

بررسی نقش اکسید بیسموت و اکسید گادولینیوم به عنوان یک تقویت کننده بر توانایی محافظ گاما ترکیبات پلیمری مبتنی بر رزین غیراشباع با استفاده از ابزار شبیه سازی مونت کارلویی جینت ۴

مجتبی رحمانی ورکی، مهدی عشقی* و محمدرضا علی پور

گروه فیزیک، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۵/۲۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۹/۴)

<https://doi.org/10.47176/jame.43.4.1071>

چکیده: حضور سرب به عنوان اولین محافظ پرتوئی با یک سری ویژگی های خوب مانند چگالی زیاد و داشتن مقداری انعطاف پذیری و یک سری ویژگی های نامناسب مانند سمی بودن، پایداری فیزیکی و شیمیایی پایین و وزن زیاد، مدت زیادی است دانشمندان را به فکر جایگزین برای آن انداخته است. در این پژوهش، ویژگی های محافظتی در برابر پرتو گاما ترکیبات پلیمری با اکسید (گادولینیوم-تلوریم-بیسموت) $(\text{Gd}_2\text{O}_3)_x(\text{TeO}_2)_{(40-x)}(\text{resin})_{20} - (\text{Bi}_2\text{O}_3)_{40}$ و $(\text{Gd}_2\text{O}_3)_x(\text{TeO}_2)_{(30-x)} - (\text{resin})_{30} - (\text{Bi}_2\text{O}_3)_{40}$ (در اینجا x برابر است با ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد وزنی) با استفاده از ابزار شبیه سازی مونت کارلویی جینت ۴ در محدوده ۰/۱۵ تا ۱۵ مگا الکترون ولت بررسی می شود. در این بررسی، کمیت های مربوط به تضعیف فوتون مانند ضریب تضعیف خطی، ضریب تضعیف جرمی، لایه یک دهم مقدار، لایه نیم مقدار، عدد اتمی مؤثر، چگالی الکترونی مؤثر، سطح مقطع اتمی کل، سطح مقطع الکترونی کل و مسیر آزاد میانگین و همچنین طیف ذرات ثانویه ایجاد شده به تفکیک نوع و انرژی آن ها برای سطوح مختلف انرژی گامای فرودی نشان داده می شود. برای اعتبارسنجی نتایج شبیه سازی، مقادیر ضریب تضعیف جرمی محاسبه شده از جینت ۴ با نتایج برنامه Phy-x مقایسه شده که نشان می دهد توافق خوبی با یکدیگر دارند. توافق بین داده ها، نشان می دهد که ابزار جینت ۴ یک روش خوب جهت بررسی ویژگی های حفاظ پرتوی گاما می باشد. نتایج به دست آمده نشان می دهد، توسعه رزین ها با افزودن اکسید فلزات واسطه مانند: گادولینیوم، تلوریم و بیسموت، در ترکیبات آن ها، سبب می شود خاصیت حفاظی آن در برابر پرتو گاما نیز افزایش یابد.

واژه های کلیدی: پرتو گاما، حفاظ، ترکیبات پلیمری، اکسید بیسموت، اکسید گادولینیوم، جینت ۴.

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: meshghi@ihu.ac.ir

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

M. Rahmani Vareki, M. Eshghi* and M.R. Alipoor

Imam Hossein Comprehensive University, Tehran, Iran

ABSTRACT

The presence of lead as the first radiation shielding with a series of good features such as high density and having some flexibility and a series of inappropriate features such as toxicity, low physical and chemical stability, and high weight, has long made scientists think about alternatives. In this research, the protective properties against gamma radiation of polymer compounds with oxide (gadolinium-bismuth tellurium) $(Gd_2O_3)_x (TeO_2)_{(30-x)}$ - (resin)30 - $(Bi_2O_3)_40$ (which here x is 10, 15, and 20% by weight percent) and $(Gd_2O_3)_x (TeO_2)_{(40-x)}$ (resin)20 - $(Bi_2O_3)_40$ (where x is 20, 25, and 30 by weight percent) was examined using the Monte Carlo simulation tool Geant4 in the range of 0.015 to 15 MeV. In this study, the quantities related to photon attenuation such as linear attenuation coefficient, mass attenuation coefficient, one-tenth-value layer, half-value layer, effective atomic number, effective electron density, the total atomic cross section, the total electron cross section, and the mean free path as well as the spectrum of secondary particles created according to their type and energy for different levels of incident gamma energy have been evaluated. The mass attenuation coefficient values calculated from Geant4 were compared to the Phy-x results to validate the simulation results. The results showed a good agreement with each other. The agreement between the data revealed that the Geant4 tool was a good method to examine the properties of gamma ray shielding. The obtained results declared that the development of resins with the addition of oxides of transition metals such as gadolinium, tellurium, and bismuth increases the protective against gamma rays.

