



Ferdowsi University
of Mashhad

Journal of Metallurgical and Materials Engineering

<https://jmme.um.ac.ir>



Iron&Steel
Society of Iran

Heavy Element-Enhanced Polymer Composites for Gamma and Neutron Radiation Shielding: A Simulation Study

Research Article

Mohammadreza Alipoor¹ , Mahdi Eshghi² 

DOI: [10.22067/jmme.2025.89902.1161](https://doi.org/10.22067/jmme.2025.89902.1161)

1-Introduction

The implementation of effective safeguards has enabled safe radiation use in medical and industrial sectors. Enhancing radiation protection efficiency has been a significant research focus since ionizing radiation's discovery. The use of X-rays and gamma rays in medicine has expanded with new applications and technologies for diagnostics and therapy. High doses of X-rays or gamma rays can result in severe biological effects, including mutations and organ failure. Therefore, protection against ionizing radiation is essential. Common protective materials include high-density substances like lead and concrete, which possess notable drawbacks. Consequently, researchers have developed innovative radiation protection mechanisms for low-energy photons. Polymer composites with metal fillers have been researched as flexible, non-toxic, and effective alternatives for radiation protection. These composites consist of a polymer matrix reinforced with heavy elements, exhibiting potential efficacy. The unique properties of microparticles and nanoparticles enhance polymer molecular configurations and radiation interaction. Many studies have investigated reinforced polymers for radiation shielding. Obaid et al. analyzed high-density polyethylene composites with tungsten oxide, revealing significant effects of particle size and mass on gamma-ray attenuation. Abu Nahel et al. created a nanocomposite for X-ray shielding using Bi₂O₃ nanoparticles, enhancing absorption capacity. Higgins et al. found that incorporating hafnium oxide and tungsten oxide nanoparticles improved epoxy resin's mass attenuation coefficients. These polymer matrices enhance mechanical and thermal properties, reducing reliance on lead materials. Various polymer matrices were tested with heavy metal nanoparticles, demonstrating effective radiation shielding due to their high atomic numbers. Research on the simultaneous application of nanoparticles with differing atomic numbers and similar absorption edges is limited. This study aims to address this deficiency. The effectiveness of polymer composite shields with two types of metal nanoparticles was assessed for medical

photon energy applications. This area has not been thoroughly explored in earlier research. Utilizing a Mult metallic polymer composite with high atomic number fillers may enhance radiation attenuation across various applications compared to single-metallic composites. Accordingly, this study investigates the impact of a Mult metallic polymer composite containing gadolinium, tungsten, and tellurium at varying concentrations on photon attenuation efficiency. The influence of tungsten on the radiation shielding properties of these composites is quantitatively analyzed using the Geant4 simulation toolbox, and their attenuation characteristics are compared. Finally, the most effective composite will be proposed as a new multi-metallic polymer composite for radiation shielding applications in the field of radiotherapy.

2- Materials and methods

The Krafton resin is a composite enhanced for thermal stability, flame retardancy, and mechanical properties using boron, silicon, and nitrogen. Its molecular structure consists of a cross-linked polymer with phenolic compounds and additional functional groups from boron, silicon, and nitrogen. The resin forms a three-dimensional network comprised of methylene bridges, borate esters, siloxane bridges, and amine bonds. It contains carbon, hydrogen, oxygen, boron, silicon, and nitrogen. Tungsten nanoparticles are modeled as 50 nm diameter particles. Heavy element reinforced polymer composites are named in Table 1 from P-1 to P-6 based on the varying molar percentage of tellurium and tungsten.

Geant4 toolkit

Geant4 is a toolbox for simulating particle transport. It employs Monte Carlo techniques for complex interactions. This study utilized Geant4 to simulate photon transport from 15 to 10 MeV. Fast and thermal neutrons were incorporated for neutron transport calculations. A cubic geometry of 5 cm was employed to analyze gamma ray and neutron transport.

* Manuscript received September 20, 2024, Revised February 16, 2025, accepted July 11, 2025.

¹ Corresponding author. PhD candidate of physics, Department of Physics, Imam Hossein University, Tehran, Iran.

Email: mohamadrezaalipoor1997@gmail.com

² Assistant professor of physics, Department of Physics, Imam Hossein University, Tehran, Iran.

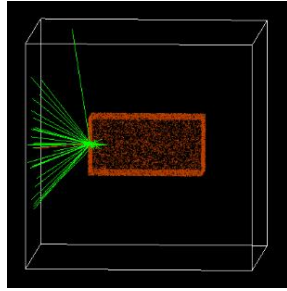


Fig. 1. Simulation schematic in Geant4

4- Results and Discussion

The properties of the polymer composites, including density and weight fraction of the constituent elements, are shown in Table 1. Polymer composites with gadolinium, tellurium, and tungsten additives at different additive percentages were investigated to evaluate their effect on neutron and gamma capabilities.

The mass attenuation coefficient for polymer composites is depicted in Fig. 2. Different energy ranges exhibit distinct interactions. Three photon energy regions are identified: below 150 keV, between 150 and 5000 keV, and above 5 MeV. In the first region, the mass attenuation coefficient decreases rapidly with increasing photon energy. The attenuation coefficient decreases proportionally to E^{-3} and Z^5 at these energies. At low energy, photons are absorbed by inner-layer electrons. The

photoelectric effect requires photon energy exceeding electron binding energy. As photon energy rises, absorption probability decreases, favoring transmission through the material. Clear peaks at 40 keV and 60 keV indicate absorption edges from tellurium and gadolinium, respectively. From 100 keV to 1 MeV, the mass attenuation coefficient's decrease rate significantly slows. This behavior reflects the inverse relationship of mass attenuation with energy in the Compton scattering range. In this range, photons lose energy to electrons and scatter. Higher photon energy reduces scattering probability, enhancing material transmission. At energies exceeding 1.022 MeV, photons can create electron-positron pairs. The attenuation coefficient increases slowly with energy at these levels. Pair production cross section correlates with atomic number, amplifying attenuation for higher atomic number elements. A higher mass attenuation coefficient is crucial for materials providing effective gamma photon shielding. Figure 2 illustrates the mass attenuation coefficient's dependency on both photon energy and polymer composite composition. Additionally, the coefficient values remain consistent due to similar chemical compositions and structural attributes of the evaluated composites. Moreover, Figure 2 demonstrates that mass attenuation coefficient values rise with increased tungsten content below 100 keV, while chemical composition has minimal effect above this energy threshold.

Table 1: Weight fraction of chemical compounds of polymer composites

Sample	Weight fraction of elements									Density
	H	C	O	Si	N	B	W	Te	Gd	
P-1	6/12	21/35	13/81	0/11	0/64	0/6	--	13/99	40/38	4/99
P-2	6/12	22/35	13/12	0/11	0/64	0/6	4/6	11/99	40/38	5/49
P-3	6/12	22/35	12/61	0/11	0/64	0/6	9/2	7/99	40/38	5/98
P-4	5/08	14/9	13/55	0/08	0/43	0/4	9/2	15/99	40/38	6/44
P-5	5/08	14/9	12/95	0/08	0/43	0/4	13/8	11/99	40/38	6/94
P-6	5/08	14/9	12/35	0/08	0/43	0/4	18/4	7/99	40/38	7/44

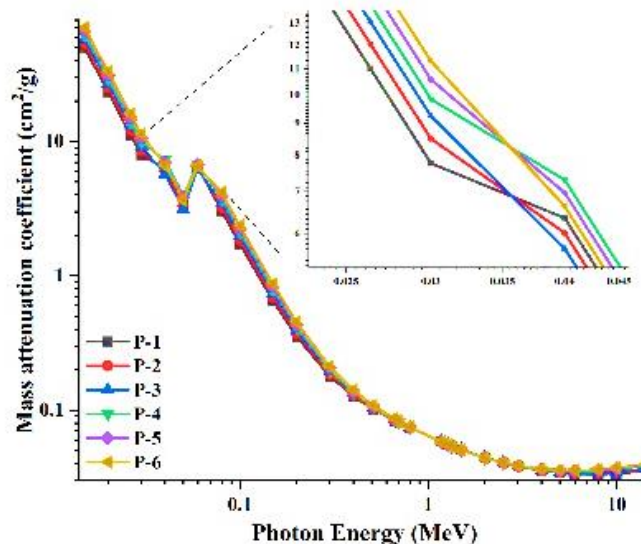


Fig. 2. The variation in the Mass attenuation coefficient of polymer composites in terms of photon energy.

The values of the tenth-value layer for these polymer composites are plotted in Figure 3. It is important to note that the tenth-value layer is the thickness of the medium required to reduce the photon intensity to one-tenth of its original intensity. It can be seen from Figure 3 that as energy increases, the tenth-value layer also increases for the polymer composites. Therefore, this pattern makes sense, since higher energy photons have a greater capacity to penetrate. Therefore, higher energy photons may pass through without significant attenuation before their intensity is significantly reduced. When the tenth-value layer values for the six samples at a particular energy are compared, the effect of density on radiation shielding can be easily seen, such that the polymer composite with a lower density exhibits higher tenth-value layer values, and vice versa. For example, in the case of samples P-6 and P-1, the values of the tenth-value layer at an energy of 0.511 MeV are 2.85 and 4.56 cm. Thus, at a given energy, the sample with the higher density (i.e., P-6) has a thinner tenth-value layer compared to the sample with the lower density (i.e., P-1). This is consistent with the density of the denser sample being more efficient at attenuating photons due to the increased number of atoms available for interaction.

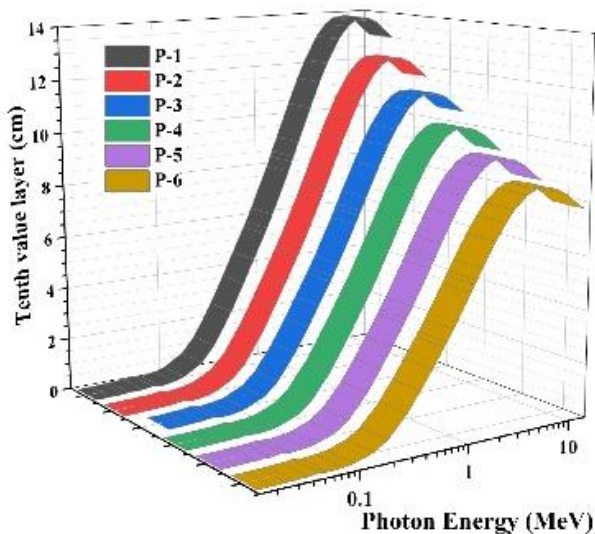


Fig. 3. The variation in the tenth layer of polymer composites in terms of photon energy.

In addition, to investigate the performance of polymer composites, their ability to resist fast neutrons was also evaluated. Figure 4 shows the fast neutron removal cross-section values for polymer composites. According to the results, the polymer composite sample coded as P-1 shows the highest neutron removal cross-section.

To evaluate the thermal neutron attenuation, selected samples were modeled in the Geant4 simulation tool with sample thicknesses ranging from 1 to 20 mm. The results show that the neutron shielding ability is ranked as P-3>P-2>P-6>P-1>P-4 in order. The neutrons passing through the

selected polymer composites are more suitable for thermal neutron energies, while they also have good performance in removing fast neutrons. To evaluate the effect of neutron modulation on thickness, the samples were bombarded with neutrons at thermal neutron energies. The results showed that increasing the shielding thickness reduces thermal neutrons, while increasing the neutron energy increases the residual particles.

