‌دهد و در نتیجه خواص مکانیکی و فیزیکی کامپوزیت‌ها را تقویت می‌کند. برای این که کامپوزیت‌های پلیمری

با ایتیریم و دیسپروزیوم با کدهای Epoxy-1 تا Epoxy-5 مورد بررسی قرار گرفته‌اند. تمرکز اصلی این تحقیق، ارزیابی ویژگی‌های حفاظتی این مواد در برابر تشعشعات پرتویی برای کاربردهای صنعتی و پزشکی است. انتخاب دیسپروزیوم و زیرکونیوم، براساس خواص مطلوب آن‌ها برای محافظت در برابر تابش است. دیسپروزیوم، یک عنصر سنگین، به افزایش چگالی الکترون و افزایش تضعیف پرتو گاما و اشعه ایکس کمک می‌کند. زیرکونیوم به دلیل پایداری و اثربخشی آن در جذب تابش در این مطالعه گنجانده شده است. درصدهای خاص این عناصر، براساس مطالعات اولیه و ادبیاتی که نشان‌دهنده عملکرد بهینه در کاربردهای محافظت در برابر تابش هستند، تعیین شده‌اند (۳۲ و ۳۳). ترکیب شیمیایی و چگالی این نمونه‌ها در جدول (۱) ارائه شده است. پایداری زیرکونیوم در تمام نمونه‌ها، نشان‌دهنده نقش کلیدی آن در جذب تابش است. حضور رقابتی دیسپروزیوم و زیرکونیوم در ترکیب شیمیایی، بر عملکرد نهایی کامپوزیت تأثیر می‌گذارد که برای کاربردهای خاصی که نیاز به جذب بالای تابش دارند، طراحی شده است تا به وسیله شبیه‌سازی مونت کارلو بررسی گردد. محدوده موردبررسی برای دربرگرفتن کل دامنه کاربردهای پزشکی، که شامل روش‌های تشخیصی (۰/۵-۰/۱۵) مگاالکترون‌ولت) و انرژی‌های بالاتر مورد استفاده در پرتودرمانی (۰/۵-۱۰ مگاالکترون‌ولت) است، انتخاب شد. بررسی کل این طیف، امکان مقایسه روشی از چگونگی تغییر خواص مواد و الزامات ضخامت با انرژی را فراهم می‌کند.

۲-۱- ابزار شبیه‌سازی برپایه روش مونت کارلو

این مطالعه از شبیه‌سازی‌های مونت کارلو مبتنی بر جعبه ابزار Geant4، برای بررسی چگونگی ترابرد تابش پراثری، مانند پرتوهای گاما و پرتوهای ایکس، از طریق یک مکعب مستطیل به ضخامت یک سانتی‌متر استفاده کرد. شبیه‌سازی‌ها می‌تواند اثربخشی محافظت پرتو گاما و اشعه ایکس را در طیف انرژی از ۰/۵ تا ۱۰ مگاالکترون‌ولت ارزیابی کند. مسیر ذرات به صورت بصری در شکل (۱) نمایش داده شده است. سطح مقطع

بتوانند به‌طور مؤثر یکپارچگی ساختاری خود را حفظ کرده و در برابر آسیب‌های تابشی مقاومت کنند، چگالی الکترونی بالا در ساختار اتمی آن‌ها ضروری است. اکسیدهای فلزی، ازجمله اکسید آلومینیوم (Al_2O_3)، اکسید ایتیریم (Y_2O_3)، اکسید دیسپروزیوم (Dy_2O_3) و دی‌اکسید زیرکونیوم (ZrO_2)، اغلب در مقادیر کم به‌عنوان عوامل تقویت‌کننده در کامپوزیت‌ها گنجانده می‌شوند. این اکسیدها قدرت قابل‌توجهی در تضعیف پرتوهای گاما و اشعه ایکس نشان داده‌اند (۲۸-۳۰). مطالعه حاضر، نوآوری‌های متمایزی را معرفی می‌کند که براساس کار قبلی محققان روی یک کامپوزیت چندفلزی پلیمری برای محافظت گاما و نوترون بنا شده است (۳۱). درحالی‌که تحقیقات قبلی روی کامپوزیت‌های پلیمری تقویت‌شده با تنگستن و خواص حفاظتی پرتو گاما آن‌ها متمرکز بود، این کار به بررسی یک کامپوزیت جدید بر پایه اپوکسی تقویت‌شده با اکسید ایتیریم (Y_2O_3) و اکسید دیسپروزیوم (Dy_2O_3) می‌پردازد. این پرکننده‌ها به دلیل عدد اتمی بالا و پتانسیل آن‌ها برای تضعیف پرتو گاما برتر انتخاب شدند. نوآوری اصلی در ترکیب خاص این پرکننده‌ها با عدد اتمی بالا نهفته است که نه تنها اثربخشی محافظتی پرتو گاما و اشعه ایکس را افزایش می‌دهد، بلکه امکان تجزیه و تحلیل جامع‌تری از برهمکنش‌های پرتو گاما و اشعه ایکس با کامپوزیت مورد مطالعه را نیز فراهم می‌کند.

هدف از این تحقیق، ارزیابی قابلیت‌های محافظت از پرتو گاما و اشعه ایکس کامپوزیت‌های اپوکسی تازه پیشنهادشده از طریق شبیه‌سازی‌های مونت کارلو است. پارامترهای کلیدی مانند ضریب تضعیف خطی و جرمی محاسبه و با مواد مرسوم مقایسه خواهند شد. نتایج این مطالعه، ایجاد پایه‌ای برای توسعه کامپوزیت‌های پلیمری کارآمد، سبک و غیرسمی متناسب با کاربردهای پیشرفته حفاظت در برابر پرتو گاما و اشعه ایکس خواهد بود.

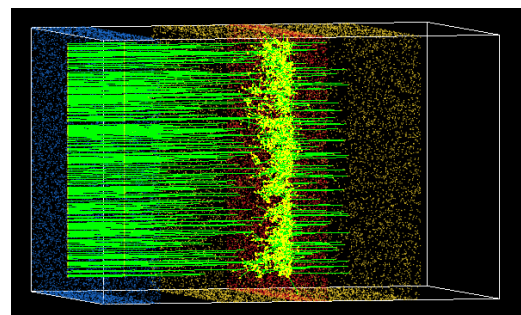
۲-۲ مواد و روش تحقیق

در این مطالعه، پنج نمونه کامپوزیت پلیمری اپوکسی تقویت‌شده

جدول ۱- کسر وزنی ترکیبات شیمیایی کامپوزیت‌های پلیمری منتخب

نمونه‌ها	چگالی (g/cm ³)	درصد جرمی عناصر (% wt)					
		H	C	O	Cl	Dy	Y
Epoxy-1	۵/۲۲	۱/۴۶	۱۴/۶۲	۱۷/۸۹	۸/۰۲	۳۴/۸۵	۱۵/۷۵
Epoxy-2	۵/۳۶	۱/۴۶	۱۴/۶۲	۱۷/۴۷	۸/۰۲	۳۹/۲۱	۱۱/۸۱
Epoxy-3	۵/۷۸	۱/۴۶	۱۴/۶۲	۱۶/۲۱	۸/۰۲	۵۲/۲۸	--
Epoxy-4	۵/۵	۱/۴۶	۱۴/۶۲	۱۷/۰۵	۸/۰۲	۴۳/۵۷	۷/۸۷
Epoxy-5	۵/۶۴	۱/۴۶	۱۴/۶۲	۱۶/۶۳	۸/۰۲	۴۷/۹۲	۳/۹۴