Keywords: Gamma ray, Shielding, Polymeric compounds, Bismuth oxide, Gadolinium oxide, Geant4.

۱- مقدمه

مواد مرکب موادی هستند که از دو یا چند ماده با خصوصیات شیمیایی و فیزیکی متفاوت تشکیل شده‌اند. آن‌ها از ماتریس (سرامیک، پلیمری یا فلزی) و تقویت‌کننده (الیافی، ذره‌ای یا ورقه‌ای) تشکیل شده‌اند. یک کامپوزیت پلیمری از یک پلیمر به‌عنوان ماتریس و هر یک از تقویت‌کننده‌ها بر اساس نیاز تشکیل شده است. انواع پلیمرها مانند ترموپلاستیک، ترموست و الاستومرها به‌عنوان مواد زمینه‌ای با ترکیبات آلیاژی یا فلزی مختلف به‌عنوان پرکننده در هنگام ساخت کامپوزیت‌های پلیمری استفاده شده‌اند. کامپوزیت‌های پلیمری جایگاه خود را در زمینه‌های مختلفی مانند زیست‌پزشکی، صنعت خودرو، هوافضا و ساخت و ساز پیدا کرده‌اند (۴-۱). علاوه بر این، کامپوزیت‌های پلیمری کاربرد خود را در علم و فناوری هسته‌ای به‌ویژه در حفاظت در برابر تشعشع پیدا کرده‌اند (۵ و ۶). با توجه به این نکته که پرتوهای گاما در بسیاری از زمینه‌های گسترده

مانند نیروگاه‌های هسته‌ای، مصارف صنعتی، کاربردهای پزشکی و کشاورزی استفاده می‌شوند، نیاز به مطالعه اثر پرتو گاما در بر روی مواد با افزایش کاربردهای آن، افزایش یافته است (۷ و ۸). برهم کنش پرتو با ماده عمدتاً به انرژی، شدت تابش و نوع ماده جاذب بستگی دارد. مطالعه جذب پرتوهای گاما در مواد محافظ مخصوصاً برای میدان‌های مختلف پرتویی مهم است. با وجود اینکه پرتوها کاربردهای فراوانی دارد، به‌ویژه در حرفه پزشکی، این یک واقعیت شناخته شده است که قرار گرفتن در معرض تابش می‌تواند تأثیر منفی بر سلامت انسان و سایر موجودات زنده داشته باشد. استفاده از مواد محافظ مؤثر در برابر تشعشع، بهترین راه مطمئن برای محافظت از خطرات غیر قابل جبران تشعشع است (۹). ماده محافظ رایج در عمل، برای محافظت در برابر قرار گرفتن در معرض پرتوهای گاما و ایکس، سرب است، اما سمی، سنگین و فاقد پایداری شیمیایی، و انعطاف‌پذیری است. برای غلبه بر این معایب سرب، محققان می‌توانند یک

برای جذب تشعشعات پرتوزی مانند پرتوهای گاما و اشعه ایکس که بسیار نافذ هستند و اثرات مضر مختلفی دارند، مناسب هستند. استفاده از این فلزات در بهبود خاصیت حفاظی ماده مؤثر است. بررسی تأثیر ابعاد ذرات این فلزات در خاصیت حفاظی ماده توسط المقربین و همکاران انجام شده است (۲۹). بسیاری از محققان از کامپوزیت‌های پلیمری فوق الاستیک رزینی به عنوان تقویت‌کننده ثانویه در کامپوزیت‌ها برای بهبود پاسخ آن‌ها استفاده کرده‌اند. مهم‌تر از آن، بررسی‌های قبلی عمدتاً بر توانایی تضعیف انرژی مواد محافظ متمرکز شده‌اند؛ در حالی که آسیب‌های بیولوژیکی ناشی از تجمع مستمر دوز تشعشع را نادیده می‌گیرند (۳۰ و ۳۱). با این حال، تحقیقات اخیر پتانسیل قابل توجه پلیمر و کامپوزیت‌های آن را در کاربردهای زیست پزشکی نشان داده است. به عنوان مثال، لی و همکاران (۳۲)، یک کامپوزیت چندلایه برای پیشگیری از آسیب بیولوژیکی توسعه دادند. علاوه بر این، ارزیابی اثربخشی مواد محافظ تشعشعی تنها با در نظر گرفتن توانایی کاهش شدت آن‌ها دیگر اهمیت علمی و عملی کافی ندارد. جدیداً یک راهبرد ارزیابی یافت شده است که به طور همزمان هم توانایی تضعیف شدت و هم انباشت دوز تشعشع را در نظر می‌گیرد و اهمیت ارزیابی جامع توانایی محافظ مواد را برجسته می‌کند (۳۳).