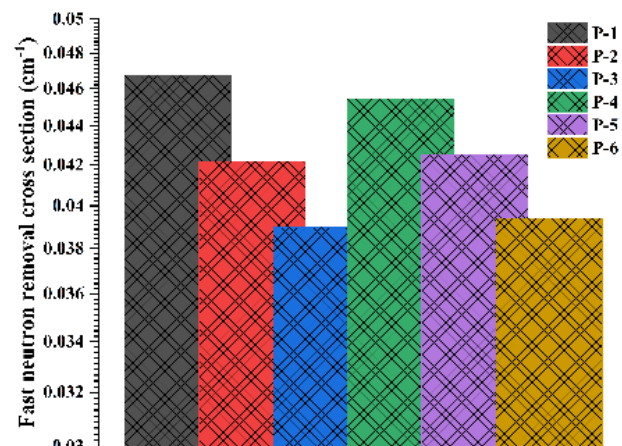


Fig. 4. Fast neutron removal cross section for polymer composites.

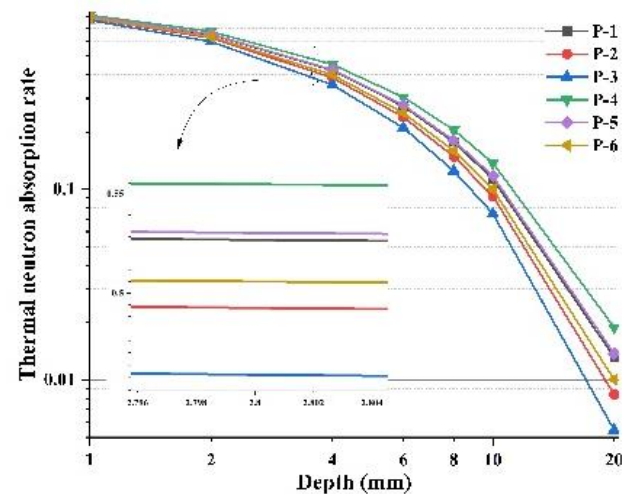


Fig. 5. The variation in thermal neutron absorption rates of polymer composites depending on photon energy.

5- Conclusion

This work reported the gamma and neutron shielding capabilities of polymer composites reinforced with tungsten metal nanoparticles. Theoretical evaluations of the gamma ray attenuation properties of the selected shields were carried out over a wide range of photon energies from 15 keV to 10 MeV with the help of the Geant4 simulation tool, Phy-x code. Accordingly, a remarkable agreement between the results obtained using different techniques was reported. The neutron attenuation

properties of the polymer composites were also investigated by providing the fast neutron removal cross section and the variations of the thermal neutron absorption rate. The results showed that the reinforced polymer composite exhibited a significant increase in the linear and mass attenuation coefficients of gamma rays at energies below 200 keV. It also showed a continuous increase in the half-value layer of the reinforced polymer composites with increasing gamma ray energy. For simultaneous gamma and neutron protection, the P-3 sample could be used as lead-free alternatives in medical

equipment (such as radiology shields or PET chambers). This study shows that tungsten-reinforced polymer composites have great potential for radiation shielding applications, but further research is needed in experimental areas and advanced compositions. Simultaneous optimization of the structure and chemical composition could make these materials an ideal option for industry and medicine.



کامپوزیت‌های پلیمری تقویت‌شده با عناصر سنگین برای محافظت از پرتو گاما و نوترون: یک مطالعه شبیه‌سازی*

مقاله پژوهشی

مهدی عشقی^(۲)

محمد رضا علی‌پور^(۱)

DOI: 10.22067/jmme.2025.89902.1161

چکیده محافظ‌های کامپوزیت پلیمری بدون سرب در پرتو پزشکی برای محافظت از بیماران در برابر قرار گرفتن در معرض تشعشعات غیرضروری استفاده می‌شوند. از شبیه‌سازی مونت کارلو برای تخمین خواص محافظ پرتو گاما کامپوزیت‌های پلیمری تقویت‌شده با تنگستن، در محدوده انرژی فوتون ۱۵ کیلو الکترون‌ولت تا ۱۰ مگا الکترون‌ولت استفاده شد. ضریب تضعیف خطی و جرمی، لایه نیم مقدار، لایه یک‌دهم مقدار، عدد اتمی موثر و ضریب انباشت را محاسبه شد. برای اعتبارسنجی شبیه‌سازی، نتایج با داده‌های نظری حاصل از برنامه Phy-x، مقایسه شد. مشاهده شد که داده‌های برنامه Phy-x و ابزار شبیه‌سازی Geant4 مطابقت خوبی داشتند. برای ارزیابی تعدیل نوترون‌ها، سطح مقطع حذف نوترون‌های سریع و حرارتی کامپوزیت‌های پلیمری مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به نتایج مشاهده شد که نمونه P-6، به دلیل افزودن تنگستن، افزایش قابل توجهی در تراکم نشان داد که منجر به بهبود حفاظت در برابر تشعشعات گاما شد. نتایج نشان داد که سطوح انرژی به‌طور قابل توجهی بر نفوذ پرتو گاما تأثیر می‌گذارد. نتایج نشان داد که همیشه افزایش تنگستن در نمونه‌ها منجر به افزایش مقادیر سطح مقطع حذف نوترون‌های سریع نخواهد شد. در نتیجه، با توجه به این نتایج نمونه P-3 قابلیت محافظت بهتری نسبت به نمونه‌های دیگر در برابر پرتو گاما و نوترون نشان داد. این نتایج نشان می‌دهد که ترکیب و ریزساختار کامپوزیت پلیمری را می‌توان برای بهبود خواص تضعیف تشعشعات برای کاربردهای فیزیک پزشکی بهینه کرد.

واژه‌های کلیدی پرتو گاما، نوترون، حفاظ، کامپوزیت‌های پلیمری، Phy-x، Geant4.

Heavy Element-Enhanced Polymer Composites for Gamma and Neutron Radiation Shielding: A Simulation Study

Mohammadreza Alipoor

Mahdi Eshghi

Abstract Lead-free polymer composite shields are used in radiotherapy to protect patients from unnecessary radiation exposure. Monte Carlo simulation was used to estimate the gamma ray shielding properties of tungsten-doped polymer composites in the photon energy range of 15 keV to 10 MeV. The linear and mass attenuation coefficients, half-value layer, tenth-value layer, effective atomic number, and stacking coefficient were calculated. To validate the simulation, the results were compared with theoretical data obtained from the Phy-x program. It was observed that the Phy-X program data and the Geant4 simulation tool were in good agreement. To evaluate the neutron modulation, the fast and thermal neutron removal cross sections of the polymer composites were investigated. According to the results, it was observed that sample P-6 showed a significant increase in density due to the addition of tungsten, which led to improved protection against gamma radiation. The results showed that energy levels significantly affect gamma ray penetration. The results showed that increasing tungsten in the samples does not always lead to an increase in the fast neutron removal cross section values. Consequently, according to these results, sample P-3 showed better protection against gamma and neutron radiation than the other samples. These results indicate that the composition and microstructure of the polymer composite can be optimized to improve radiation attenuation properties for medical physics applications.

Key words Gamma-ray, Neutron, Shielding, Polymer-Composites, Phy-x, Geant4.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۳/۶/۳۰ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۴/۴/۲۱ می‌باشد.

Email: mohammadrezaalipoor1997@gmail.com

(۱) نویسنده مسئول: دانشجوی دکترا، دانشگاه جامع امام حسین(ع)، تهران.

(۲) استادیار، گروه فیزیک، دانشگاه جامع امام حسین(ع)، تهران.

مقدمه

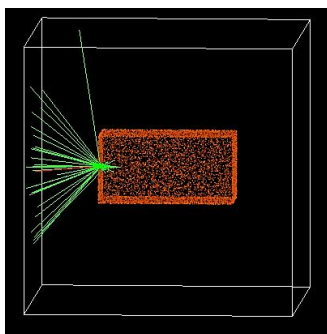
وجود پادمان‌های موثر در برابر تشعشعات یونیزان، استفاده ایمن از منابع تشعشع را در سراسر زمینه‌های پزشکی و صنعت تسهیل کرده است. در این راستا، افزایش کارایی محافظت از تشعشع از زمان شناسایی پرتوهای یونیزان، یک حوزه تحقیقاتی بزرگ باقی‌مانده است [1,2]. اخیراً، کاربرد پرتوهای ایکس و گاما در حوزه پزشکی با افزایش روزافزون کاربردها و فناوری‌های جدید در اقدامات تشخیصی و درمانی مشخص شده است. با توجه به ویژگی‌های بیولوژیکی بافت‌های هدف، قرار گرفتن در معرض دوزهای بالایی از پرتوهای ایکس یا گاما ممکن است منجر به پیامدهای بیولوژیکی بلندمدت یا کوتاه‌مدت از جمله جهش‌های ژنتیکی، سرطان و نارسایی اندام‌ها در انسان شود [3,4]. از این رو، حفاظت کافی در برابر فوتون‌های یونیزه‌کننده یک نگرانی حیاتی است. مراکزی که از تشعشعات یونیزان استفاده می‌کنند، موظف به اجرای محافظ پرتویی هستند که با استانداردهای قانونی و ایمنی مطابقت دارد. موادی که معمولاً برای حفاظت در برابر تشعشع به کار می‌روند از مواد سفت و سخت با چگالی بالا مانند سرب، آهن و اشکال مختلف بتن تشکیل شده‌اند [5-7]. با این وجود، این مواد دارای معایب متعددی از جمله سمیت شدید، وزن قابل توجه و پایداری مکانیکی و شیمیایی ناکافی هستند. در نتیجه، محققان معاصر انواع نوآورانه‌ای از مکانیسم‌های حفاظت در برابر تشعشع را به‌طور خاص برای فوتون‌های کم انرژی طراحی کرده‌اند. کامپوزیت‌های پلیمری که پرکننده‌های فلزی با عدد اتمی بالا را در هر دو شکل ریزذره (ذرات در اندازه میکرومتر) و نانوذره ترکیب می‌کنند، به دلیل انعطاف‌پذیری، سازگاری ساختاری، غیرسمی بودن، ماهیت سبک وزن و مقرون‌به‌صرفه بودن، به عنوان مواد محافظ پرتویی جایگزین به‌طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته‌اند [8-11]. کامپوزیت‌های پلیمری، که از یک ماتریس پلیمری در کنار ماده دیگری که به عنوان تقویت‌کننده یا پرکننده عمل می‌کند، تشکیل شده بودند، کارایی بالقوه‌ای را نشان داده‌اند [12,13]. ریزذرات و نانوذرات که با نسبت سطح به حجم برترشان متمایز می‌شوند، تأثیر قابل توجهی بر پیکربندی‌های مولکولی پلیمرها دارند. علاوه بر این، ترکیب پرکننده‌ها این پتانسیل را دارد که مساحت سطح را