توصیف‌کننده تضعیف پرتو گاما و اشعه ایکس محاسبه شود. ضریب تضعیف جرمی^۱، برای توصیف چگونگی تضعیف پرتو فوتون‌های گاما یا اشعه ایکس توسط یک ماده ضروری است. همان‌طور که در شکل (۲) مشاهده می‌شود، نتایج یک اصل اساسی از برهمکنش فوتون را نشان می‌دهند که ضریب تضعیف جرمی با افزایش انرژی فوتون، از محدوده کیلوالکترون‌ولت به مگاالکترون‌ولت، به‌صورت نمایی کاهش می‌یابد. این روند در تمام نمونه‌ها مشاهده می‌شود و با چهارچوب نظری برهمکنش‌های فوتون با ماده سازگار است. وابستگی انرژی مشاهده‌شده را می‌توان با تغییر تسلط برهمکنش‌های فوتون با ماده توضیح داد. در انرژی‌های پایین، برهمکنش فوتوالکتریک (جذب فوتون توسط اتم‌ها) غالب است، درحالی‌که در انرژی‌های بالاتر، پراکندگی کامپتون^۲ سهم بیشتری پیدا می‌کند. وجود اکسید عناصر سنگین، قابلیت تضعیف پرتو گاما و اشعه ایکس را در کامپوزیت‌های پلیمری افزایش می‌دهد. به‌عنوان مثال، در انرژی ۱۵ کیلوالکترون‌ولت، مقادیر ضریب تضعیف جرمی از ۶۰ (سانتی‌متر مربع بر گرم) به ۵۰ (سانتی‌متر مربع بر گرم) کاهش می‌یابد. تاثیر افزودن اکسید عناصر سنگین در انرژی‌های بالاتر، بیشتر است؛ اما افزایش انرژی پرتو، تاثیر افزودن اکسید عناصر سنگین را افزایش می‌دهد. این اختلاف نشان‌دهنده نقش کلیدی عناصر سنگین در تقویت جذب پرتو از طریق برهمکنش فوتوالکتریک است. ضرایب در مقادیر بالاتر تقریباً یکسان هستند. در ضخامت‌های بالا که نیاز به پوشش سبک‌تر بیشتر خودش را نشان می‌دهد، حس می‌شود. منحنی‌های تضعیف برای نمونه‌های

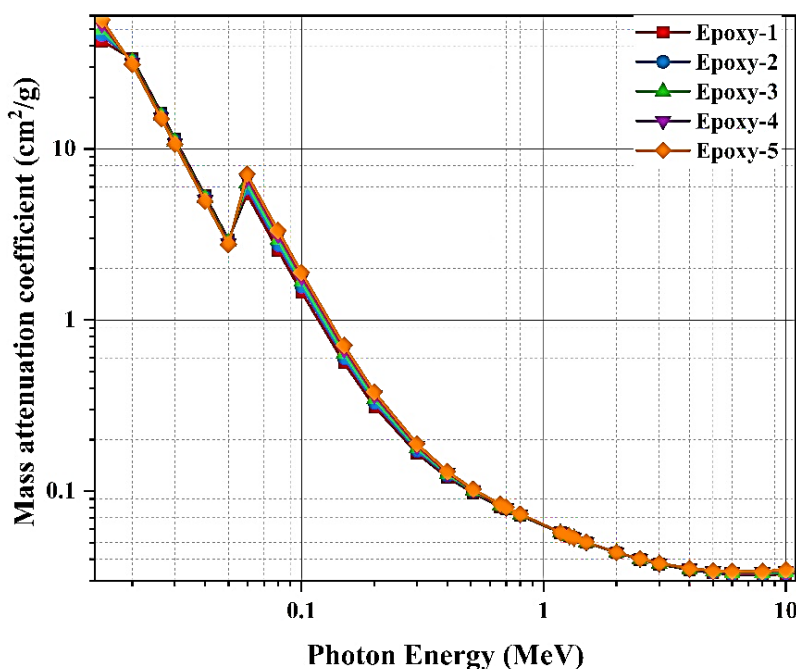


شکل ۱- نمایش طرحواره هندسه در شبیه‌ساز Geant4.

برهمکنش، با استفاده از G4EMStandardPhysics تعیین شد تا تضعیف پرتو گاما و اشعه ایکس را اندازه‌گیری کند. شبیه‌سازی‌های Geant4، برهمکنش‌های ذرات مانند رسوب انرژی، تعداد فوتون‌های عبوری و تضعیف را به‌صورت آماری ردیابی می‌کند. مقدار آستانه ۰/۱ میلی‌متر برای همه ذرات تعیین شد تا حداقل مسیر لازم برای ترابرد ذرات ثانویه را تعریف کند و دقت کافی را تضمین کند. برای به‌دست آوردن نتایج آماری قابل‌اعتماد با عدم قطعیت آماری ۱/۵ درصد و کمتر، ۱۰^۷ فوتون اولیه از یک منبع واحد در طول هر اجرای شبیه‌سازی ساطع شدند. این رویکرد تعداد زیادی از رویدادها را برای به‌حداقل رساندن خطاهای آماری در نظر گرفت و در نتیجه اعتبار یافته‌ها را افزایش داد (۳۴).

۳- نتایج و بحث

برای انجام یک بررسی جامع از ویژگی‌های محافظ تابش کامپوزیت‌های پلیمری، لازم است پارامترهای اساسی

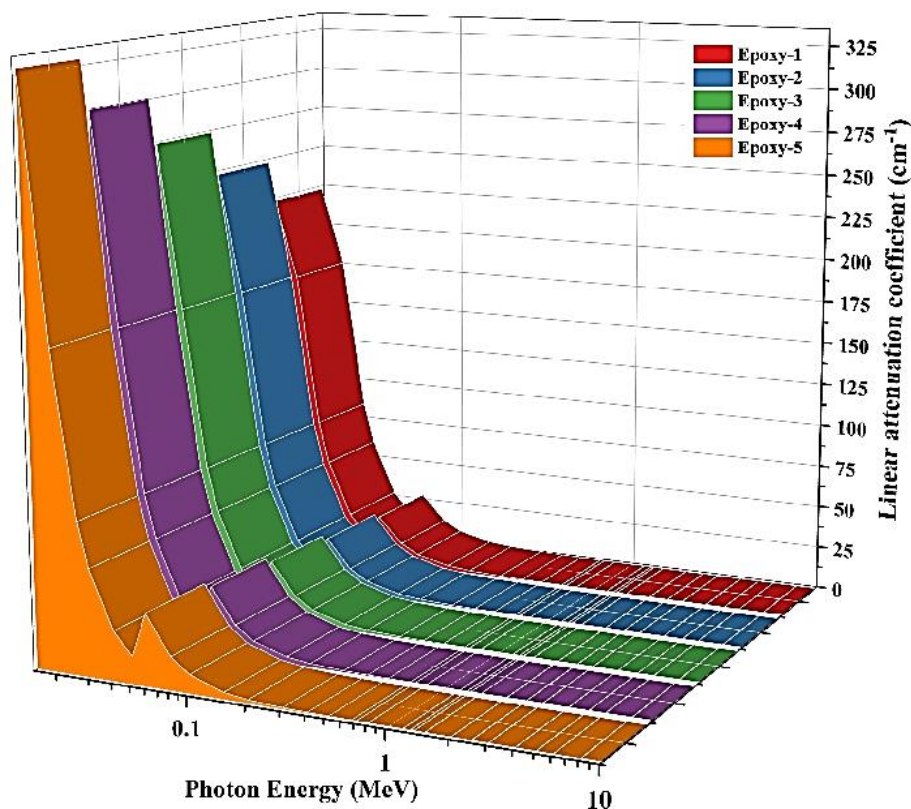


شکل ۲- تغییرات مقادیر ضریب تضعیف جرمی کامپوزیت های پلیمری منتخب برحسب انرژی فوتون ها.