در این کار، ماتریس رزین با تقویت‌کننده اکسید بیسموت، اکسید تلوریم و اکسید گادولینیوم برای ارزیابی توانایی تضعیف پرتوگاما و جذب ذرات ثانویه حاصل از تضعیف پرتو گاما مورد بررسی قرار می‌گیرد. علاوه بر این، پارامترهای تابش گاما مربوطه با استفاده از چنین پارامترهای مفیدی مانند ضریب تضعیف خطی، ضریب تضعیف جرمی، لایه نیم‌مقدار، لایه یک‌دهم مقدار و تجزیه و تحلیل ذرات ثانویه تولیدی تعیین شدند. انتظار می‌رود ترکیبات پلیمری تازه معرفی شده جایگاه مهمی در بسیاری از زمینه‌های فنی و کاربردهای صنعتی برای تولید محافظ‌های کارآمد برای پرتو گاما و اشعه ایکس داشته باشند.

ماده محافظ بدون سرب بسازند که وزن سبکی دارد و در جذب تشعشعات پرتوزی مؤثر است (۱۶-۱۰). تلاش‌های تحقیقاتی روزبه‌روز در حال افزایش است، به گونه‌ای که مطالعات گوناگونی در مورد محافظ‌های تشعشع ترکیبات پلیمری گزارش شده است. ترکیبات پلیمری پیشنهاد خوبی هستند، زیرا پلیمرها نقش مهمی در حفاظت اولیه و ثانویه در برابر تشعشعات گاما دارند (۱۷ و ۱۸). مزیت اصلی استفاده از پلیمرها به عنوان ماتریس، هزینه کم، پردازش آسان، مقاومت شیمیایی خوب، وزن مخصوص کم و وزن سبک است. زیرا پلیمرها موادی هستند که به دلیل وجود ساختارهای متقاطع یا شبکه‌ای با پیوند کووالانسی با همه مولکول‌ها به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند و چشم‌انداز خوبی برای عملکرد طولانی در محیط تابش دوزهای تا ۲۰ میکروسیورت بر ساعت دارند (۱۹ و ۲۰). ترکیبات محافظ تشعشع مبتنی بر پلیمر، مواد ماتریس و پرکننده بر اساس کاربرد انتخاب می‌شوند. از این رو، ترکیبات پلیمری به ابزاری جذاب برای توسعه موادی پلیمری تبدیل شده‌اند که می‌توانند برای کاهش مؤثر تشعشعات با انرژی بالا طراحی شوند (۲۱ و ۲۲). به خصوص، پلی‌استرهای غیراشباع به عنوان یک ماتریس در محافظ‌های کامپوزیتی می‌توانند انعطاف‌پذیری و کارایی محافظتی عالی را ارائه دهند، زیرا در برابر تشعشع مقاوم هستند (۲۳). به طور کلی، پلیمرها به خود نسبت به فلزات عملکرد محافظی در برابر تشعشع پایین‌تری دارند. با این حال، با تقویت یا هر افزودنی دیگر در ماتریس پلیمری، کامپوزیت‌های مبتنی بر پلی‌استرهای غیراشباع می‌توانند توانایی محافظت در برابر تشعشع عالی را از خود نشان دهند (۲۴ و ۲۵). در پژوهش‌های بسیاری نویسندگان تلاشی برای تقویت ترکیب پلیمری با اکسید بیسموت در ماتریس رزین پلی‌استرهای غیراشباع برای بهبود توانایی محافظت گاما آن انجام داده‌اند. با بررسی خواص بالقوه اکسید بیسموت مانند چگالی بالا، نقطه ذوب بالا، رسانایی کم و در دسترس بودن آن به صورت پودر ریز، این ماده به عنوان تقویت‌کننده، انتخاب مناسبی می‌باشد (۲۸-۲۶). فلزات سنگین