گسترش دهد و نرخ برهمکنش بین تابش گاما و ماده را افزایش دهد، در نتیجه جذب فوتون‌ها را تسهیل می‌کند. [14-16]. تحقیقات علمی متعددی بر روی کاربرد مواد پلیمری تقویت‌شده به منظور محافظت در برابر تشعشع متمرکز شده‌اند. عبید و همکارانش [17] تجزیه و تحلیل دقیقی از کامپوزیت‌های پلی اتیلن با چگالی بالا تقویت‌شده با اندازه ذرات مختلف و کسرهای وزنی اکسید تنگستن (WO_3) انجام دادند و نشان دادند که ابعاد و کسر جرمی WO_3 به‌طور قابل توجهی بر خواص تضعیف پرتو گاما تأثیر می‌گذارد. ابوناهل و همکارانش [18] با استفاده از یک ماتریس پلیمری ادغام شده با نانوذرات Bi_2O_3 ، یک ماده نانوکامپوزیت در نظر گرفته شده برای محافظت در برابر اشعه ایکس مهندسی کردند. این آرایش ظرفیت پلیمر را برای جذب تابش اشعه ایکس در نتیجه پراکندگی موثر Bi_2O_3 نانوساختار در ماتریس پلی وینیل افزایش داد. هیگینز و همکارانش [19] مشخص کردند که ادغام اکسید هافنیوم (HfO_2) و نانوذرات WO_3 منجر به افزایش ضرایب تضعیف جرمی یک رزین اپوکسی شده است. این ماتریس‌های پلیمری، پیشرفت‌هایی را در خواص مکانیکی، حرارتی و شیمیایی ارائه می‌دهند و در نتیجه وابستگی به مواد مبتنی بر سرب را کاهش می‌دهند. علاوه بر این، انواع ماتریس‌های پلیمری برای ارزیابی حضور نانوذرات منفرد مشتق شده از فلزات مختلف در نزدیکی لبه‌های جذب عناصر ارزیابی شد. نتایج نشان داد که نانوذرات فلزات سنگین به دلیل اعداد اتمی بالا و لبه‌های جذب، ویژگی‌های حفاظت در برابر تشعشع رضایت‌بخشی دارند [20,21]. با این حال، تحقیقات در مورد تأثیر کاربرد همزمان دو نانوذرات با اعداد اتمی متفاوت و لبه‌های جذب نزدیک به هم کافی نیست. بنابراین، پژوهش حاضر به منظور پرکردن این خلأ طراحی شده است. به‌طور خاص، کارایی محافظ‌های کامپوزیت پلیمری شامل دو ریزذره فلزی متمایز برای طیف انرژی فوتون مربوط به کاربردهای پزشکی مورد بررسی قرار گرفت. این بعد خاص در تحقیقات قبلی به‌طور کامل مورد بررسی قرار نگرفته است. استفاده از یک کامپوزیت پلیمری چند فلزی دارای پرکننده با عدد اتمی بالا (ریزذراتی که لبه‌های K نزدیک به هم دارند، برای بهینه‌سازی میزان تضعیف در یک انرژی خاص را نشان می‌دهند)، در مقابل یک کامپوزیت پلیمری تک

شدند.

جعبه ابزار شبیه سازی

Geant4 یک جعبه ابزار شی گرا برای شبیه سازی ترابرد ذرات باردار و خنثی از طریق ماده است. این ابزار مبتنی بر تکنیک های مونت کارلو است که برای شبیه سازی برهمکنش های پیچیده در ماده مناسب است. در این مطالعه، از جعبه ابزار Geant4 برای شبیه سازی ترابرد فوتون ها در محدوده انرژی ۱۵ تا ۱۰ مگا الکترون ولت استفاده کردیم. برای شبیه سازی تعدیل نوترون ها نیز از نوترون های سریع و حرارتی برای محاسبه ترابرد نوترون ها استفاده شد. برای بررسی ترابرد پرتو گاما و نوترون، یک هندسه مکعبی با ابعاد ۵ سانتی متر که در شکل (۱) نشان داده شده است، تعریف شد.



شکل ۱ شماتیک شبیه سازی در Geant4

این هندسه برای ارزیابی تعداد اولیه (I_0) و نهایی (I) فوتون ها قبل و بعد از عبور از کامپوزیت های پلیمری که به دلیل سه برهم کنش اثر فوتوالکتریک، پراکندگی کامپتون و تولید زوج، فوتون ها را تضعیف می کند را می توان در پایان شبیه سازی محاسبه کرد. سپس از این نتایج برای تخمین ضریب تضعیف (μ) برای هر کامپوزیت های پلیمری، طبق قانون لامبرت-بیر استفاده می شود [24]:

$$\mu = \frac{1}{x} \ln \left(\frac{I_0}{I} \right) \quad (1)$$

شبیه سازی با هدف اندازه گیری ضریب تضعیف خطی کامپوزیت های پلیمری که از آن کمیت های دیگر محافظ قابل محاسبه است، انجام می شود [24]. هر نمونه مطابق با کسرهای وزنی عناصر در جدول (۱) تعریف شده است.

فلزی، ممکن است تضعیف تشعشعات پرنرژی را در طیف گسترده ای استفاده شود. در نتیجه، مطالعه حاضر با هدف تعیین اینکه آیا کامپوزیت پلیمری چند فلزی فرموله شده با گادولینیوم (با هدف قرار دادن فوتون های انرژی بالاتر)، تنگستن (به فوتون های انرژی متوسط) و تلوریوم (برای فوتون های با انرژی پایین تر) در غلظت های مختلف و لبه های جذب بر اثربخشی تضعیف فوتون ها تاثیر دارد یا خیر. پارامترهای مؤثر بر قابلیت های محافظ تشعشع کامپوزیت های پلیمری چند فلزی با ارزیابی تأثیر ادغام تنگستن در پلیمر با استفاده از جعبه ابزار شبیه سازی Geant4 به صورت کمی ارزیابی و ویژگی های تضعیف فوتون آن ها به طور سیستماتیک مقایسه می شوند. در نهایت، موثرترین فرمولاسیون به عنوان یک کامپوزیت پلیمری چند فلزی جدید برای کاربردهای محافظ پرتو در حوزه رادیولوژی تشخیصی پیشنهاد خواهد شد.

مواد و روش ها

رزین کرافتون با بور، سیلیکون و نیتروژن یک رزین فنولی پیشرفته است که با ترکیبات بور، سیلیکون و نیتروژن اصلاح شده است تا پایداری حرارتی، مقاوم در برابر شعله و خواص مکانیکی آن را افزایش دهد. ساختار مولکولی رزین کرافتون با بور، سیلیکون و نیتروژن یک پلیمر با پیوند متقابل مبتنی بر ترکیبات فنلی است که گروه های عاملی اضافی توسط بور، سیلیکون و نیتروژن معرفی شده اند. رزین کرافتون یک شبکه سه بعدی را تشکیل می دهد که از پل های متیلن ($-\text{CH}_2-$)، واحدهای فنلی پیوند دهنده، استرهای بورات ($-\text{O}-\text{B}-\text{O}-$)، افزایش پایداری حرارتی، پل های سیلوکسان ($-\text{Si}-\text{O}-\text{Si}-$)، بهبود استحکام مکانیکی و پیوندهای آمینی ($-\text{NH}-$) افزودن-افزودن مجدد) رزین کرافتون با بور، سیلیکون و نیتروژن از کربن، هیدروژن، اکسیژن، بور، سیلیکون و نیتروژن تشکیل شده است. [22,23]. نانو ذرات تنگستن در هر یک از کامپوزیت های پلیمری به عنوان ذرات با قطر ۵۰ نانومتر مدل سازی می شوند. کامپوزیت های پلیمری تقویت شده با عناصر سنگین که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته، با توجه به کاهش درصد مولی تلوریوم و افزایش درصد مولی تنگستن ($35\text{Kerafton}-40\text{Gd}_2\text{O}_3-x\text{WC}-1-x$) (TeO_2 0.75, 0.5, 0.25, 0.15, 0.05, 0, $x=0$ مول) در کامپوزیت های پلیمری به صورت P-1 الی P-6 کدگذاری

جدول ۱ کسر وزنی ترکیبات شیمیایی کامپوزیت‌های پلیمری

کد نمونه‌ها	کسر وزنی عناصر									چگالی (g/cm ³)
	H	C	O	Si	N	B	W	Te	Gd	
P-1	12/6	35/21	81/13	11/0	64/0	6/0	--	99/13	38/40	99/4
P-2	12/6	35/22	12/13	11/0	64/0	6/0	6/4	99/11	38/40	49/5
P-3	12/6	35/22	61/12	11/0	64/0	6/0	2/9	99/7	38/40	98/5
P-4	08/5	9/14	55/13	08/0	43/0	4/0	2/9	99/15	38/40	44/6
P-5	08/5	9/14	95/12	08/0	43/0	4/0	8/13	99/11	38/40	94/6
P-6	08/5	9/14	35/12	08/0	43/0	4/0	4/18	99/7	38/40	44/7

می‌شوند.

برای انجام یک ارزیابی کامل از ویژگی‌های محافظ محافظ کامپوزیت‌های پلیمری، محاسبه پارامترهای اساسی که تضعیف پرتو گاما را توصیف می‌کند، ضروری است. مرحله اولیه شامل تأیید مقادیر محاسبه شده برای اطمینان از صحت آنها است. این فرآیند اعتبار سنجی مستلزم یک تحلیل مقایسه‌ای با استفاده از جعبه ابزار Geant4 در کنار نتایج نظری حاصل از نرم افزار-Phy-x/PSD بود. نتایج ارائه شده در جدول (۲) نشان می‌دهد که تفاوت نسبی به‌طور کلی با افزایش انرژی فوتون کاهش می‌یابد. همانطور که در جدول (۲) نشان داده شده است، مقادیر محاسبه شده ضریب تضعیف جرمی از نتایج نظری به دست آمده از-Phy-x/PSD فراتر رفته است. این اختلاف مربوط به مدل‌های الکترومغناطیسی موجود در Geant4 است که فوتون‌ها را با دقت بالا ترابرد می‌کنند و نتایجی را با حساسیت استثنایی گزارش می‌کند. تفاوت نسبی بین مقادیر ضریب تضعیف جرمی محاسبه شده و نتایج نظری به ویژه در بالاترین مقدار خطا، تقریباً ۲ درصد است و در نتیجه استحکام تجزیه و تحلیل مقایسه‌ای انجام شده را نشان می‌دهد. وجود اکسید عناصر سنگین قابلیت تضعیف پرتو گاما و اشعه ایکس را در کامپوزیت‌های پلیمری افزایش می‌دهد. به‌عنوان مثال، در انرژی ۱۵ کیلو الکترون‌ولت، مقادیر ضریب تضعیف جرمی از ۴۹ (cm²/g) به ۷۰ (cm²/g) افزایش می‌یابد. تاثیر افزودن اکسید عناصر سنگین در انرژی‌های کمتر بیشتر است، اما افزایش انرژی فوتون‌ها، تاثیر افزودن اکسید عناصر سنگین را کاهش می‌دهد. مقادیر ضریب تضعیف جرمی در انرژی‌های بالاتر تقریباً یکسان هستند.