گاما، ضریب تضعیف خطی^۳ است. ضریب تضعیف خطی، یک پارامتر حیاتی در فیزیک تابش است زیرا مستقیماً کسری از فوتون های تضعیف شده در واحد ضخامت یک ماده را تعیین می کند. این ضریب تحت تأثیر انرژی فوتون، ترکیب عنصری و چگالی ماده قرار دارد. ضریب تضعیف خطی بالاتر، نشان دهنده سپر مؤثرتر است؛ زیرا به این معنی است که فوتون های بیشتری در یک فاصله مشخص جذب یا پراکنده می شوند. شکل (۳)، ضریب تضعیف خطی را برای کامپوزیت های پلیمری انتخاب شده در سطوح انرژی مشخص نشان می دهد. نتایج نشان می دهد که ضریب تضعیف خطی، به شدت وابسته به انرژی است و با افزایش انرژی فوتون از ۱/۰ مگا الکترون ولت به ۱۰ مگا الکترون ولت، کاهش قابل توجهی را برای همه نمونه ها نشان می دهد. این رفتار توسط برهمکنش فوتون توضیح داده می شود. کاهش نمایی شدید مشاهده شده در ناحیه کم انرژی (تقریباً ۱/۰ تا ۵/۰ مگا الکترون ولت)، به دلیل وابستگی شدید انرژی اثر فوتوالکتریک^۴ است. با افزایش انرژی بیش از یک مگا الکترون ولت، سرعت کاهش به طور قابل توجهی کاهش می یابد که نشان دهنده گذار به پراکندگی کامپتون به عنوان فرآیند

روند مشابهی دارند و افزایش انرژی پرتو گاما و اشعه ایکس باعث کاهش شدید نمایی پارامتر تضعیف جرمی تا ۵۰ و ۷۰ کیلو الکترون ولت می شود. یکی از ویژگی های متمایز در نتایج، وجود لبه های جذب است که به ویژه در نزدیکی ۵۳ کیلو الکترون ولت برای کامپوزیت های خاص مشهود است. این ها قله نیستند، بلکه ناپیوستگی های تیزی هستند که در آن ها ضریب تضعیف به طور ناگهانی افزایش می یابد. این پدیده زمانی رخ می دهد که انرژی فوتون از انرژی اتصال یک پوسته الکترونی داخلی (مثلاً پوسته K) یک عنصر تشکیل دهنده، مانند دیسپروزیوم، پیشی می گیرد. در این آستانه، سطح مقطع جذب فوتوالکتریک به شدت افزایش می یابد و باعث افزایش موضعی در اثربخشی محافظ می شود. در محدوده انرژی های بالاتر (مثلاً بیشتر از یک مگا الکترون ولت)، تفاوت بین نمونه ها کمتر می شود؛ زیرا اثر کامپتون که وابستگی کمتری به عدد اتمی دارد، غالب می شود. با این حال، حتی در این محدوده، دیسپروزیوم می تواند با افزایش چگالی الکترونی، سهم کوچکی در بهبود تضعیف داشته باشد.

یکی دیگر از کمیت های اساسی برای توصیف تضعیف پرتو

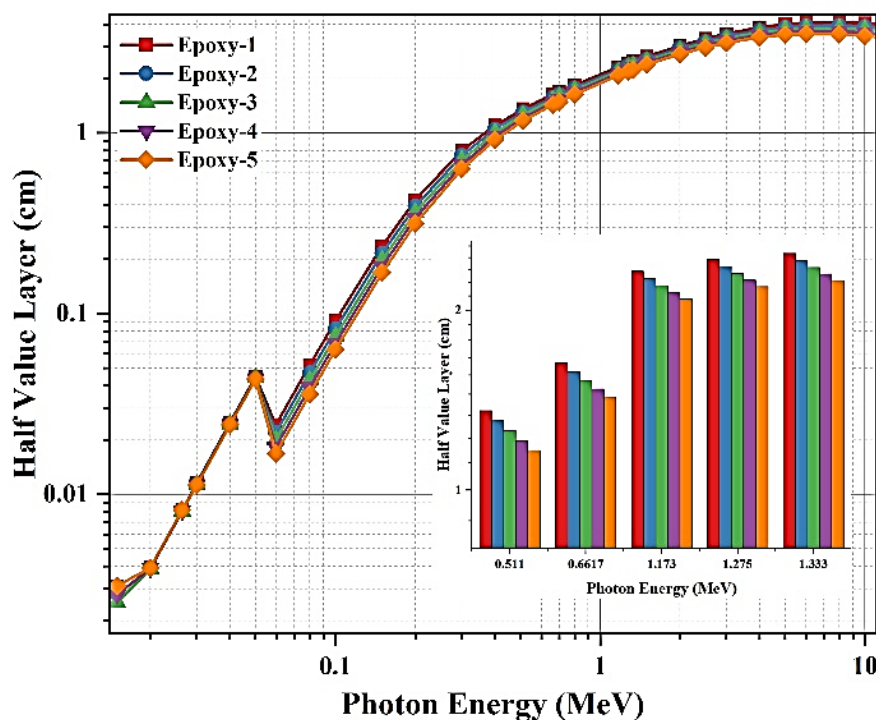


شکل ۳- تغییرات ضریب تضعیف خطی کامپوزیت‌های پلیمری منتخب برحسب انرژی فوتون‌ها.

به چگالی الکترون بستگی دارد تا عدد اتمی. در نتیجه، در حالی که عناصر سنگین هنوز هم مزیتی دارند، مزیت نسبی آن‌ها نسبت به رژیم کم‌انرژی کمتر چشمگیر است. تغییر منسجم در مقادیر ضریب تضعیف خطی از Epoxy-1 تا Epoxy-5، نقش حیاتی محتوای پرکننده اکسید عناصر سنگین را در افزایش عملکرد محافظت از پرتو گاما در کامپوزیت‌های پلیمری تأیید می‌کند.

لایه نیم‌مقدار^۵، یک پارامتر عملی است که ضخامت محافظ مورد نیاز برای تضعیف پرتو تابشی به نصف شدت اولیه می‌باشد. شکل (۴)، لایه نیم‌مقدار را به عنوان تابعی از انرژی فوتون برای پنج کامپوزیت اپوکسی نشان می‌دهد. لایه نیم‌مقدار، با افزایش انرژی فوتون برای همه نمونه‌ها افزایش می‌یابد. این روند تأیید می‌کند که پرتوهای گاما با انرژی بالاتر، نفوذ بیشتری دارند و برای دستیابی به همان سطح تضعیف، نیاز به ضخامت بیشتری از ماده دارند. به عنوان مثال، لایه نیم‌مقدار در یک مگاالکترون‌ولت یک مرتبه بزرگتر از ۰/۱ مگاالکترون‌ولت است که چالش

برهمکنش غالب است که وابستگی بسیار ضعیف‌تری به انرژی دارد. نتایج همچنین به وضوح نشان می‌دهند که ضریب تضعیف خطی، تابعی از چگالی و ترکیب کامپوزیت است. به طوری که Epoxy-5 بالاترین مقادیر ضریب تضعیف خطی و Epoxy-1 پایین‌ترین مقادیر را نشان می‌دهند. این رتبه‌بندی مستقیماً به افزایش چگالی و غلظت بالاتر اکسیدهای عناصر سنگین (مانند دیسپروزیوم یا ایتربیوم) در Epoxy-5 در مقایسه با Epoxy-1 نسبت داده می‌شود. حضور این عناصر سنگین، ضریب تضعیف خطی را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهد؛ به ویژه در انرژی‌های پایین‌تر که اثر فوتوالکتریک غالب است، زیرا احتمال آن به شدت با عدد اتمی جاذب افزایش می‌یابد. تفاوت در ضریب تضعیف خطی بین نمونه‌ها در انرژی‌های پایین‌تر بیشتر مشهود است و به تدریج در انرژی‌های بالاتر (بیشتر از یک مگاالکترون‌ولت) کاهش می‌یابد. این همگرایی به این دلیل رخ می‌دهد که پراکندگی کامپتون که در این محدوده انرژی غالب می‌شود، در درجه اول