۲- مواد و روش تحقیق

۲-۱- مواد

شش ترکیبات پلیمری با اکسید گادولینیوم-تلوریت بیسموت $(\text{Gd}_2\text{O}_3)_x - (\text{TeO}_2)_{(30-x)} - (\text{resin})_{30} - (\text{Bi}_2\text{O}_3)_{40}$ (در اینجا x برابر است با ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد وزنی) و $(\text{Gd}_2\text{O}_3)_x - (\text{Bi}_2\text{O}_3)_{40} - (\text{resin})_{20} - (\text{TeO}_2)_{(40-x)}$ (در اینجا x برابر است با ۲۰، ۲۵ و ۳۰ درصد وزنی) انتخاب شده‌اند. ترکیبات با اکسید گادولینیوم ۱۰ تا ۳۰ درصد وزنی به ترتیب با برچسب R1 تا R6 مشخص شده‌اند که چگالی به همراه درصد وزنی و مولی آن‌ها در جدول (۱) آورده شده است. در بررسی خاصیت حفاظی یک ماده در مقابل پرتو گاما، نوع و میزان عناصر موجود در ترکیب آن، تعیین کننده اثرات آن ماده بر پرتو گاما می‌باشد. هرچه عناصر سنگین موجود در یک ترکیب بیشتر باشد، خاصیت حفاظی آن ماده در مقابل پرتو گاما افزایش می‌یابد که در ادامه به صورت کمی تأثیر افزایش اکسید گادولینیوم بر خاصیت حفاظتی ماده را مورد بررسی قرار می‌دهیم. شش ترکیب پلیمری، متشکل از چهار ترکیب پایه اکسید بیسموت، اکسید تلوریم، اکسید گادولینیوم و رزین می‌باشند. مبنای تغییرات، اکسید گادولینیوم از ۱۰ درصد وزنی در پلیمر R1 تا ۳۰ درصد وزنی در پلیمر R6 می‌باشد. افزایش وزنی اکسید گادولینیوم بالتبع سبب کاهش عنصر تلوریم می‌شود که در نتیجه باعث تغییر ترکیب شیمیایی و ساختار ماده می‌شود.

۲-۲- ابزار شبیه‌سازی جینت ۱۴

ضریب تضعیف جرمی برای هر نمونه پلیمر از طریق جینت ۴ با استفاده از هندسه شبیه‌سازی شرح داده شده در شکل (۱) تعیین می‌شود. این ابزار شبیه‌سازی، کاربر را قادر می‌سازد تا گزینه‌های پیشرفته زیادی را از نظر ترکیب شیمیایی نمونه‌های مورد مطالعه و نوع تابش (گاما، الکترون یا ...) انتخاب کند. این برنامه شبیه‌سازی مفید، به کاربر اجازه می‌دهد مواد را تعریف کند، هندسه آشکارساز ایجاد کند، ذرات و پرتوها را تولید کند، داده‌ها را از تراورد برهم‌کنش‌ها جمع‌آوری کند و همچنین

فرآیندهای فیزیکی را انتخاب کند. فوتون‌های گامای مختلف برای طیف انرژی از ۰/۱۵ تا ۱۵ مگا الکترون‌ولت تنظیم شده‌اند. برای رسیدن به هدف مورد نیاز، یک فایل ورودی ایجاد شد. نمونه حفاظ مورد محاسبه به صورت یک قرص به شعاع ۳۰ سانتی‌متر و ضخامت یک سانتی‌متر در نظر گرفته شده است که در یک حجم مکعبی جهانی به ضلع یک متر قرار داشته، مرکز این قرص در مرکز دستگاه مختصات و ضخامت آن در راستای Z قرار گرفته و فضای اطراف آن را هوا احاطه کرده است. چشمه مسئله یک چشمه نقطه‌ای گاما می‌باشد که در سمت چپ قرص و چسبیده به آن بر روی محور Z قرار گرفته است و در جهت مثبت Z تابش می‌نماید. شکل (۱) نمای سه بعدی روش‌های شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. نمایش شماتیک هندسه انتقال پرتو باریک و نمای مقطعی که ۱۰۰ فوتون گاما را در حال عبور از نمونه پلیمری نشان می‌دهد. در این شکل، خطوط سبز داخل مکعب، ردی از پرتوهای گاما هستند. تضعیف فوتون‌ها با شبیه‌سازی تمام فرآیندهای فیزیکی ممکن برای فوتون‌ها، مانند اثرات فوتوالکتریک^۱، پراکندگی کامپتون^۲، پراکندگی ریلی^۳ و تولید زوج^۴ و همچنین برای الکترون‌ها و پوزیترون‌های ثانویه، مانند تابش ترمزی، یونیزاسیون و نابودی پوزیترون تعیین می‌شود. این فرآیندها با استفاده از مدل‌های فیزیک برای فرآیندهای الکترومغناطیسی در گزینه G4EMStandardphysics (۱-۴) شبیه‌سازی شده‌اند. این مدل‌های فیزیک مبتنی بر بسته الکترومغناطیسی هستند که از کتابخانه‌های داده ارزیابی شده استفاده می‌کند که داده‌ها را برای محاسبه مقاطع، زمانی که برهم‌کنش فوتون‌ها و الکترون‌ها با ماده را مدل‌سازی می‌کنند، ارائه می‌کند. به منظور افزایش دقت نتایج، هر شبیه‌سازی برای یک میلیون فوتون گاما انجام شد که این تعداد ذرات درصد خطای نسبی را به کمتر از ۱/۰۹ درصد می‌رساند که دقت خوبی است (۳۴ و ۳۵).