برای تعریف کامپوزیت‌های پلیمری، نانوتقویت‌کننده‌ها (ذراتی در ابعاد ۵۰ نانومتر) به‌طور همگن در ماتریس پلیمری که میزبان نانوذرات است، تعریف می‌شود. برای شبیه‌سازی، به‌طور تصادفی ۱۰^۶ رویداد تک انرژی اصلی به‌عنوان پرتوهای موازی پیش‌بینی شد. شبیه‌سازی مونت کارلو از این تعداد زیادی رویداد برای به حداقل رساندن خطای آماری استفاده می‌کند. سپس، ما باید نتایج خود را تأیید کنیم، برای این هدف، ضریب تضعیف جرمی را با استفاده از برنامه Phy-x/PSD محاسبه کردیم. Phy-x/PSD یک برنامه کاربر پسند است که می‌تواند ضریب تضعیف جرمی را برای هر کامپوزیت در هر انرژی مورد نیاز محاسبه کند. معمولاً محققانی که یک کار آزمایشی یا شبیه‌سازی انجام می‌دهند با استفاده از این نرم افزار سعی می‌کنند نتایج خود را تأیید کنند. به‌این ترتیب، اگر انحراف بین نتایج Phy-x/PSD و داده‌های شبیه‌سازی شده کم باشد، می‌توان نتایج شبیه‌سازی شده را تأیید کرد. سازگاری نتایج شبیه‌سازی با استفاده از درصد انحراف برای ضریب تضعیف جرمی بین Phy-x/PSD و Genat4 که به‌صورت زیر تعریف شده است، مورد بررسی قرار گرفت [25].

$$RD\% = \left| \left(1 - \left(\frac{\mu_{\text{Geant4}}}{\mu_{\text{Phy-x}}} \right) \right) \times 100 \right| \quad (2)$$

نتایج و بحث

مشخصات کامپوزیت‌های پلیمری شامل چگالی و کسر وزنی عناصر تشکیل‌دهنده این مواد در جدول (۱) نشان داده شده است. کامپوزیت‌های پلیمری با افزودنی‌های گادولونیم و تلوریم و تنگستن در درصد‌های مختلف مواد افزودنی برای ارزیابی تأثیر آنها بر قابلیت‌های تضعیف نوترون و گاما بررسی

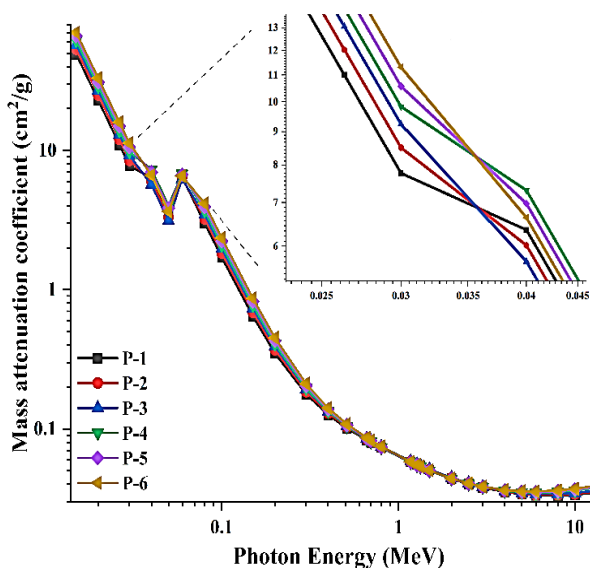
جدول ۲ مقادیر محاسبه شده ضریب تضعیف جرمی با انرژی فوتون برای کامپوزیت‌های پلیمری

	Energy (MeV)	P-1			P-2			P-3			P-4			P-5			P-6		
		Geant4	Phy-x	RD%	Geant4	Phy-x	RD%	Geant4	Phy-x	RD%	Geant4	Phy-x	RD%	Geant4	Phy-x	RD%	Geant4	Phy-x	RD%
0/511		0/015	0/02	0/03	0/04	0/05	0/08	0/1	0/15	0/2	0/3	0/4	0/511						
0/1010		49/1443	22/9244	7/7737	6/3580	3/5044	3/0011	1/7032	0/6441	0/3485	0/1779	0/1264	0/1010						
0/1011		49/0743	22/8987	7/8196	6/3971	3/5088	3/0010	1/7174	0/6463	0/3498	0/1774	0/1268	0/1011						
0/04		0/14	0/11	0/59	0/61	0/12	0/01	0/83	0/33	0/38	0/33	0/34	0/04						
0/1030		53/4621	25/0126	8/5096	6/0216	3/3636	3/2296	1/8345	0/6901	0/3701	0/1855	0/13	0/1030						
0/1045		53/4295	24/9849	8/5505	6/0628	3/4040	3/1901	1/8354	0/6859	0/3703	0/1856	0/1298	0/1045						
1/37		0/06	0/11	0/48	0/68	1/19	1/24	0/05	0/62	0/05	0/05	0/21	1/37						
0/1050		57/7799	27/1008	9/2454	5/6852	3/1283	3/4582	1/9659	0/7361	0/3918	0/1931	0/1337	0/1050						
0/1066		57/7761	27/0664	9/2786	5/7261	3/1218	3/4651	1/9655	0/7319	0/3920	0/1931	0/1334	0/1066						
1/45		0/01	0/13	0/36	0/72	0/21	0/2	0/02	0/58	0/04	0/02	0/21	1/45						
0/1046		61/7848	28/9351	9/8397	7/3155	4/0277	3/7046	2/0962	0/7761	0/4083	0/1969	0/1344	0/1046						
0/1062		61/7547	28/9074	9/8882	7/3601	4/0118	3/7112	2/0961	0/7717	0/4083	0/1969	0/1341	0/1062						
1/52		0/05	0/10	0/49	0/61	0/40	0/18	0/01	0/57	0/01	0/02	0/20	1/52						
0/1066		66/1027	31/0233	10/5755	6/9791	3/8396	3/9331	2/2275	0/8221	0/4300	0/2045	0/1380	0/1066						
0/1083		66/1313	30/9889	10/6163	7/0235	3/9326	3/9392	2/2272	0/8177	0/4300	0/2044	0/1377	0/1083						
1/58		0/04	0/11	0/38	0/63	2/36	0/15	0/01	0/55	0/01	0/03	0/21	1/58						
0/1086		70/4206	33/1116	11/3114	6/6427	3/6515	4/1617	2/3589	0/8681	0/4516	0/2121	0/1417	0/1086						
0/1114		70/5000	33/0807	11/3489	6/6900	3/6496	4/1692	2/3602	0/8652	0/4531	0/2133	0/1425	0/1114						
2/56		0/11	0/09	0/33	0/71	0/05	0/18	0/06	0/33	0/32	0/55	0/59	2/56						

ادامه جدول ۲ مقادیر محاسبه شده ضریب تضعیف جرمی با انرژی فوتون برای کامپوزیت‌های پلیمری

10	8	6	5	4	3	2	1/5	0/8	0/662	Energy (MeV)		
										Geant4	Phy-x	RD%
0/0337	0/0333	0/0334	0/0340	0/0353	0/0380	0/0443	0/0502	0/0734	0/0833	P-1		
0/0335	0/0330	0/0332	0/0338	0/0351	0/0377	0/0446	0/05	0/0739	0/0835	P-2		
0/53	0/70	0/68	0/62	0/63	0/80	0/70	0/32	0/68	0/21	P-3		
0/0342	0/0337	0/0338	0/0343	0/0355	0/0382	0/0444	0/0509	0/0741	0/0863	P-4		
0/0346	0/0342	0/0337	0/0338	0/0350	0/0377	0/0438	0/0507	0/0735	0/0875	P-5		
1/15	1/49	0/24	1/46	1/47	1/47	1/35	0/54	0/83	1/36	P-6		
0/0348	0/0342	0/0342	0/0347	0/0358	0/0384	0/0446	0/0511	0/0748	0/0854	P-7		
0/0347	0/0348	0/0342	0/0342	0/0357	0/0386	0/0446	0/0508	0/0742	0/0853	P-8		
0/21	1/60	0/05	1/33	0/27	0/44	0/02	0/54	0/83	0/07	P-9		
0/0362	0/0353	0/0349	0/0351	0/0359	0/0381	0/0438	0/0501	0/0736	0/0844	P-10		
0/0362	0/0352	0/0349	0/0351	0/0360	0/0382	0.0437	0/0498	0/0730	0/0851	P-11		
0/02	0/12	0/01	0/17	0/26	0/21	0/26	0/59	0/84	0/81	P-12		
0/0367	0/0358	0/0352	0/0354	0/0362	0/0383	0/0440	0/0503	0/0743	0/0855	P-13		
0/0367	0/0357	0/0352	0/0354	0/0363	0/0384	0/0439	0/05	0/0737	0/0845	P-14		
0/08	0/18	0/02	0/14	0/26	0/21	0/25	0/59	0/84	1/13	P-15		
0/0372	0/0362	0/0356	0/0357	0/0365	0/0386	0/0442	0/0505	0/0750	0/0865	P-16		
0/0374	0/0364	0/0359	0/0361	0/0369	0/0391	0/0446	0/0508	0/0752	0/0861	P-17		
0/53	0/51	0/79	1/04	1/25	1/32	0/96	0/65	0/30	0/46	P-18		

ضریب تضعیف جرمی مقدار بالاتری را داشته باشد. شکل (۲) نشان می‌دهد که ضریب تضعیف جرمی هم تحت تاثیر انرژی فوتون و هم ترکیب شیمیایی کامپوزیت‌های پلیمری است. علاوه بر این، این شکل نشان می‌دهد که مقادیر ضریب تضعیف جرمی کاملاً در یک راستا قرار دارند که به ترکیب شیمیایی مشابه و ویژگی‌های ساختاری کامپوزیت‌های پلیمری ارزیابی شده نسبت داده می‌شود. علاوه بر این، از شکل (۲) مشخص شده است که مقادیر ضریب تضعیف جرمی با افزایش تقویت‌کننده تنگستن در ترکیب در محدوده انرژی کم‌تر از ۱۰۰ کیلو الکترون‌ولت افزایش می‌یابد، در حالی که مقادیر ضریب تضعیف جرمی تحت تاثیر ترکیب شیمیایی در محدوده انرژی بالاتر از ۱۰۰ کیلو الکترون‌ولت قرار نمی‌گیرد و از نظر انرژی، مقادیر محاسبه شده، آن نیز در همین محدوده است.

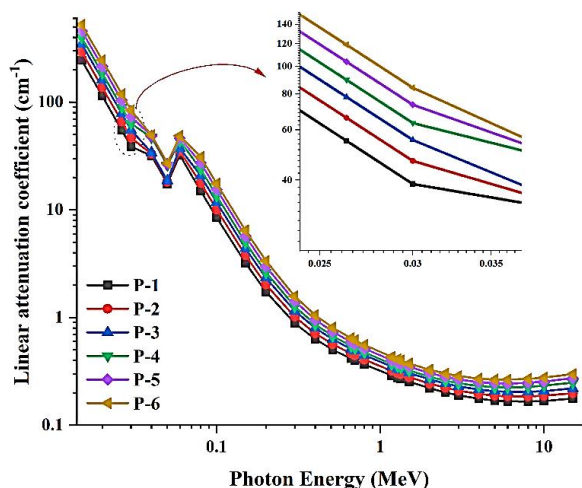


شکل ۲ تغییرات مقادیر ضریب تضعیف جرمی کامپوزیت‌های پلیمری بر حسب انرژی فوتون‌ها

کمیت اساسی دیگر توصیف‌کننده تضعیف پرتو گاما که لازم است محاسبه شود، ضریب تضعیف خطی (LAC) می‌باشد. ضریب تضعیف خطی کامپوزیت‌های پلیمری یکی از رایج‌ترین پارامترها در این زمینه است زیرا تحت تاثیر عوامل مختلفی مانند انرژی فوتون، ترکیب شیمیایی نمونه و چگالی آن قرار می‌گیرد. در کامپوزیت‌های پلیمری نمونه‌هایی با مقادیر ضریب تضعیف خطی بالا برای استفاده آزمایشی ترجیح داده می‌شوند، زیرا ضریب تضعیف خطی بالاتر نشان‌دهنده ویژگی‌های برتر در برابر