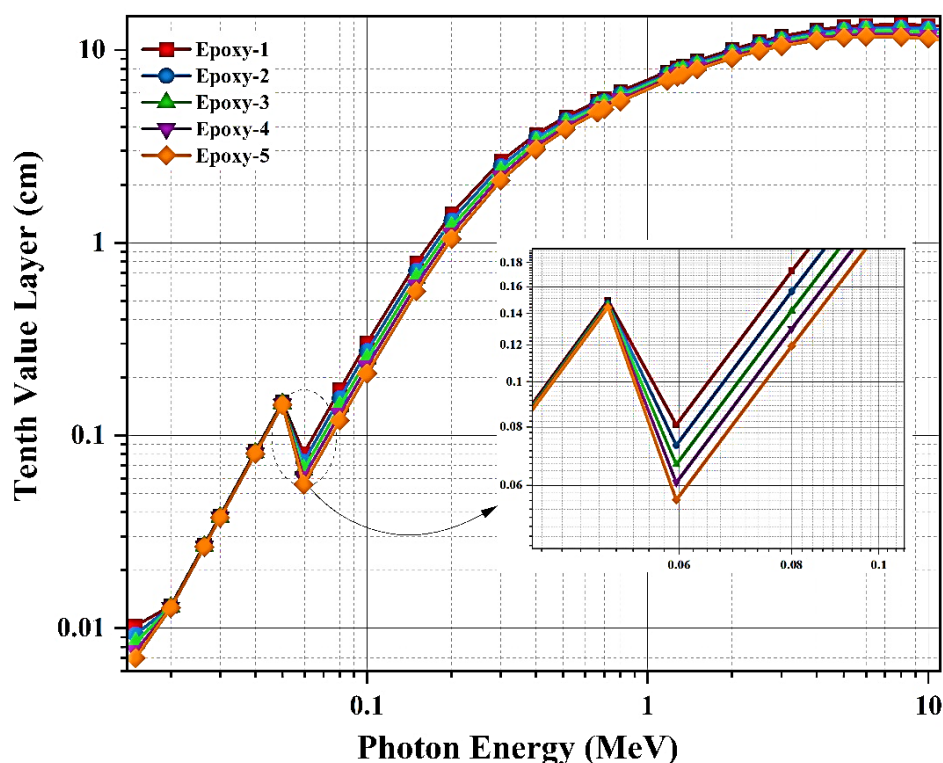


شکل ۴- تغییرات مقادیر لایه نیم‌مقدار کامپوزیت‌های پلیمری منتخب برحسب انرژی فوتون‌ها.

در انرژی‌های خاص (مثلاً ۰/۶۶۲ مگاالکترون‌ولت) داده‌های دقیقی را برای انتخاب ماده و ضخامت مناسب برای محافظت در برابر منابع رادیو ایزوتوپ گاما ارائه می‌دهند.

لایه یک‌دهم مقدار، یک پارامتر محافظ حیاتی است که به‌عنوان ضخامت ماده موردنیاز برای کاهش شدت فوتون فرودی به یک‌دهم مقدار اولیه آن تعریف می‌شود. همان‌طور که در شکل (۵) نشان داده شده است، لایه یک‌دهم مقدار با افزایش انرژی فوتون برای هر پنج کامپوزیت اپوکسی به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌یابد و از مقداری در حدود ۰/۱ سانتی‌متر در ۰/۱ مگاالکترون‌ولت به مقداری بیش از ۱۰ سانتی‌متر در ۱۰ مگاالکترون‌ولت می‌رسد. این روند، نتیجه مستقیم کاهش احتمال برهمکنش‌های فوتون که با ضریب میرایی خطی اندازه‌گیری می‌شود، با افزایش انرژی فوتون است. فوتون‌های بالاتر، عمیق‌تر نفوذ می‌کنند و برای میرایی مؤثر، ضخامت بیشتری از ماده لازم است. مقایسه نمونه‌ها در هر انرژی معین، تأثیر ترکیب و چگالی را نشان می‌دهد. نمونه با بالاترین چگالی و غلظت اکسیدهای عناصر سنگین، Epoxy-5، به‌طور مداوم کوچک‌ترین

محافظت از منابع تابشی با انرژی بالا را برجسته می‌کند. نتایج به وضوح تأثیر ترکیب و چگالی مواد بر ضخامت محافظ را نشان می‌دهند. نمونه با نام Epoxy-5 کمترین مقادیر لایه نیم‌مقدار و Epoxy-1 بیشترین مقدار را در کل طیف انرژی نشان می‌دهد. این بدان معنا است که برای ارائه همان اثربخشی محافظی که یک لایه ضخیم‌تر Epoxy-1 دارد، به یک لایه نازک‌تر Epoxy-5 نیاز است. این رتبه‌بندی با افزایش چگالی و غلظت اکسیدهای عناصر سنگین (مانند دیسپروزیوم) از Epoxy-1 به Epoxy-5، ارتباط مستقیم دارد. چگالی و عدد اتمی بالاتر، احتمال برهمکنش‌های فوتونی، به‌ویژه اثر فوتوالکتریک در انرژی‌های پایین‌تر را افزایش می‌دهد و منجر به لایه نیم‌مقدار پایین‌تر می‌شود. تفاوت در لایه نیم‌مقدار بین نمونه‌ها در انرژی‌های پایین‌تر بسیار قابل‌توجه است و در انرژی‌های بالاتر، هرچند با درجه کمی کمتر، همچنان ادامه دارد. این نشان می‌دهد که مزیت ترکیب عناصر سنگین حتی زمانی که پراکندگی کامپتون به مکانیسم برهمکنش غالب تبدیل می‌شود، حفظ می‌شود؛ زیرا این عناصر همچنین به چگالی الکترونی بالاتر کمک می‌کنند. مقادیر لایه نیم‌مقدار محاسبه‌شده

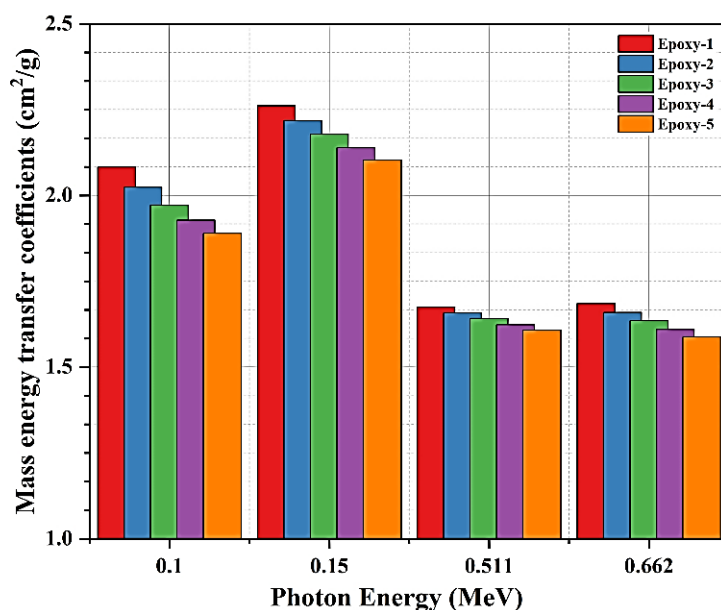


شکل ۵- تغییرات مقادیر یک‌دهم مقدار کامپوزیت‌های پلیمری منتخب برحسب انرژی فوتون‌ها.

تفاوت مطلق در لایه یک‌دهم مقدار بین نمونه‌ها با انرژی تغییر می‌کند، عملکرد برتر کامپوزیت‌های چگال‌تر و سنگین‌تر در کل طیف انرژی حفظ می‌شود.