۲-۳- برنامه Phy-x

برنامه Phy-x برنامه‌ای است که با استفاده از داده‌های سطح

جدول ۱- ترکیبات و درصد مولی عناصر ترکیبات پلیمری منتخب

چگالی (g.cm ⁻³)	ترکیبات عناصر (درصد مولی)											نمونه‌ها
	H	C	O	B	N	Si	Ca	Al	Bi	Gd	Te	
۵/۹۴	۰/۱۷۶۸	۰/۲۶۶۳	۰/۳۵۱۳	۰/۰۵۲۲	۰/۰۰۲۱	۰/۰۴۶۱	۰/۰۱۷۰	۰/۰۲۳۳	۰/۰۵۱۰	۰/۰۱۶۳	۰/۰۳۷۴	R1
۶/۰۱	۰/۱۷۸۲	۰/۲۲۸۰	۰/۳۴۷۶	۰/۰۵۲۶	۰/۰۰۲۱	۰/۰۴۶۵	۰/۰۱۷۲	۰/۰۲۳۵	۰/۰۵۱۴	۰/۰۲۴۸	۰/۰۲۸۱	R2
۶/۰۸	۰/۱۷۹۵	۰/۲۲۹۸	۰/۳۴۳۸	۰/۰۵۲۰	۰/۰۰۲۲	۰/۰۴۶۸	۰/۰۱۷۳	۰/۰۲۳۷	۰/۰۵۱۸	۰/۰۲۳۳	۰/۰۱۸۹	R3
۶/۴۶	۰/۱۴۷۲	۰/۱۸۸۴	۰/۳۹۶۲	۰/۰۴۳۶	۰/۰۰۱۶	۰/۰۲۸۴	۰/۰۱۴۳	۰/۰۱۹۴	۰/۰۶۳۷	۰/۰۴۰۹	۰/۰۴۶۵	R4
۶/۵۳	۰/۱۴۸۶	۰/۱۹۰۱	۰/۳۹۱۹	۰/۰۴۴۰	۰/۰۰۱۶	۰/۰۲۸۸	۰/۰۱۴۴	۰/۰۱۹۶	۰/۰۶۴۳	۰/۰۵۱۶	۰/۰۳۵۲	R5
۶/۶	۰/۱۵۰۰	۰/۱۹۱۹	۰/۳۸۷۶	۰/۰۴۴۴	۰/۰۰۱۶	۰/۰۳۹۲	۰/۰۱۴۵	۰/۰۱۹۷	۰/۰۶۴۹	۰/۰۶۲۶	۰/۰۳۳۷	R6

$$I = I_0 e^{-\mu t} \quad (1)$$

که در این رابطه t ضخامت حفاظ بر حسب (cm)، μ ضریب تضعیف خطی بر حسب (cm^{-1})، I_0 شدت تابش فرودی و I شدت تابش خروجی می باشد. ضریب تضعیف خطی از آنجایی ناشی می شود که ما اگر حجمی از یک ماده را در نظر بگیریم، هر یک از اتم های موجود در این ماده به ازای هر انرژی پرتوگاما دارای سطح مقطع کل ($\sigma_{\text{اتم}}$) مشخصی می باشد که از مجموع سطح مقطع های جذب فوتوالکتریک (فوتوالکتریک σ)، پراکندگی کامپتون (کامپتون σ)، پراکندگی رایلی (رایلی σ) و تولیدزوج (تولیدزوج σ) آن اتم، طبق رابطه (۲)، حاصل می شود.

$$\sigma_{\text{کل}} = \sigma_{\text{رایلی}} + \sigma_{\text{کامپتون}} + \sigma_{\text{فوتوالکتریک}} = \sigma_{\text{اتم}} \quad (2)$$

از ضرب این سطح مقطع اتم در تعداد اتم های موجود در حجم و جمع بر روی انواع اتم های موجود در حجم سطح مقطع کل $\sigma_{\text{کل}}$ به دست می آید (رابطه ۳) (۳۵).