ضریب تضعیف جرمی در شکل (۲) برای تمامی نمونه‌های کامپوزیت‌های پلیمری رسم شده است. این شکل نشان می‌دهد که برهمکنش‌های مختلف در محدوده‌های انرژی متمایز غالب هستند. بدیهی است که طیف سه گانه انرژی فوتون وجود دارد: ناحیه انرژی اول (کم‌تر از ۱۵۰ کیلو الکترون‌ولت)، ناحیه انرژی دوم (انرژی‌های بین ۱۵۰ تا ۵۰۰۰ کیلو الکترون‌ولت) و ناحیه انرژی سوم (انرژی‌های بیش از ۵ مگا الکترون‌ولت). در ناحیه اول انرژی، نتایج ضریب تضعیف جرمی کامپوزیت‌های پلیمری انتخابی کاهش سریعی را با افزایش انرژی فوتون نشان می‌دهند. در این انرژی‌ها ضریب تضعیف متناسب با E^{-3} و Z^5 کاهش می‌یابد. در انرژی‌های پایین، فوتون‌ها به راحتی توسط الکترون‌های لایه‌های داخلی اتم جذب می‌شوند. انرژی فوتون باید بیشتر از انرژی پیوندی الکترون باشد تا اثر فوتوالکتریک رخ دهد. با افزایش انرژی فوتون، احتمال جذب کاهش می‌یابد، زیرا فوتون‌ها به جای جذب، بیشتر از ماده عبور می‌کنند. در ناحیه ۴۰ کیلو الکترون‌ولت قله‌هایی بسیار واضح است که نشان‌دهنده لبه جذب حاصل از برهمکنش فوتوالکتریک عنصر تلوریم است. همچنین، قله دیگری در ۶۰ کیلو الکترون‌ولت مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده لبه جذب حاصل از برهمکنش فوتوالکتریک عنصر گادولونیم است. همانطور که انرژی فوتون از ۱۰۰ کیلو الکترون‌ولت به ۱ مگا الکترون‌ولت افزایش می‌یابد، سرعت کاهش ضریب تضعیف جرمی به‌طور قابل توجهی کند می‌شود. این پدیده از این واقعیت ناشی می‌شود که ضریب تضعیف جرمی یک رابطه معکوس با انرژی در محدوده پراکندگی کامپتون نشان می‌دهد. در این محدوده انرژی، فوتون‌ها بخشی از انرژی خود را به الکترون‌ها منتقل می‌کنند و پراکنده می‌شوند. با افزایش انرژی فوتون، احتمال پراکندگی کاهش می‌یابد، زیرا فوتون‌ها تمایل بیشتری به عبور از ماده دارند. در انرژی‌های بالا، فوتون‌ها می‌توانند به یک جفت الکترون-پوزیترون تبدیل شوند. این فرآیند تنها زمانی رخ می‌دهد که انرژی فوتون بیشتر از $1/0.22$ مگا الکترون‌ولت (انرژی معادل جرم سکون الکترون و پوزیترون) باشد. در این انرژی‌ها ضریب تضعیف با افزایش انرژی به آرامی افزایش می‌یابد. سطح مقطع تولید زوج با مربع عدد اتمی متناسب است و افزایش در ضریب تضعیف برای عناصر با عدد اتمی بالاتر مشهودتر است. برای موادی که قابلیت‌های حفاظتی برتر در برابر فوتون‌های گاما را نشان می‌دهند، ضروری است که

عناصر سنگین عدد اتمی بالایی دارند، تاثیر موثری بر ضریب تضعیف خطی در سطوح کم انرژی بیشتر مشهود است زیرا سطح مقطع برهمکنش فوتوالکتریک متناسب با Z^5 است. اما، در انرژی بین ۰/۱ تا ۱ مگا الکترون‌ولت، نسبت ضریب تضعیف خطی کاهش می‌یابد، این به دلیل غلبه پراکندگی کامپتون است که وابستگی یک به یک با عدد اتمی مواد محافظ دارد [26].

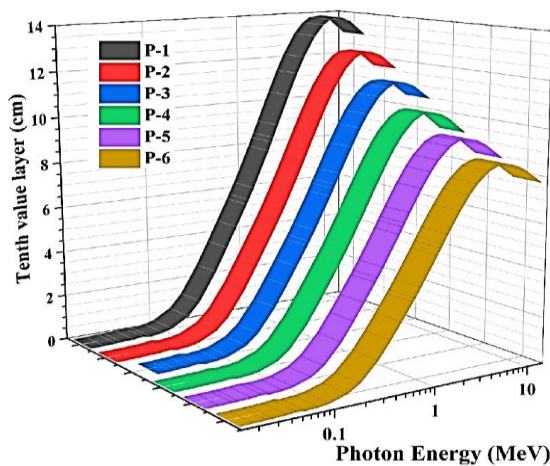


شکل ۳ تغییرات ضریب تضعیف خطی کامپوزیت‌های پلیمری برحسب انرژی فوتون‌ها

مقادیر لایه نیم مقدار برای کامپوزیت‌های پلیمری محاسبه شد که نتایج در شکل (۴) نشان داده شده است. این مقادیر لایه نیم مقدار میزان ضخامت محافظ و عملکرد تضعیف نمونه‌ها را نشان می‌دهد. یک ماده باید ضخامت لایه نیم مقدار پایینی را داشته باشد تا به طور موثر به عنوان یک محافظ پیشنهاد شود. در شکل (۴)، سطوح مختلف انرژی برای بررسی تاثیر افزودن تنگستن بر ضخامت لایه نیم مقدار مورد بررسی قرار گرفته است. شکل (۴) نشان می‌دهد که همبستگی بین افزایش درصد تنگستن و ضخامت لایه نیم مقدار نسبت معکوس دارد. ضخامت لایه نیم مقدار با افزودن تدریجی تنگستن به کامپوزیت پلیمری کاهش می‌یابد. در نتیجه، ممکن است توصیه شود که از یک ماده ضخیم‌تر برای جلوگیری از تشعشعات پرن انرژی استفاده شود. مشخص شد که وقتی انرژی از ۰/۱ به ۱ مگا الکترون‌ولت افزایش می‌یابد، مقادیر لایه نیم مقدار مربوط به کامپوزیت‌های پلیمری نیز افزایش می‌یابد. این افزایش در ضخامت لایه نیم مقدار به همبستگی معکوس بین مقادیر لایه نیم مقدار و ضریب تضعیف خطی نسبت داده می‌شود. به عنوان مثال، با در نظر گرفتن

تشعشع است. ضریب تضعیف خطی برای کامپوزیت‌های پلیمری را می‌توان از طریق استفاده از اکسیدهای فلزات سنگین (به عنوان مثال TeO_2 و Gd_2O_3 , WC) در این مطالعه) افزایش داد. شکل (۳)، ضریب تضعیف خطی را برای کامپوزیت‌های پلیمری انتخاب‌شده در سطوح انرژی مشخص نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که ضریب تضعیف خطی به طور قابل توجهی برای همه کامپوزیت‌های پلیمری تغییر می‌کند. در انرژی‌های پایین‌تر، نمونه P-6 در مقایسه با نمونه‌ها P-1, P-2, P-3, P-4 و P-5 دارای مقادیر ضریب تضعیف خطی بالاتری است. با افزایش انرژی، ضریب تضعیف خطی برای همه نمونه‌های انتخاب شده به طور کلی کاهش می‌یابد. این رفتار را می‌توان به برهم‌کنش بین فوتون‌های گاما و اتم‌های این نمونه‌ها نسبت داد. در محدوده انرژی پایین ۰/۱ تا ۰/۷ مگا الکترون‌ولت، برای همه نمونه‌ها کاهش نسبتاً شدیدی را در ضریب تضعیف خطی نشان می‌دهند که حاکی از کاهش بارزتر در عملکرد محافظ در سطوح انرژی بالاتر است. در محدوده انرژی ۰/۷ تا ۱ مگا الکترون‌ولت، به نظر می‌رسد که کاهش مقادیر ضریب تضعیف خطی کند می‌شود، که نشان‌دهنده کاهش محافظ پیشرونده‌تر است. برای انرژی بیشتر از ۱ مگا الکترون‌ولت، سرعت کاهش ضریب تضعیف خطی بیشتر تثبیت می‌شود، که نشان می‌دهد عملکرد محافظ کامپوزیت‌های پلیمری در سطوح انرژی بالا سازگارتر می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود که ضریب تضعیف خطی تابعی از چگالی کامپوزیت‌های پلیمری است. نمونه P-6 دارای بالاترین ضریب تضعیف خطی است، در حالی که کمترین ضریب تضعیف خطی برای نمونه P-1 مشاهده شد، با تفاوت مشاهده شده نسبت به مقادیر مختلف اکسید عناصر سنگین در کامپوزیت‌های پلیمری نمونه P-6 که حاوی محتوای بیشتری از اکسید عناصر سنگین در مقایسه با نمونه P-1 است، دارای مقادیر ضریب تضعیف خطی بالاتری در تمام انرژی‌های انتخاب شده است. این نشان دهنده نقش عناصر سنگین در عملکرد محافظ کامپوزیت‌های پلیمری است، جایی که افزایش درصد عناصر سنگین منجر به بهبود قابلیت محافظت از تشعشع گاما می‌شود. نسبت ضریب تضعیف خطی بین نمونه‌ها با بیشترین و کمترین محتوای عناصر سنگین محاسبه می‌شود. این روند را می‌توان با توجه به برهم‌کنش فوتون و ماده درک کرد. در ناحیه کم انرژی، اثر فوتوالکتریک قابل توجه است. سطح مقطع این برهم‌کنش وابستگی زیادی به عدد اتمی ماده دارد. از آنجایی که

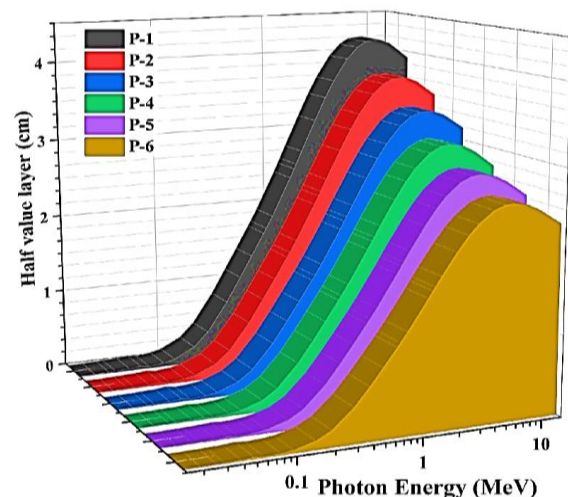
چگالی بر روی محافظ تشعشع را می توان به راحتی مشاهده کرد، به طوری که کامپوزیت پلیمری با چگالی پایین تر مقادیر لایه یک دهم مقدار بالاتری را نشان می دهد، و بالعکس. برای مثال، در مورد نمونه های P-6 و P-1، مقادیر لایه یک دهم مقدار در انرژی ۰/۵۱۱ مگا الکترون ولت ۲/۸۵ و ۴/۵۶ سانتی متر است. بنابراین، در یک انرژی خاص، نمونه با چگالی بالاتر (یعنی P-6) دارای لایه یک دهم مقدار نازک تری در مقایسه با نمونه با چگالی کمتر (یعنی P-1) است. این مطابق با چگالی نمونه متراکم تر است که به دلیل افزایش تعداد اتم های موجود برای برهمکنش، در تضعیف فوتون های کارآمدتر است.