شکل (۶)، ضریب انتقال انرژی جرمی (برحسب سانتی‌متر مربع بر گرم) را برای پنج کامپوزیت پلیمری پایه اپوکسی را به‌عنوان تابعی از انرژی فوتون نشان می‌دهد. این ضریب، کسر انرژی فوتون منتقل شده به ذرات باردار (عمدتاً الکترون‌ها) در واحد جرم ماده را کمی می‌کنند، که مستقیماً با توانایی ماده در جذب و ذخیره انرژی از فوتون مرتبط است. نتایج یک روند واضح را نشان می‌دهند، با افزایش انرژی فوتون، ضریب انتقال انرژی جرمی در تمام نمونه‌های کامپوزیتی کاهش می‌یابد. این رفتار با اصول اساسی برهمکنش‌های فوتون با ماده سازگار است. در انرژی‌های پایین (مثلاً ۰/۱ مگاالکترون‌ولت)، اثر فوتوالکتریک غالب است، جایی که احتمال جذب به شدت با Z^4 - Z^5 (عدد اتمی) مقیاس می‌شود و باعث می‌شود مواد حاوی عناصر با Z

لایه یک‌دهم مقدار را نشان می‌دهد. در مقابل، Epoxy-1 با کمترین چگالی، بیشترین لایه یک‌دهم مقدار را دارد. این نشان می‌دهد که یک کامپوزیت چگال‌تر با عناصر سنگین، محافظ کارآمدتری است؛ زیرا برای دستیابی به همان سطح تضعیف، به ضخامت کمتری نیاز دارد. این محافظت بهبودیافته، به دلیل تعداد بیشتر اتم‌های جاذب در واحد حجم و عدد اتمی بالای عناصر سنگین است که احتمال برهمکنش‌ها، به‌ویژه اثر فوتوالکتریک در انرژی‌های پایین‌تر را افزایش می‌دهد. نتایج شکل (۵)، به‌وضوح این موضوع را نشان می‌دهد. به‌عنوان مثال، در انرژی فوتون ۰/۱ مگاالکترون‌ولت، لایه یک‌دهم مقدار برای کامپوزیت Epoxy-5 با چگالی بالا است؛ درحالی‌که برای کامپوزیت Epoxy-1 با چگالی کم است. این بدان معنا است که Epoxy-1 برای دستیابی به همان ضریب کاهش شدت، به بیش از دو برابر ضخامت Epoxy-5 نیاز دارد که نشان‌دهنده بهبود قابل توجه در اثربخشی محافظت برای کامپوزیت بارگذاری شده با عناصر سنگین است. درحالی‌که



شکل ۶- تغییرات مقادیر انرژی منتقل شده جرمی کامپوزیت های پلیمری منتخب برحسب انرژی فوتون ها.

می شوند. وجود افزودنی های با عدد اتمی بالا، تضعیف کم انرژی را از طریق اثر فوتوالکتریک افزایش می دهد؛ درحالی که در انرژی های بالاتر، تفاوت بین نمونه ها به دلیل غلبه پراکندگی کامپتون کاهش می یابد.

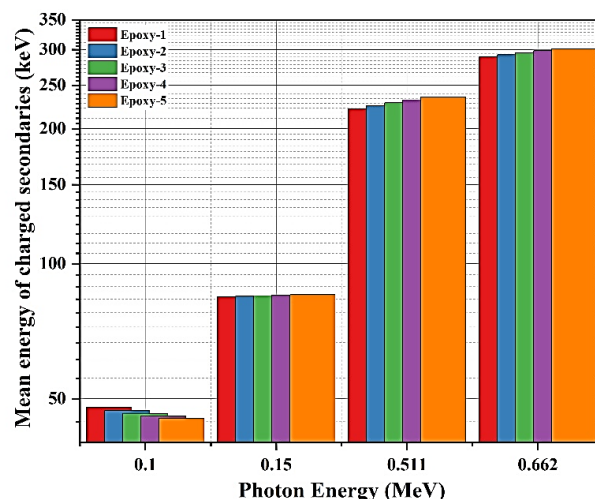
شکل (۷)، میانگین انرژی (برحسب کیلوالکترون ولت) منتقل شده به ذرات ثانویه باردار (عمدتاً الکترون های کامپتون و فوتوالکتریک ها) را به عنوان تابعی از انرژی فوتون های فرودی برای پنج ماده کامپوزیتی منتخب نشان می دهد. این کمیت، میانگین انرژی جنبشی منتقل شده به ذرات باردار در هر برهمکنش فوتون را نشان می دهد که بر رسوب انرژی موضعی حاکم است و در محافظت پرتویی کاربردهای بسیار مهمی دارد. در انرژی های پایین (۰/۱ مگاالکترون ولت)، میانگین انرژی ذرات ثانویه نسبتاً کم است (حدود ۴۰-۵۰ کیلوالکترون ولت)، که با غلبه اثر فوتوالکتریک سازگار است. در این محدوده، تقریباً تمام انرژی فوتون به یک فوتوالکترون واحد (منهای انرژی اتصال الکترون خارج شده) منتقل می شود، اما از آنجا که انرژی فوتون فرودی کوچک است، انرژی الکترون حاصل نیز متوسط است. تغییرات حداقلی بین کامپوزیت ها در این انرژی، نشان می دهد که تفاوت در ترکیب عنصری (با محتوای ZrO_2 یا Dy_2O_3) تأثیر کمی

بالا - مانند دیسپروزیوم ($Z=66$) و زیرکونیوم ($Z=40$) در تضعیف فوتون ها، به طور قابل توجهی مؤثرتر باشند. در نتیجه، Epoxy-5 (با بالاترین غلظت اکسیدهای سنگین)، بالاترین ضریب انتقال انرژی را در ۰/۱ مگاالکترون ولت نشان می دهد. با افزایش انرژی فوتون به محدوده میانی (۰/۵۱۱-۰/۶۶۲ مگاالکترون ولت)، پراکندگی کامپتون به برهمکنش غالب تبدیل می شود. در این محدوده، سطح مقطع در درجه اول به چگالی الکترون بستگی دارد تا عدد اتمی، که منجر به همگرایی در ضریب انتقال انرژی در بین کامپوزیت های مختلف می شود. کاهش مشاهده شده در ضریب انتقال انرژی جرم با افزایش انرژی، نشان دهنده کاهش احتمال رسوب انرژی در هر برهمکنش است؛ زیرا فوتون های پراکنده شده توسط کامپتون، بخش بیشتری از انرژی اولیه خود را در انرژی های فرودی بالاتر حفظ می کنند. نکته قابل توجه این است که نمودار، افت ناگهانی را نشان نمی دهد، بلکه یک کاهش ملایم و یکنواخت را مطابق با پیش بینی های نظری نشان می دهد. مقادیر کاهش، نشان دهنده کاهش راندمان انتقال انرژی به ماده با افزایش انرژی فوتون هستند. به طور خلاصه، شکل (۶) نشان می دهد که چگونه ویژگی های تضعیف وابسته به انرژی کامپوزیت های پلیمری، توسط برهمکنش فوتونی اساسی کنترل

اتمی، به چگالی الکترون بستگی دارد؛ بنابراین، افزایش مشاهده‌شده در انرژی ذرات ثانویه با انرژی فوتون، به‌خودی‌خود به وجود اکسید دیسپروزیوم نسبت داده نمی‌شود، بلکه به روند وابسته به انرژی برهمکنش‌های فوتون مربوط می‌شود. سازگاری بین هر نمونه تأکید می‌کند که برای انرژی‌های غالب پراکندگی کامپتون، میانگین انتقال انرژی تا حد زیادی مستقل از ماده است. این یک بینش کلیدی برای طراحی مواد محافظ تابش است که در آن رسوب انرژی به ازای هر برهمکنش، باید به‌طور قابل‌اعتمادی پیش‌بینی شود.