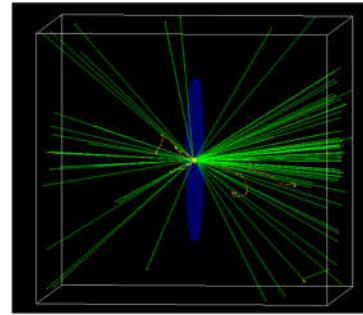
$$\sigma_{\text{کل}} = \sum_{i=1}^{i=n} (\sigma_{\text{اتم}_i} \times \text{حجم}) \quad (3)$$

که در این رابطه n تعداد انواع اتم می باشد. تعداد اتم های موجود در حجم را با توجه به چگالی ماده و درصد مولی اتم ها در ماده می توان محاسبه کرد. $\sigma_{\text{کل}}$ بر حسب (cm^2) به دست می آید که اگر تقسیم بر حجم ماده شود، μ ضریب تضعیف خطی بر حسب (cm^{-1}) به دست می آید.

$$\text{ضریب تضعیف جرمی} \left(\frac{\mu}{\rho} \right) \quad (4)$$

این کمیت، با تقسیم ضریب تضعیف خطی بر چگالی ماده حفاظ، به دست می آید. با در نظر گرفتن ضریب تضعیف خطی بر حسب (cm^{-1}) و چگالی ماده بر حسب (g/cm^3) ضریب تضعیف جرمی بر حسب (cm^2/g) به دست می آید. ضریب تضعیف جرمی را از طریق دیگری نیز می توان محاسبه کرد. طبق رابطه (۴) خواهیم داشت (۳۶):

$$\left(\frac{\mu}{\rho} \right)_{\text{پلیمر}} = \sum_{i=1}^{i=n} w_i \left(\frac{\mu}{\rho} \right) \quad (4)$$



شکل ۱- شکل هندسی شبیه سازی شده در ابزار شبیه سازی جینت ۴.

مقطع عناصر که در کتابخانه خود دارد کمیت های فیزیکی مورد استفاده در فیزیک هسته ای را محاسبه نموده و در اختیار می گذارد. هر ماده ترکیبی با هر درصد ترکیب که باشد به روشی که خود برنامه مشخص نموده است به برنامه معرفی شده و در پایان کمیت های فیزیکی مربوط به آن ماده از این برنامه استخراج می شود. این برنامه محدوده انرژی گسترده ای را پوشش داده و حتی انرژی تابش های هسته ای عناصر رادیواکتیو را در خود دارد.

۲-۴- تئوری

در بررسی کمی خواص حفاظتی یک ماده در مقابل اشعه گاما، بهترین روش، محاسبه پارامترهایی است که اثر تضعیف پرتو گاما بر مقادیر آن ها، مشهود باشد. در این خصوص چندین پارامتر وجود دارد که مقالات مختلف از آن استفاده نموده اند که در این مقاله نیز مورد استفاده قرار می گیرند. در این قسمت، کمیت های مربوط به تضعیف گاما به طور خلاصه توضیح داده می شوند:

ضریب تضعیف خطی μ (cm^{-1})

وقتی تابش فرودی در حالت ایده آل به صورت تک انرژی و در یک باریکه نازک در جهت عمود بر صفحه حفاظ وارد لایه حفاظ شود، شدت آن به صورت نمایی طبق رابطه (۱) کاهش می یابد (۳۶).

$$TVL = t_{\frac{1}{10}} = \frac{\ln 10}{\mu} = \frac{2.303}{\mu} \text{ (cm)} \quad (8)$$

مسیر آزاد میانگین^{۱۰} (cm)

مسیر آزاد میانگین، مسافتی است که پرتو گاما به صورت میانگین در داخل ماده طی می‌کند تا اولین برخورد را انجام دهد. که می‌توان آن را با استفاده از رابطه (۹) محاسبه نمود (۳۶).

$$MFP = \frac{1}{\mu} \text{ (cm)} \quad (9)$$

که در آن μ همان ضریب تضعیف خطی ماده می‌باشد.

سطح مقطع اتمی کل (cm²/atom) و سطح مقطع الکترونی کل (cm²/electron)

سطح مقطع اتمی کل (σ_a) و سطح مقطع الکترونی کل (σ_e) به ترتیب طبق روابط (۱۰) و (۱۱) به دست می‌آیند.

$$\sigma_a = \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\text{cm}^2}{\text{atom}} \right) = \frac{1}{N_A} \sum_{i=1}^{i=n} \frac{W_i}{A_i} \quad (10)$$

$$\sigma_e = \frac{1}{N_A} \sum_{i=1}^{i=n} \frac{f_i A_i}{Z_i} \left(\frac{\mu}{\rho} \right)_i \left(\frac{\text{cm}^2}{\text{electron}} \right) \quad (11)$$

در رابطه (۱۰)، N_A ، W_i ، A_i و ρ/μ به ترتیب وزن اتمی و کسر وزنی عنصر نام، عدد آووگادرو و ضریب تضعیف جرمی ماده می‌باشند.