شکل ۵ تغییرات مقادیر لایه یک دهم مقدار کامپوزیت های پلیمری برحسب انرژی فوتون ها

کمیت بعدی که در تضعیف پرتو گاما مورد بررسی قرار می گیرند، عدد اتمی مؤثر و چگالی الکترون مؤثر می باشد، همانطور که مشخص است که هر دو به یکدیگر مرتبط هستند. در شکل (۶) و (۷) نتایج به دست آمده برای نمونه ها ارائه شده است. موادی که با عدد اتمی مؤثر بالاتر مشخص می شوند، معمولاً با تعداد افزوده شده از اجزای اتمی مرتبط هستند، که در نتیجه احتمال برهمکنش بین فوتون ها و ترکیب عناصر را افزایش می دهد و در نتیجه منجر به افزایش تضعیف فوتون می شود. از سوی دیگر، برای کامپوزیت های پلیمری، تأثیر افزایش درصد تنگستن بر عملکرد محافظ را می توان با محاسبه عدد اتمی مؤثر تعیین کرد که در شکل (۵) نشان داده شده است. قابل توجه است که مقادیر عدد اتمی مؤثر برای همه نمونه ها در سطوح انرژی

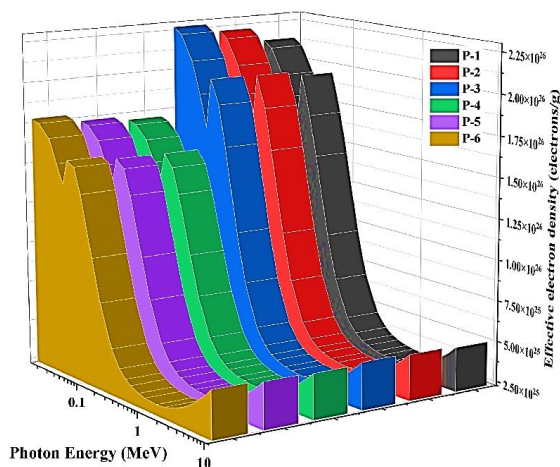
لایه نیم مقدار برای نمونه P-6 در چهار سطح انرژی ۰/۵۹، ۰/۶۶۲، ۱/۱۷۳ و ۱/۳۳۳ مگا الکترون ولت، لایه نیم مقدار به ترتیب ۰/۱۴، ۰/۰۷، ۱/۶ و ۱/۷۳ سانتی متر است. این روند نشان می دهد که فوتون های با انرژی بالا نیاز به نمونه ضخیم تری برای محافظت دارند. از نظر عددی، در انرژی ۰/۵۱۱ مگا الکترون ولت، نمونه P-6 به سطحی با ضخامت ۰/۸۵ سانتی متر نیاز دارد تا شدت فوتون ها را تا ۵۰ درصد کاهش دهد، در حالی که نمونه P-1 در همان انرژی به سطحی با ضخامت ۱/۳۷ سانتی متر نیاز دارد. این مقایسه تایید می کند که چگونه تغییر چگالی کامپوزیت های پلیمری (با تغییر مقدار عناصر سنگین) می تواند منجر به تفاوت هایی ضخامت محافظ شود.



شکل ۴ تغییرات مقادیر لایه نیم مقدار کامپوزیت های پلیمری برحسب انرژی فوتون ها

مقادیر لایه یک دهم مقدار برای این کامپوزیت های پلیمری در شکل (۵) ترسیم شده است. مهم است که توجه داشته باشید که لایه یک دهم مقدار ضخامت محیط لازم برای کاهش شدت فوتون ها به یک دهم شدت اولیه آن است. از شکل (۵) مشاهده می شود که با افزایش انرژی، لایه یک دهم مقدار برای کامپوزیت های پلیمری نیز افزایش می یابد. بنابراین، این الگو منطقی است، زیرا فوتون های انرژی بالاتر ظرفیت بیشتری برای نفوذ دارند. بنابراین، فوتون های با انرژی بالاتر ممکن است قبل از اینکه شدت آن ها به میزان قابل توجهی کاهش یابد، بدون تضعیف قابل توجهی عبور کنند. هنگامی که مقادیر لایه یک دهم مقدار برای شش نمونه در یک انرژی خاص مقایسه می شود، تأثیر

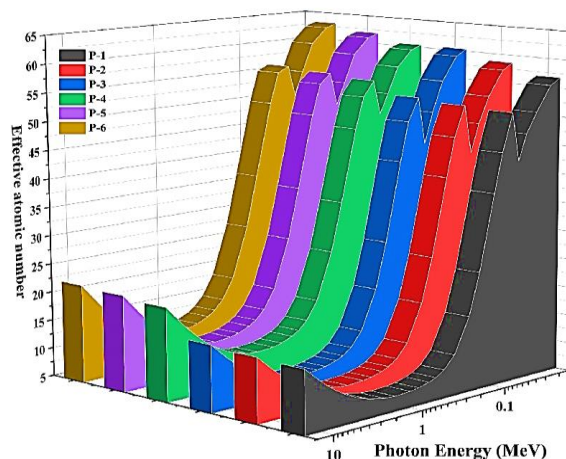
در رفتار متفاوت کامپوزیت پلیمری P-4 تا P-6 می‌توان مشاهده کرد.



شکل ۷ تغییرات مقادیر چگالی الکترونی موثر کامپوزیت‌های پلیمری بر حسب انرژی فوتون‌ها

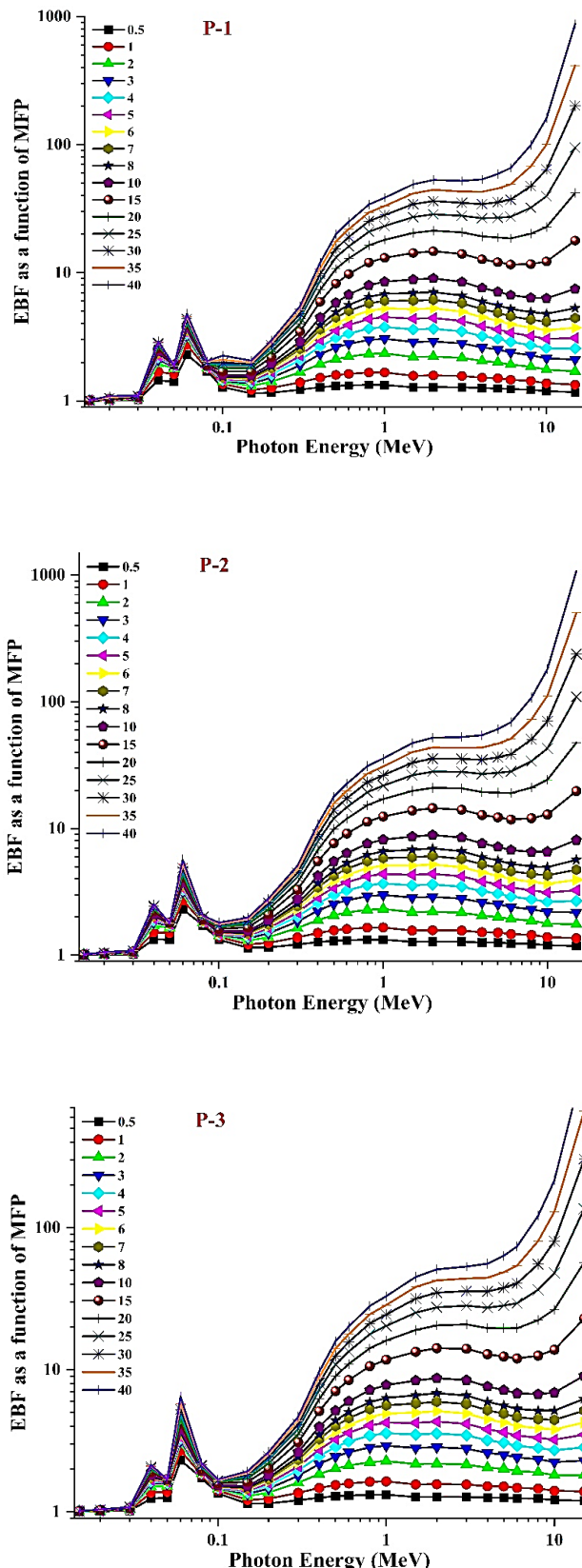
تاکید بر این امر ضروری است که کامپوزیت‌های پلیمری برای تضعیف تشعشع با هندسه پرتو باریک متمایز نمی‌شوند و محدوده انتشار پرتو گاما گسترده هستند و به قانون بیر-لامبرت پایبند نیست. در این چارچوب، یک پارامتر اصلاحی به نام ضریب انباشت وارد می‌شود. ضریب انباشت در طیف انرژی از ۰/۱۵ تا ۱۰ مگا الکترون‌ولت تا عمق نفوذ ۴۰ مسافت آزاد میانگین برای کامپوزیت‌های پلیمری به دقت محاسبه شده است. به‌طور معمول، مقادیر کاهش یافته ضریب انباشت برای یک ماده با احتمال کاهش نفوذ پرتو گاما از طریق آن مرتبط است. شکل (۷)، مقادیر محاسبه شده ضریب انباشت را در عمق نفوذ ۱ الی ۴۰ مسافت آزاد میانگین را به ترتیب برای همه کامپوزیت‌های پلیمری نشان می‌دهد. در بازه انرژی از ۰/۱۵ تا ۰/۱ مگا الکترون‌ولت، ضریب انباشت مقادیر حداقلی را با نوسانات خیلی کم نشان می‌دهند، علیرغم افزایش‌های ناگهانی در انرژی فوتون بین ۰/۱۵ تا ۰/۱ مگا الکترون‌ولت، که می‌توان آن را حاصل از لبه‌های جذب K و L نسبت داد. برای کامپوزیت‌های پلیمری که در شکل (۸) نشان داده شده‌است، واضح است که قله تنگستن ناپدید شده‌است و یک قله داریم که ناشی از همپوشانی قله جذب تنگستن و گادولونیم است. این قله با افزایش محتوای تنگستن در نمونه‌های افزایش می‌یابد. ضریب انباشت، در انرژی از ۰/۱

فوتون پایین‌تر، به‌ویژه در بازه زمانی ۰/۱۵ تا ۰/۲ مگا الکترون‌ولت، نسبتاً بیشتر است و متعاقباً کاهش سریعی تا آستانه انرژی ۱ مگا الکترون‌ولت نشان می‌دهد و به دنبال آن افزایش شدیدی مشاهده می‌شود که در ۱۰۰ کیلو الکترون‌ولت مشاهده می‌شود. هنگامی که انرژی فوتون‌ها افزایش می‌یابد، برهمکنش آن‌ها به لایه‌های اتمی عمیق‌تری در نمونه‌ها گسترش می‌یابد. این برهمکنش‌ها منجر به افزایش عدد اتمی موثر نمونه‌ها می‌شود و در نتیجه مقادیر عدد اتمی موثر بیشتر می‌شود.