شکل (۸)، تغییرات ضریب عبور فوتون‌ها را به‌عنوان تابعی از انرژی فوتون برای پنج نمونه کامپوزیت پلیمری منتخب نشان می‌دهد. شکل (۹)، نرخ تضعیف شدت فوتون‌ها را به‌عنوان تابعی از ضخامت ماده برای همان کامپوزیت‌ها نشان می‌دهد. با افزایش انرژی فوتون از ۰/۱ مگاالکترون‌ولت به ۱/۱۷۳ مگاالکترون‌ولت، ضریب عبور به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده کاهش احتمال برهمکنش در واحد طول مسیر است. این رفتار با وابستگی انرژی و سطح مقطع برهمکنش فوتون با ماده سازگار است؛ در انرژی‌های پایین‌تر (کمتر از ۰/۵ مگاالکترون‌ولت) اثر فوتوالکتریک غالب می‌شود و با افزایش انرژی به‌شدت کاهش می‌یابد؛ درحالی‌که پراکندگی کامپتون در انرژی‌های میانی غالب می‌شود و کاهش تدریجی‌تری را نشان می‌دهد. تولید زوج در انرژی بالای ۱/۰۲۲ مگاالکترون‌ولت اهمیت پیدا می‌کند، اما به‌دلیل ماهیت عدد اتمی پایین ماتریس پلیمری، در اینجا به‌شدت مشهود نیست. افزایش مشاهده‌شده در عبور، با افزایش انرژی نشان می‌دهد که فوتون‌های کمتری در واحد ضخامت تضعیف می‌شوند و به کسر بیشتری اجازه می‌دهند تا به عمق بیشتری در ماده نفوذ کنند. در نتیجه، ضریب تضعیف خطی با افزایش انرژی فوتون کاهش می‌یابد و منجر به نرخ‌های عبور بالاتر می‌شود. در شکل (۹)، نرخ تضعیف که به‌صورت کاهش کسر شدت تعریف می‌شود، به‌طور یکنواخت با افزایش ضخامت برای همه نمونه‌ها کاهش می‌یابد.

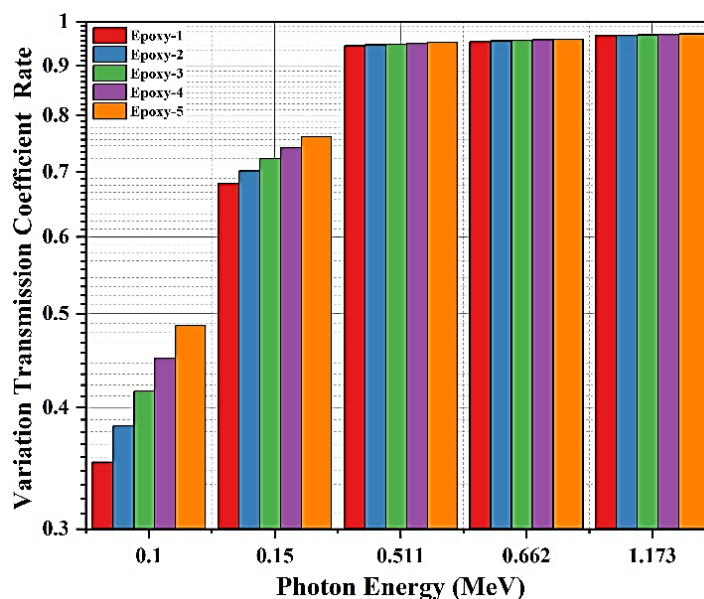
در هر ضخامت مشخص، نرخ تضعیف برای Epoxy-5



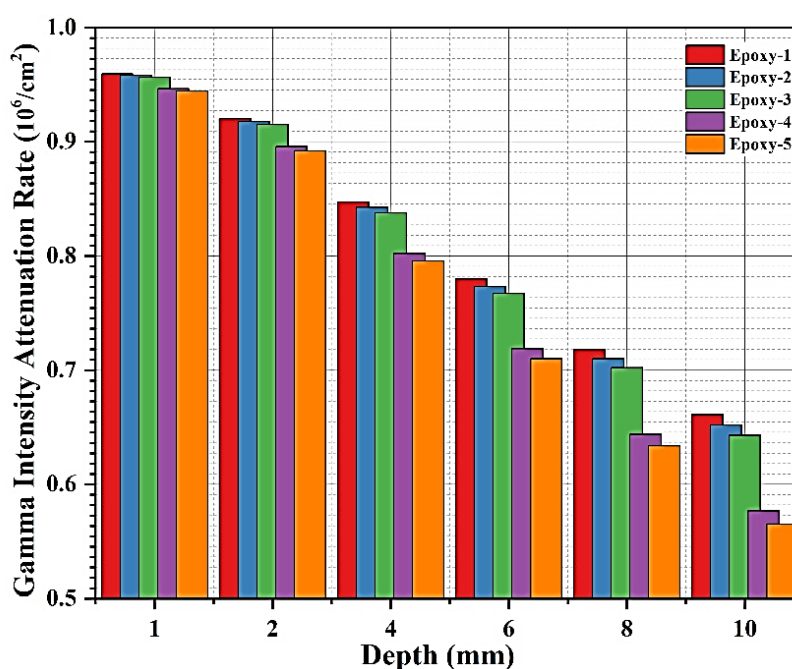
شکل ۷- تغییرات میانگین مقادیر انرژی ذرات ثانویه

کامپوزیت‌های پلیمری منتخب برحسب انرژی فوتون‌ها.

بر میانگین انرژی ثانویه دارد. با توجه به این‌که سطح مقطع فوتوالکتریک به‌شدت به عدد اتمی بستگی دارد، اما انتقال انرژی به‌ازای هر برهمکنش تا حد زیادی توسط خود انرژی فوتون تعیین می‌شود. با افزایش انرژی فوتون فراتر از ۰/۱ مگاالکترون‌ولت، برهمکنش غالب به سمت پراکندگی کامپتون تغییر می‌کند. در اینجا، میانگین انرژی الکترون‌های ثانویه به شدت افزایش می‌یابد (از حدود ۷۵ کیلوالکترون‌ولت در ۰/۱۵ مگاالکترون‌ولت به بیش از ۲۹۰ کیلوالکترون‌ولت در ۰/۶۶۲ مگاالکترون‌ولت) که منعکس‌کننده اثر پراکندگی کامپتون است که در آن انرژی منتقل‌شده به الکترون پس‌زننده، با انرژی فوتون فرودی افزایش می‌یابد (تا حداکثر در ۵۱۱ کیلوالکترون‌ولت، انرژی سکون الکترون). نکته مهم این است که مقادیر تقریباً یکسان در هر پنج کامپوزیت در هر انرژی فوتون، نشان می‌دهد که انرژی میانگین ذرات ثانویه در درجه اول توسط انرژی فوتون فرودی و فیزیک بنیادی برهمکنش (کامپتون یا فوتوالکتریک) کنترل می‌شود، نه توسط ترکیب ماده. درحالی‌که عناصر با عدد اتمی بالا مانند دیسپروزیوم، احتمال برهمکنش را افزایش می‌دهند (از طریق افزایش سطح مقطع)، انرژی میانگین ذخیره‌شده به ازای هر برهمکنش را در محدوده تحت سلطه کامپتون به‌طور قابل‌توجهی تغییر نمی‌دهند؛ زیرا پراکندگی کامپتون به جای عدد



شکل ۸- تغییرات ضریب انتقال برای کامپوزیت های پلیمری منتخب برحسب انرژی فوتون ها.



شکل ۹- تغییرات تضعیف شدت برای کامپوزیت های پلیمری منتخب برحسب انرژی ضخامت.