درصد وزنی عناصر در جدول (۱) آورده شده است که با تقسیم آن بر ۱۰۰ کسر وزنی عناصر به دست می‌آید.

در رابطه (۱۱)، f_i ، Z_i و $\left(\frac{\mu}{\rho} \right)_i$ به ترتیب عدد اتمی، کسر مولی و ضریب تضعیف جرمی عنصر نام می‌باشند.

۳- نتایج و بحث

در جدول (۲)، ضریب تضعیف جرمی محاسبه شده توسط ابزار مونت کارلویی جینت ۴ و برنامه Phy-x برای ترکیبات پلیمری R1 تا R6 در محدوده انرژی ۰/۱۵ تا ۱۵ مگا الکترون ولت

در این رابطه $\left(\frac{\mu}{\rho} \right)_i$ و w_i به ترتیب ضریب تضعیف جرمی و کسر وزنی عنصر نام در ترکیب پلیمر می‌باشند که $\sum_{i=1}^{i=n} w_i = 1$. در طرف چپ رابطه (۴)، ρ همان چگالی پلیمر است.

عدد اتمی مؤثر (Z_{eff})

این متغیر طبق رابطه (۵) محاسبه می‌گردد (۳۶):

$$Z_{\text{eff}} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} f_i A_i \left(\frac{\mu}{\rho} \right)_i}{\sum_{i=1}^{i=n} f_j \frac{A_j}{Z_j} \left(\frac{\mu}{\rho} \right)_j} \quad (5)$$

که در این رابطه A_j ، Z_j ، f_j و $\left(\frac{\mu}{\rho} \right)_j$ به ترتیب وزن اتمی، عدد اتمی، کسر مولی و ضریب تضعیف جرمی عنصر نام می‌باشد.

چگالی الکترونی مؤثر (N_{eff})

این متغیر طبق رابطه (۶) محاسبه می‌گردد (۳۶):

$$N_{\text{eff}} = N_A \frac{Z_{\text{eff}}}{\sum_{i=1}^{i=n} f_i A_i} \quad (6)$$

تنها مجهول این رابطه، N_A می‌باشد که برابر است با عدد آووگادرو $(6.022 \times 10^{23})/\text{mol}$.

لایه نیم مقدار^۸ (cm) و لایه یک دهم مقدار^۹ (cm)

این دو کمیت، مقدار ضخامتی از ماده هستند که شدت پرتو گاما، پس از عبور از این ضخامت از ماده، به ۰/۵ و ۰/۱ مقدار اولیه تقلیل می‌یابد. اگر در رابطه (۱) به جای I / I_0 مقدار ۰/۵ را قرار دهیم و معادله را حل نماییم در این صورت t که همان ضخامت لایه است، طبق رابطه (۷)، برابر است با (۳۶):

$$HVL = t_{\frac{1}{2}} = \frac{\ln 2}{\mu} = \frac{0.693}{\mu} \text{ (cm)} \quad (7)$$

و اگر در رابطه (۱) به جای I / I_0 مقدار ۰/۱ را قرار دهیم و معادله را حل نماییم در این صورت t که همان ضخامت لایه است، طبق رابطه (۸)، برابر است با (۳۵):

جدول ۲- مقادیر ضرایب تضعیف جرمی محاسبه شده برحسب انرژی‌های مختلف نوترون برای ترکیبات پلیمری منتخب