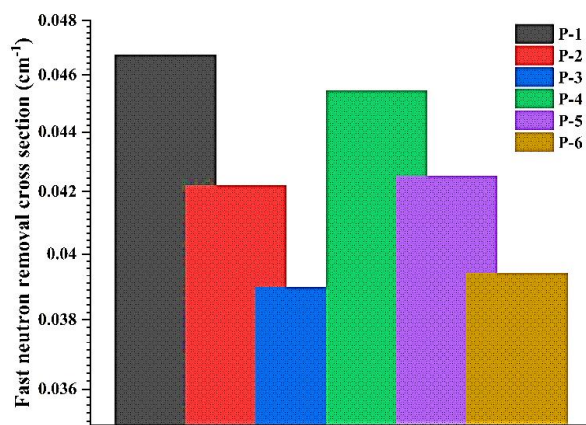
شکل ۸ تغییرات مقادیر عدد اتمی موثر کامپوزیت‌های پلیمری بر حسب انرژی فوتون‌ها

شکل (۷) تغییرات در چگالی الکترونی موثر، در سراسر طیف انرژی ۰/۱۵ تا ۱۰ مگا الکترون‌ولت برای همه نمونه‌ها را نشان می‌دهد. در این بررسی، الگوی مشاهده‌شده در مقادیر چگالی الکترونی موثر در هر سطح انرژی فوتون تعیین شده با پارامترهای عدد اتمی موثر در تمام نمونه‌ها ارتباط نزدیکی دارد و می‌توان آن را به روشی مشابه با تجزیه و تحلیل عدد اتمی موثر، با در نظر گرفتن تأثیر برهمکنش‌های مربوطه جذب فوتوالکتریک، کامپتون و تولید زوج در سطوح انرژی پایین‌تر، متوسط و بالاتر توضیح داد. با این وجود، تأکید بر این امر ضروری است که برخلاف رفتاری که عدد اتمی موثر نشان می‌دهد، اختلاف در مقادیر چگالی الکترونی موثر در بین همه نمونه‌ها رفتار قابل توجهی را با افزایش انرژی فوتون نشان می‌دهد. به‌طور کلی، یک مقدار چگالی الکترونی موثر بالا نشان دهنده افزایش در برهمکنش بین فوتون‌ها، الکترون‌ها و همچنین افزایش احتمال انتقال انرژی در ماده است. این مورد به وضوح



الی ۵ مگا الکترون‌ولت افزایش می‌یابد. این افزایش به غلبه برهمکنش کامپتون که به کاهش انرژی چندگانه فوتون با کمترین پراکندگی مربوط است. در نتیجه، با طولانی شدن عمر فوتون، احتمال فرار آن از طریق نمونه به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. به‌طور معمول، برهمکنش کامپتون در طیف انرژی ۲۵۰ کیلو الکترون‌ولت تا ۱ مگا الکترون‌ولت غالب است. علاوه بر این، با افزایش انرژی از ۲ تا ۱۰ مگا الکترون‌ولت، ضریب انباشت به دلیل تأثیر برهمکنش تولید زوج در این سطوح انرژی پرتو گاما افزایش یافته‌اند. در این انرژی‌ها فوتون دارای آستانه انرژی ۱/۰۲۲ مگا الکترون‌ولت برای ایجاد یک جفت الکترون-پوزیترون است. در انرژی‌های بالا و به تبع آن در اعماق نفوذ بیشتر، فوتون‌های ثانویه ناشی از نابودی پوزیترون‌ها و الکترون‌ها (که به تولید دو پرتو گاما با انرژی ۰/۵۱۱ مگا الکترون‌ولت منجر می‌شود) و در نتیجه منجر به تجمع قابل توجهی از ذرات می‌شوند. دو فوتون پرتو گاما حاصل می‌توانند از طریق برهمکنش‌های پراکندگی کامپتون یا اثر فوتوالکتریک از نمونه فرار کنند یا با نمونه برهمکنش کنند. هنگامی که تمام کمیت‌های محافظ گاما با هم ارزیابی می‌شوند، کامپوزیت پلیمری P-6 در مقایسه با P-1 عملکرد بهتری در کاهش فوتون‌ها نشان داد.

علاوه بر این، برای بررسی عملکرد کامپوزیت‌های پلیمری قابلیت آن‌ها برای کندسازی نوترون‌ها نیز مورد ارزیابی قرار گرفت. شکل (۹) مقادیر سطح مقطع حذف نوترون‌های سریع را برای کامپوزیت‌های پلیمری نشان می‌دهد. با توجه به نتایج نمونه کامپوزیت پلیمری که به‌عنوان P-1 کدگذاری شده است، بالاترین سطح مقطع حذف نوترون را نشان می‌دهد. در نمونه P-1، احتمالاً تراکم بالاتر اتم‌های هیدروژن در ماتریس پلیمری، دلیل عملکرد بهتر در کندسازی نوترون‌هاست. افزایش درصد تنگستن (به‌ویژه در نمونه‌های مانند P-6) اگرچه محافظت در برابر پرتو گاما را بهبود می‌بخشد، اما لزوماً منجر به افزایش کارایی در جذب نوترون‌های سریع نمی‌شود. این پدیده ممکن است ناشی از کاهش نسبت عناصر سبک (مانند هیدروژن یا کربن در ماتریس پلیمری) باشد که نقش کلیدی در کندسازی نوترون‌ها از طریق برخوردهای کشسان دارند.



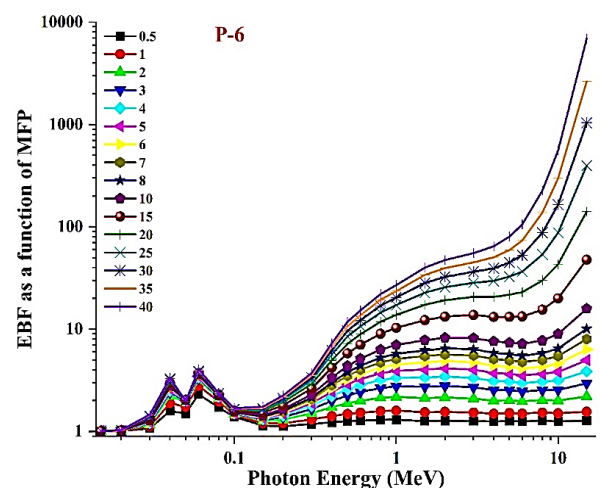
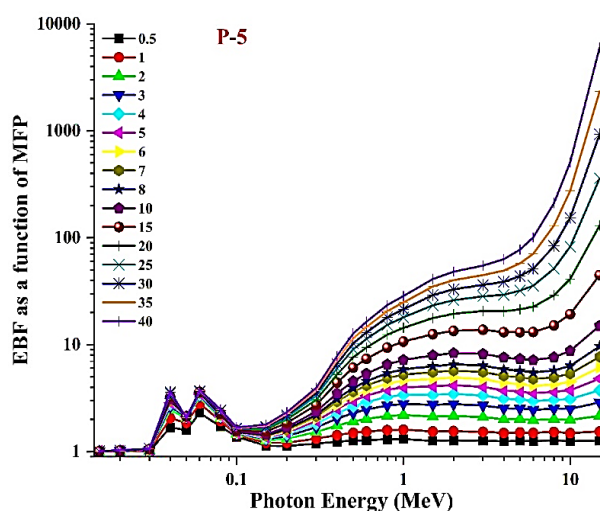
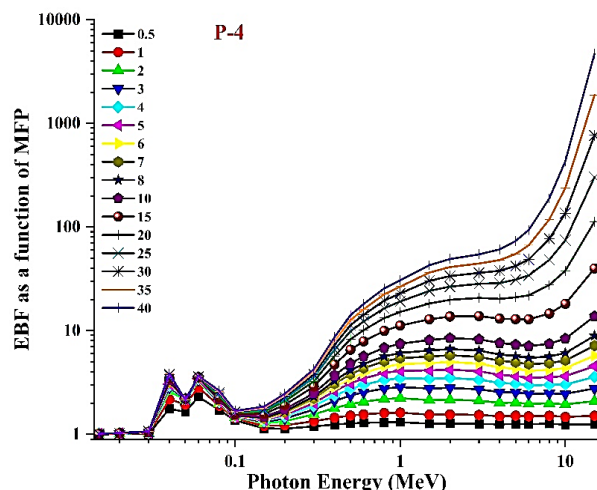
شکل ۹ سطح مقطع حذف نوترون‌های سریع برای کامپوزیت‌های پلیمری

جدول (۳) سطح مقطع پراکندگی کشسان، سطح مقطع پراکندگی غیرکشسان، سطح مقطع جذب نوترون و سطح مقطع کل کامپوزیت‌های پلیمری برای تضعیف نوترون حرارتی را نشان می‌دهد. برای نوترون‌های حرارتی، سطح مقطع جذب نوترون عدد خیلی پایینی را نشان می‌دهد که گویا این مورد است که جذب نوترون توسط کامپوزیت‌های پلیمری احتمال پایینی را دارد. در بین کامپوزیت‌های پلیمری P-3 دارای بالاترین سطح مقطع کل برای نوترون‌های حرارتی می‌باشد و بیشترین سهم را در سطح مقطع کل سطح مقطع پراکندگی غیرکشسان دارد که به دلیل برخوردای کشسان زیاد نوترون‌های حرارتی با اتم‌های سنگین است.

جدول ۳ مقادیر محاسبه شده سطح مقطع برهمکنش‌های نوترون‌های حرارتی برای کامپوزیت‌های پلیمری

کد نمونه‌ها	سطح مقطع برهمکنش‌های نوترون‌های حرارتی (mm²/g)			
	کشسان	غیرکشسان	جذب نوترون	سطح مقطع کل
P-1	۴۳/۱۴۱	۰/۱۸۶۹	۰/۰۲۵۳۶	۴۳/۳۵۴
P-2	۴۳/۱۸۶	۰/۱۹۰۲	۰/۰۲۵۳۶	۴۳/۴۰۱
P-3	۴۳/۲۳	۰/۱۹۳۴	۰/۰۲۵۳۶	۴۳/۴۴۹
P-4	۳۰/۵۷۴	۰/۱۹۵۲	۰/۰۱۶۹۱	۳۰/۷۸۶
P-5	۳۰/۶۱۹	۰/۱۹۸۴	۰/۰۱۶۹۱	۳۰/۸۳۴
P-6	۳۰/۶۶۳	۰/۲۰۱۷	۰/۰۱۶۹۱	۳۰/۸۸۲

برای ارزیابی میزان تضعیف نوترون‌های حرارتی، نمونه‌های منتخب در ابزار شبیه سازی Geant4 با ضخامت نمونه ۱ تا ۲۰



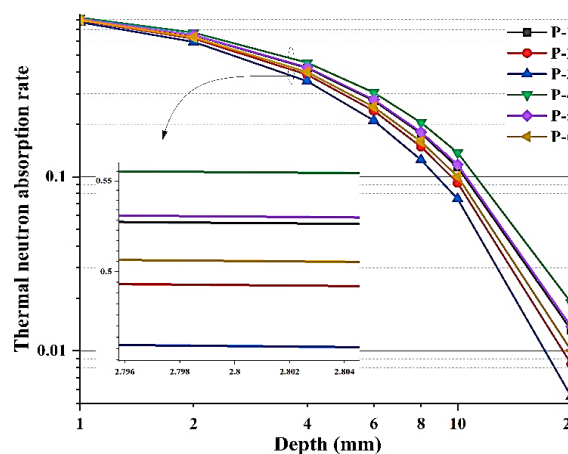
شکل ۸ تغییرات ضریب انباشت با مسافت آزاد میانگین برای کامپوزیت‌های پلیمری برحسب انرژی فوتون‌ها