انرژی های پایین تر که اثر فوتوالکتریک بیشترین حساسیت را به عدد اتمی دارد. قابل توجه است که در انرژی های فوتونی بالاتر از تقریباً ۵/۰ مگا الکترون ولت، ضرایب انتقال برای همه نمونه ها به سمت واحد همگرا می شوند (یعنی انتقال تقریباً کامل) که نشان دهنده غلبه پراکندگی کامپتون است که وابستگی کمتری به

بالاترین و برای Epoxy-1 پایین ترین است که نشان می دهد Epoxy-5 عملکرد حفاظتی بهتری ارائه می دهد. این روند با غلظت دیسپروزیوم همبستگی دارد. با کاهش محتوای دیسپروزیوم در سری نمونه ها، سطح مقطع جذب فوتوالکتریک کاهش می یابد و در نتیجه اثربخشی محافظ را کاهش می دهد، به ویژه در

ترکیب مواد غیرسمی می‌تواند منجر به محافظت مؤثر در برابر پرتو گاما شود و جایگزین مناسبی برای مواد مرسوم مبتنی بر سرب باشد. تجزیه و تحلیل ضریب تضعیف نشان می‌دهد که با افزایش انرژی پرتو گاما، سطح مقطع برهمکنش به صورت نمایی کاهش می‌یابد، به‌ویژه در محدوده اثر فوتوالکتریک و پراکندگی کامپتون. این رفتار بر اهمیت ترکیب مواد در بهینه‌سازی عملکرد محافظت در برابر پرتو تأکید می‌کند. به عنوان مثال، وجود عناصر سنگین مانند دیسپروزیوم و زیرکونیوم به‌طور قابل توجهی جذب فوتون را در انرژی‌های پایین‌تر افزایش می‌دهد؛ درحالی‌که در انرژی‌های متوسط، پراکندگی کامپتون به مکانیسم غالب تبدیل می‌شود. مطالعات آینده باید پایداری و دوام طولانی مدت این کامپوزیت‌های پلیمری را در شرایط محیطی مختلف بررسی کنند. علاوه بر این، بررسی ترکیب سایر اکسیدهای فلزات سنگین و اثرات هم‌افزایی آن‌ها بر تضعیف فوتون‌ها، می‌تواند عملکرد این مواد را بیشتر افزایش دهد. اعتبارسنجی تجربی نتایج شبیه‌سازی در کاربردهای دنیای واقعی، مانند محیط‌های پزشکی و صنعتی، برای ارزیابی کاربرد عملی این کامپوزیت‌ها نیز بسیار مهم خواهد بود. در نتیجه، نتایج این مطالعه به توسعه مداوم مواد محافظ پرتوی نوآورانه و غیرسمی کمک می‌کند و راه را برای کاربردهای ایمن‌تر و کارآمدتر در حفاظت در برابر پرتو هموار می‌سازد.

تشکر و سپاسگزاری

از دانشگاه امام حسین بابت حمایت معنوی این تحقیق سپاسگزاری می‌گردد.

تضاد منافع

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

سهم نویسندگان

محمدرضا علی‌پور: محاسبه، نگارش پیش‌نویس اصلی،

عدد اتمی دارد و وابستگی انرژی ضعیف‌تری دارد. این توضیح می‌دهد که چرا نرخ‌های تضعیف در نمونه‌های مختلف در انرژی‌های بالاتر (بیشتر از ۰/۶۶۲ مگاالکترون‌ولت) مشابه می‌شوند، همان‌طور که در شکل (۸) مشاهده می‌شود.

به‌طور کلی، نفوذ فوتون‌ها با انرژی فوتون به دلیل کاهش سطح مقطع برهمکنش افزایش می‌یابد. اثربخشی محافظ با کاهش غلظت دیسپروزیوم، به‌ویژه در انرژی‌های پایین‌تر، کاهش می‌یابد. در انرژی‌های بالاتر، با غلبه پراکندگی کامپتون و کاهش حساسیت به ترکیب مواد، تفاوت‌های بین نمونه‌ها کاهش می‌یابد. در نهایت، این مطالعه نشان می‌دهد که Epoxy-5 محافظ مناسبی برای انرژی کم (TVL معادل ۰/۲ میلی‌متر در ۱۰۰ کیلوالکترون‌ولت) ارائه می‌دهد که آن را برای کاربردهای سبک و غیرسمی مانند محافظ پوشیدنی در رادیولوژی تشخیصی مناسب می‌کند؛ درحالی‌که عملکرد محدود آن در انرژی بالا، نیاز به طرح‌های هیبریدی را در زمینه‌های محافظ گسترده‌تر برجسته می‌کند.

۴- نتیجه‌گیری

این مطالعه به بررسی قابلیت‌های محافظت پرتو گاما در نمونه‌های کامپوزیت پلیمری تقویت‌شده با اکسید دیسپروزیوم (Dy_2O_3)، اکسید ایتربیوم (Yb_2O_3) و دی‌اکسید زیرکونیوم (ZrO_2) می‌پردازد. شبیه‌سازی Geant4 برای ارزیابی خواص تضعیف پرتو گاما در طیف وسیعی از انرژی فوتون، از ۱۵ کیلوالکترون‌ولت تا ۱۰ مگاالکترون‌ولت، به کار گرفته شد. نتایج نشان می‌دهد که کامپوزیت‌های پلیمری پیشنهادی در مقایسه با مواد سنتی مبتنی بر سرب و برخی از پلیمرهای تضعیف‌کننده تابش رایج، عملکرد محافظتی بهتری از خود نشان می‌دهند. در میان نمونه‌های منتخب، Epoxy-5 بالاترین راندمان تضعیف پرتو گاما را نشان داد که نقش مفید دیسپروزیوم در افزایش خواص محافظتی ماتریس پلیمری را تأیید می‌کند. نکته قابل توجه این است که Epoxy-1 در انرژی‌های بالاتر، ضمن حفظ وزن کمتر، تضعیف پرتو امیدوارکننده‌ای را نشان داد که نشان‌دهنده پتانسیل آن برای کاربردهایی است که به راه‌حل‌های محافظتی سبک نیاز دارند. یافته‌ها نشان می‌دهد که

رضوی نژاد: روش شناسی، استاد راهنما، بررسی، ویرایش، بررسی
مفهومی، نظارت.

گردآوری داده ها، اعتبارسنجی، تحقیق، شکل ها و جداول. مهدی
عشقی: روش شناسی، استاد راهنما، بازنگری، نظارت. روح الله

واژه نامه

1. mass attenuation coefficient (MAC)
2. Compton scattering
3. linear attenuation coefficient (LAC)
4. photoelectric effect
5. half-value layer (HVL)
6. tenth-value layer (TVL)

مراجع

1. Karmakar A, Wang J, Prinzie J, De Smedt V, Leroux P. A review of semiconductor based ionising radiation sensors used in harsh radiation environments and their applications. *Radiation* 2021;1(3):194–217. <https://doi.org/10.3390/radiation1030018>
2. Kaewjaeng S, Kothan S, Chaiphaksa W, Chanthima N, Rajaramakrishna R, Kim HJ, et al. High transparency $\text{La}_2\text{O}_3\text{-CaO-B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ glass for diagnosis x-rays shielding material application. *Radiat Phys Chem.* 2019;160:41–7. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2019.03.018>
3. Poltabtim W, Wimolmala E, Markpin T, Sombatsompop N, Rosarpitak V, Saenboonruang K. X-ray shielding, mechanical, physical, and water absorption properties of Wood/PVC composites containing bismuth oxide. *Polymers* 2021;13(13):2212. <https://doi.org/10.3390/polym13132212>
4. Timakova RT, Iliukhin RV, Iliukhina IV. Modern trends in the development of nuclear power: from environmental friendliness to safe utilitarianism. *IOP Conf Ser Earth Environ Sci.* 2022;979(1):012172. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/979/1/012172>
5. Bustreo C, Giuliani U, Maggio D, Zollino G. How fusion power can contribute to a fully decarbonized European power mix after 2050. *Fusion Eng Des.* 2019;146:2189–93. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2019.03.150>
6. Aldawood S, Asemi NN, Kassim H, Aziz AA, Saeed WS, Al-Odayni AB. Gamma radiation shielding by titanium alloy reinforced by polymeric composite materials. *J Radiat Res Appl Sci.* 2023;17(1):100793. <https://doi.org/10.1016/j.jrras.2023.100793>
7. Rammah YS, Askin A, Abouhaswa AS, El-Agawany FI, Sayyed MI. Synthesis, physical, structural and shielding properties of newly developed $\text{B}_2\text{O}_3\text{-ZnO-PbO-Fe}_2\text{O}_3$ glasses using Geant4 code and WinXCOM program. *Appl Phys A* 2019;125(8). <https://doi.org/10.1007/s00339-019-2831-2>
8. Chikkegowda A, Raj LA, Mohan SB, Krishnaveni S. Study on polymer composites with glass for gamma ray shielding. *Radiat Prot Dosim.* 2024;200(11–12):1233–6. <https://doi.org/10.1093/rpd/nae111>
9. Alipoor MR, Eshghi M. Nickel/Multiwalled carbon nanotube composites as Gamma-Ray shielding. *Nano* 2024;19(06). <https://doi.org/10.1142/s1793292024500279>
10. Özdoğan H, Üncü YA, Akman F, Polat H, Kaçal MR. Detailed analysis of Gamma-Shielding characteristics of ternary composites using experimental, theoretical and Monte Carlo simulation methods. *Polymers* 2024;16(13):1778. <https://doi.org/10.3390/polym16131778>
11. Dong C, Mao X, Liang Q, Wang M, Zhang M, Chen J, et al. Poly (methyl methacrylate)/hyperbranched polysiloxane hybrid prepared by gamma-radiation polymerization: Thermal stability, optical transparence, and UV shielding. *J Appl Polym Sci.* 2023;141(7):e54942. <https://doi.org/10.1002/app.54942>
12. More CV, Alsayed Z, Badawi MS, Thabet AA, Pawar PP. Polymeric composite materials for radiation shielding: a review. *Environ Chem Lett.* 2021;19(3):2057–2090. <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01189-9>
13. Abualroos NJ, Idris MI, Ibrahim H, Zainon R. Physical, mechanical, and microstructural characterization of tungsten carbide-based polymeric composites for radiation shielding application. *Sci Rep.* 2024;14:1375. <https://doi.org/10.1038/s41598023-49842-3>
14. Gilys L, Griškonis E, Griškevičius P, Adlienė D. Lead free multilayered polymer composites for radiation shielding. *Polymers* 2022;14(9):1696. <https://doi.org/10.3390/polym14091696>
15. Abdolazadeh T, Morshedian J, Ahmadi S. Preparation and characterization of nano $\text{WO}_3/\text{Bi}_2\text{O}_3/\text{GO}$ and BaSO_4/GO dispersed HDPE composites for X-ray shielding application. *Polyolefins J.* 2022;9(2):73–83. <https://doi.org/10.22063/poj.2022.3009.1201>
16. Magnere SM, Toledo EA, Yazdani-Pedram M, Fuentealba P, Contreras-Soto A, Bascuñan-Heredia A, et al. High performance fluoroelastomer composites filled with graphite and/or bismuth oxide for applications in gamma-ray shielding. *Polym Compos.* 2024;45(8):6901–6913. <https://doi.org/10.1002/pc.28237>

17. El-Khatib AM, Doma AS, Abbass MM, Hassan MF, Abbas MI, El-Latif MMA, et al. Enhancing gamma radiation shielding properties of iron metal and natural rubber composites. *J Appl Polym Sci.* 2024;141(30): e55690. <https://doi.org/10.1002/app.55690>
18. Alanazi S, Hanfi M, Marashdeh MW, Aljaafreh MJ, Mahmoud KA. Evaluating the effects of metallic waste on the structural and Gamma-Ray shielding properties of epoxy composites. *Polymers* 2024;16(10):1415. <https://doi.org/10.3390/polym16101415>
19. Álvarez-Cortez G, Molina F, Urbano BF, Dahrouch M, Santana MH, Manchado M a. L, et al. Design and study of novel composites based on EPDM rubber containing bismuth (III) oxide and graphene nanoplatelets for gamma radiation shielding. *Polymers* 2024;16(5):633. <https://doi.org/10.3390/polym16050633>
20. Dejangah M, Ghojavand M, Poursalehi R, gholipour Peyvandi R. Study gamma radiation protection properties of silicon rubber-bismuth oxide nanocomposites: Synthesis, characterization and simulation. *J Radiat Saf Meas.* 2016;5(4):37-46. <https://doi.org/10.22052/4.4.37>
21. Hashemi SA, Tajik M, Asadi Amirabadi E. Design and fabrication of flexible polymer radiation shielding composite for mixed gamma-neutron fields. *J Radiat Saf Meas.* 2019;8(2):25-34. <https://doi.org/10.22052/7.2.25>
22. Arjmand S, Tavoosi M. Development of Al-Ti-N composite coatings on commercially pure Ti surface by tungsten inert gas process. *J Adv Mater Eng.* 2022;39(3):73-98. <https://doi.org/10.47176/jame.39.3.21681>
23. Antor RI, Bithi AM, Nahin AM. Variation in mechanical properties of polymer composites with reinforcements from different animal origins—a comprehensive review. *Int J Polym Sci.* 2025;2025: 4184239. <https://doi.org/10.1155/ijps/4184239>
24. Uyor UO, Popoola PA, Popoola OM. Enhanced mechanical and dynamic mechanical properties of polymer nanocomposites containing carbon nanotubes decorated with barium titanate. *Polym Polym Compos.* 2022;30. <https://doi.org/10.1177/09673911221100160>
25. Kuan HTN, Tan MY, Shen Y, Yahya MY. Mechanical properties of particulate organic natural filler-reinforced polymer composite: A review. *Compos Adv Mater.* 2021;30. <https://doi.org/10.1177/26349833211007502>
26. Yin X, Feng W, Cheng S, Huang Q, Zou X, Wang Z, et al. Chemically bonding inorganic fillers with polymer to achieve ultra-stable solid-state sodium batteries. *J Colloid Interface Sci.* 2023;648:855-864. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2023.06.064>
27. Phiri R, Mavinkere Rangappa S, Siengchin S, Oladijo OP, Ozbakkaloglu T. Advances in lightweight composite structures and manufacturing technologies: A comprehensive review. *Heliyon* 2024;10(21): e39661. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39661>
28. Ahmed EM, Elzelaky AA, El-Ghamaz NA, Youssif MI. Electrical conductivity and significant radiation shielding properties of B₂O₃.Pb₃O₄.ZnO.Y₂O₃ glasses. *Radiat Phys Chem.* 2023;216:111457. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2023.111457>
29. Abulyazied DE, Issa SAM, Saudi HA, Abomostafa HM, Zakaly HMM. Dysprosium-Enriched Polymer Nanocomposites: Assessing radiation shielding and optical properties. *Opt Mater.* 2024;153:115604. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2024.115604>
30. Reda AM, Ahmed RM, Alsawah MA, El-Sabbagh SH, Abd AE, Kansouh WA. Radiation shielding effectiveness, structural, and mechanical properties of HDPE/B4C composites reinforced with Fe₂O₃-Al₂O₃-Al-Fe fillers. *Phys Scr.* 2024;99(3):035308. <https://doi.org/10.1088/1402-4896/ad29dd>
31. Alipoor M, Eshghi M. Heavy element-enhanced polymer composites for gamma and neutron radiation shielding: A simulation study. *J Metall Mater Eng.* 2025;36(3):65-84. <https://doi.org/10.22067/jmme.2025.89902.1161>
32. Sallam OI, Rammah YS, Nabil IM, El-Seidy AMA. Enhanced optical and structural traits of irradiated lead borate glasses via Ce³⁺ and Dy³⁺ ions with studying Radiation shielding performance. *Sci Rep.* 2024;14(1): 24478. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-73892-w>
33. Putra OA, Faniandari I S, Syamputra DNI, Fahmi M, Yutomo EB. Effect of ZrO₂ on radiation shielding properties of xZrO₂-based glasses. *Int J Radiat Res.* 2024;22(2):349-355. <https://doi.org/10.52403/ijrr.20241110>
34. Rahmani Vareki M, Eshghi M, Alipoor M. Investigating the role of bismuth oxide and gadolinium oxide as an enhancer of the gamma shielding ability of polymer compounds based on unsaturated resin using the Monte Carlo simulation Geant4 tool. *J Adv Mater Eng.* 2024;43(4):85-108. <https://doi.org/10.47176/jame.43.4.1071>