نتیجه‌گیری

این کار قابلیت‌های محافظ پرتو گاما و نوترون کامپوزیت‌های پلیمری تقویت‌شده با نانوذرات فلزی تنگستن را گزارش کرد. ارزیابی‌های نظری برای ویژگی‌های تضعیف پرتو گاما محافظ‌های منتخب در طیف وسیعی از انرژی‌های فوتون از ۱۵ کیلو الکترون‌ولت تا ۱۰ مگا الکترون‌ولت با کمک ابزار شبیه‌سازی Geant4، کد Phy-x انجام شد. به ترتیب، سازگاری قابل توجهی بین نتایج به‌دست‌آمده با استفاده از تکنیک‌های مختلف گزارش شد. خواص تضعیف نوترون کامپوزیت‌های پلیمری نیز با ارائه سطح مقطع حذف نوترون سریع و تغییرات نرخ جذب نوترون حرارتی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که کامپوزیت پلیمری تقویت‌شده، افزایش قابل توجهی در ضرایب تضعیف خطی و جرمی پرتو گاما در انرژی‌های زیر ۲۰۰ کیلو الکترون‌ولت از خود نشان داد. همچنین افزایش مداوم لایه نیمه مقدار کامپوزیت‌های پلیمری تقویت‌شده را با افزایش انرژی پرتو گاما نشان داد. برای محافظت همزمان در برابر گاما و نوترون، نمونه‌ی P-3 می‌تواند به‌عنوان جایگزین‌های بدون سرب برای کاربردهای پزشکی مانند محافظ‌های رادیولوژی یا اتاق‌های PET استفاده شوند. این مطالعه نشان می‌دهد که کامپوزیت‌های پلیمری تقویت‌شده با تنگستن پتانسیل بالایی برای کاربردهای محافظ پرتو دارند، اما نیاز به تحقیقات بیشتر در حوزه‌های تجربی و ترکیبات پیشرفته وجود دارد. بهینه‌سازی همزمان ساختار و ترکیب شیمیایی می‌تواند این مواد را به گزینه‌ای ایده‌آل برای صنعت و پزشکی تبدیل کند.

تقدیر و تشکر

میلی متر مدل‌سازی شدند. نتایج نشان می‌دهد که به ترتیب قابلیت محافظت از نوترون به‌صورت $P-3 > P-2 > P-6 > P-1 > P-4$ رتبه‌بندی شده‌است. نوترون‌های عبوری از کامپوزیت‌های پلیمری منتخب بیشتر برای انرژی‌های نوترونی حرارتی مناسب می‌باشند، درحالی‌که عملکرد مناسبی در حذف نوترون‌های سریع نیز دارند. این رتبه‌بندی نشان می‌دهد که تنها چگالی بالا (مانند P-6) عامل تعیین‌کننده نیست، بلکه ترکیب شیمیایی و حضور عناصر جاذب نوترون (مانند بور یا هیدروژن در ماتریس پلیمری) نقش حیاتی دارد. برای ارزیابی اثر تعدیل نوترون بر ضخامت، نمونه‌ها با نوترون‌هایی در انرژی‌های نوترونی حرارتی بمباران شدند. نتایج نشان داد که افزایش ضخامت محافظ باعث کاهش نوترون‌های حرارتی می‌شود در حالی که افزایش انرژی نوترون باعث افزایش ذرات باقی‌مانده خواهد شد. کامپوزیت‌های مورد مطالعه (به‌ویژه P-2 و P-3) نه تنها در جذب نوترون‌های حرارتی مؤثر بودند، بلکه قابلیت تعدیل نوترون‌های سریع را نیز داشتند. این ویژگی برای کاربردهای عملی مانند راکتورهای هسته‌ای یا دستگاه‌های رادیوتراپی که با تابش مختلط (سریع + حرارتی) سروکار دارند، بسیار ارزشمند است.



شکل ۱۰ تغییرات نرخ جذب نوترون حرارتی کامپوزیت‌های پلیمری برحسب انرژی فوتون‌ها

مراجع

- [1] L. G. Yamamoto, "Risks and Management of Radiation Exposure," *Pediatric Emergency Care*, vol. 29, no. 9, pp. 1016–1026, 2013. <https://doi.org/10.1097/pec.0b013e3182a380b8>
- [2] H. Li, L. Yan, J. Zhou, Y. Wang, X. Liao, and B. Shi, "Flexible and wearable functional materials for ionizing radiation Protection: A perspective review," *Chemical Engineering Journal*, vol. 487, p. 150583, 2024.

<https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.150583>

- [3] S. Mohan and V. Chopra, "Biological effects of radiation," in *Radiation Dosimetry Phosphors*, S. Dhoble, V. Chopra, V. Nayar, G. Kitis, D. Poelman, and H. Swart, Eds. Cambridge, UK: Woodhead Publishing, 2022, pp. 485–508. <https://doi.org/10.1016/C2020-0-02145-6>
- [4] T. C. Alonso, A. P. Mourão, P. C. Santana, and Silva, "Assessment of breast absorbed doses during thoracic computed tomography scan to evaluate the effectiveness of bismuth shielding," *Applied Radiation and Isotopes*, vol. 117, pp. 55–57, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2016.03.018>
- [5] E. Şakar, Ö. F. Özpolat, B. Alım, M. I. Sayyed, and Murat Kurudirek, "Phy-X / PSD: Development of a user-friendly online software for calculation of parameters relevant to radiation shielding and dosimetry," *Radiation Physics and Chemistry*, vol. 166, pp. 108496–108496, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2019.108496>
- [6] A. M. El-Khatib, T. I. Shalaby, A. Antar, and M. Elsafi, "Improving Gamma Ray Shielding Behaviors of Polypropylene Using PbO Nanoparticles: An Experimental Study," *Materials*, vol. 15, no. 11, pp. 3908–3908, 2022. <https://doi.org/10.3390/ma15113908>
- [7] E. Burgio, P. Piscitelli, and L. Migliore, "Ionizing Radiation and Human Health: Reviewing Models of Exposure and Mechanisms of Cellular Damage. An Epigenetic Perspective," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 15, no. 9, pp. 1971–1971, 2018. <https://doi.org/10.3390/ijerph15091971>
- [8] S. Aldawood, N. N. Asemi, H. Kassim, A. A. Aziz, W. S. Saeed, and A. Al-Odayni, "Gamma radiation shielding by titanium alloy reinforced by polymeric composite materials," *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, vol. 17, no. 1, pp. 100793–100793, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jrras.2023.100793>
- [9] M. S. Mansy, M. M. Ghobashy, and M. I. Aly, "Enhancing gamma and neutron radiation shielding efficiency of LDPE/PVC polymers using cobalt, aluminum, and magnesium oxide fillers," *Radiation Physics and Chemistry*, vol. 222, pp. 111862–111862, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2024.111862>
- [10] H. O. Tekin, M. I. Sayyed, and S. A. M. Issa, "Gamma radiation shielding properties of the hematite-serpentine concrete blended with WO₃ and Bi₂O₃ micro and nano particles using MCNPX code," *Radiation Physics and Chemistry*, vol. 150, pp. 95–100, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2018.05.002>
- [11] H. Kassim, S. Aldawood, S. Prasad, N. N. Asemi, A. A. Aziz, and M. S. AlSalhi, "Advanced polymeric matrix utilizing nanostructured bismuth and tungsten oxides for gamma rays shielding," *Heliyon*, vol. 10, no. 17, p. e37289, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e37289>
- [12] Y. Afkham, A. Mesbahi, A. Alemi, F. Zolfagharpour, and N. Jabbari, "Design and fabrication of a Nano-based neutron shield for fast neutrons from medical linear accelerators in radiation therapy," *Radiation Oncology*, vol. 15, no. 1, pp. 4332, 2020. <https://doi.org/10.1186/s13014-020-01551-1>
- [13] T. Özdemir, A. Güngör, I.K. Akbay, H. Uzun, and Y. Babuc uoglu, "Nano lead oxide and epdm composite for development of polymer-based radiation shielding material: Gamma irradiation and attenuation tests," *Radiation Physics and Chemistry*, vol. 144, pp. 248–255, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2017.08.021>

- [14] P. Makvandi et al., "Functionalization of polymers and nanomaterials for water treatment, food packaging, textile and biomedical applications: a review," *Environmental Chemistry Letters*, vol. 19, no. 1, pp. 583–611, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01089-4>
- [15] M.R. Alipoor, M. Eshghi, "Simulation and extraction Protective properties of bismuth-based heterojunction Nanocomposites for shielding against gamma rays," *Nano World*, vol. 20, no. 14, pp. 34-26, 2024. (In Persian)
- [16] C. V. More, Z. Alsayed, M. S. Badawi, A. A. Thabet, and P. P. Pawar, "Polymeric composite materials for radiation shielding: a review," *Environmental Chemistry Letters*, vol. 19, no. 3, pp. 2057–2090, 2021. <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01189-9>
- [17] A. Obeid, H. E. Balaa, O. E. Samad, R. Awad, and M. S. Badawi, "Attenuation parameters of HDPE filled with different nano-size and bulk WO₃ for X-ray shielding applications," *The European Physical Journal Plus*, vol. 137, no. 11, 2022. <https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-022-03361-8>
- [18] B. M. Abunahel, I. S. Mustafa, and Z. Noor, "Characteristics of X-ray attenuation in nano-sized bismuth oxide/epoxy-polyvinyl alcohol (PVA) matrix composites," *Applied Physics A*, vol. 124, no. 12, 2018. <https://doi.org/10.1007/s00339-018-2254-5>
- [19] M. C. Molina, N. A. Radcliffe, M. Toro-González, and J. V. Rojas, "Gamma ray attenuation of hafnium dioxide- and tungsten trioxide-epoxy resin composites," *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, vol. 322, no. 2, pp. 707–716, 2019. <https://doi.org/10.1007/s10967-019-06714-3>
- [20] P. Mehnati, R. Malekzadeh, and M. Y. Sootch, "Use of bismuth shield for protection of superficial radiosensitive organs in patients undergoing computed tomography: a literature review and meta-analysis," *Radiological Physics and Technology*, vol. 12, no. 1, pp. 6–25, 2019. <https://doi.org/10.1007/s12194-019-00500-2>
- [21] E. Mansouri, Asghar Mesbahi, R. Malekzadeh, and A. Mansouri, "Shielding characteristics of nanocomposites for protection against X- and gamma rays in medical applications: effect of particle size, photon energy and nano-particle concentration," *Radiation and Environmental Biophysics*, vol. 59, no. 4, pp. 583–600, 2020. <https://doi.org/10.1007/s00411-020-00865-8>
- [22] A. P. Mouritz and A. G. Gibson, *Fire Properties of Polymer Composite Materials*, Dordrecht, Netherlands: Springer, 2006. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5356-6>
- [23] L. Pilato, Ed., *Phenolic Resins: A Century of Progress*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2010. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-04714-5>
- [24] M. Alipoor, M. Eshghi, "Gamma-ray Shielding Capacity of Ceramics Tb and Fe Doped with Y₂Zr₂O₇," *Advanced Ceramics Progress*, vol. 10, no. 1, pp. 1-10, 2004. (In Persian) <https://doi.org/10.30501/acp.2024.428521.1140>
- [25] S. Agostinelli et al., "Geant4—a simulation toolkit," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 506, no. 3, pp. 250–303, 2003. [https://doi.org/10.1016/s0168-9002\(03\)01368-8](https://doi.org/10.1016/s0168-9002(03)01368-8)

- [26] G. F. Knoll, *Radiation Detection and Measurement*, 4th ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2010.
<https://doi.org/10.1002/9781118052295>