Our Work	R1			R2			R3			Energy (MeV)
	Phy-X	%RD	Our Work	Phy-X	Our Work	%RD	Phy-X	Our Work	%RD	
	۵۹/۵۶۶۹	۰/۰۳۴۵	۶۱/۵۶۴۴	۶۱/۵۷۱۸	۶۳/۵۸۳۸	۰/۰۱۳۶	۶۳/۵۸۵۹	۰/۰۳۳۴	۰/۰۱۵	
۴۰/۳۱۹	۰/۲۶۶۹	۴۱/۳۷۷۸	۴۱/۳۷۶۰	۴۲/۳۳۷	۰/۲۳۷۳	۴۲/۳۲۹۴	۰/۳۱۸۴	۰/۰۲		
۱۴/۱۴	۰/۰۱۹۱	۱۴/۴۷۱	۱۴/۴۶۳۴	۱۴/۸۲۱	۰/۰۵۲۴	۱۴/۷۹۱۰	۰/۰۷۵۰	۰/۰۳		
۹/۴۱۲۲	۰/۱۳۷۰	۸/۸۸۳۸	۸/۸۹۸۰	۸/۳۵۵۰۹	۰/۱۶۰۳	۸/۳۷۱۶	۰/۱۹۸۰	۰/۰۴		
۵/۲۸۸۲	۰/۰۳۹۴	۴/۹۹۴۱	۴/۹۹۳۵	۴/۷۰۰۸۳	۰/۰۱۱۱	۴/۷۰۲۳	۰/۰۳۲۲	۰/۰۵		
۴/۱۲۲۰	۰/۱۵۴۴	۴/۳۵۲۰	۴/۳۴۴۳	۴/۵۸۲۸	۰/۲۲۴۰	۴/۵۷۰۱	۰/۳۷۷۸	۰/۰۶		
۱/۹۶۶	۰/۸۴۲۹	۲/۰۷۵۵	۲/۰۹۳۲	۲/۱۸۵۴	۰/۰۸۴۷۹	۲/۲۰۴۳	۰/۰۸۶۱	۰/۰۸		
۲/۶۷۹۷	۰/۰۷۵۲	۲/۷۴۲۲	۲/۷۴۳۸	۲/۸۰۴۷	۰/۰۵۵۹۴	۲/۸۰۶۲	۰/۰۵۵۴۰	۰/۱		
۱/۰۰۱۷	۰/۰۳۵۷	۱/۰۲۳۰	۱/۰۲۲۹	۱/۰۴۴۷	۰/۰۰۹۷	۱/۰۴۴۲	۰/۰۴۵۶	۰/۱۵		
۰/۵۲۳۸	۰/۰۹۴۶	۰/۵۳۳۶	۰/۵۳۳۱	۰/۵۴۳۵	۰/۰۹۹۵	۰/۵۴۳۰	۰/۰۹۴۳	۰/۲		
۰/۲۴۲۳	۱/۰۲۰۷	۰/۲۴۵۷	۰/۲۴۲۲	۰/۲۴۹۲	۱/۰۳۸۴	۰/۲۴۶۶	۱/۰۴۶۳	۰/۳		
۰/۱۵۶۰	۰/۲۲۴۷	۰/۱۵۷۷	۰/۱۵۷۳	۰/۱۵۹۳	۰/۲۴۴۱	۰/۱۵۸۹	۰/۲۵۳۳	۰/۴		
۰/۱۱۹۴	۰/۳۶۲۰	۰/۱۲۰۳	۰/۱۱۹۹	۰/۱۲۱۲	۰/۳۷۸۲	۰/۱۲۰۸	۰/۳۸۴۸	۰/۶		
۰/۰۹۸۹	۰/۴۸۳۷	۰/۰۹۹۹	۰/۰۹۹۴	۰/۱۰۰۵	۰/۴۹۶۴	۰/۱۰۰۰	۰/۴۹۹۳	۰/۸		
۰/۰۷۸۰	۰/۸۴۹۵	۰/۰۷۸۳	۰/۰۷۸۶	۰/۰۷۸۶	۰/۸۶۱۶	۰/۰۷۷۹	۰/۸۶۳۶	۱		
۰/۰۶۶۱	۰/۷۸۳۹	۰/۰۶۶۳	۰/۰۶۵۷	۰/۰۶۶۴	۰/۷۹۴۶	۰/۰۶۵۹	۰/۷۹۵۲	۲		
۰/۰۴۴۵	۰/۰۴۹۱	۰/۰۴۴۶	۰/۰۴۴۶	۰/۰۴۴۷	۰/۰۵۹۰	۰/۰۴۴۷	۰/۰۵۹۱	۳		
۰/۰۳۸۸	۰/۳۲۷۷	۰/۰۳۸۸	۰/۰۳۸۹	۰/۰۳۸۹	۰/۳۲۰۰	۰/۰۳۹۰	۰/۳۲۲۵	۴		
۰/۰۳۶۴	۰/۱۵۵۵	۰/۰۳۶۶	۰/۰۳۶۶	۰/۰۳۶۷	۰/۱۴۳۳	۰/۰۳۶۸	۰/۱۴۱۲	۵		
۰/۰۳۵۶	۰/۱۲۰۹	۰/۰۳۵۷	۰/۰۳۵۷	۰/۰۳۵۹	۰/۱۳۸۴	۰/۰۳۵۹	۰/۱۴۵۸	۶		
۰/۰۳۵۴	۰/۳۸۸۱	۰/۰۳۵۶	۰/۰۳۵۴	۰/۰۳۵۸	۰/۴۰۸۷	۰/۰۳۵۶	۰/۴۱۹۲	۸		
۰/۰۳۵۸	۰/۶۶۹۵	۰/۰۳۶۱	۰/۰۳۵۸	۰/۰۳۶۳	۰/۶۹۵۳	۰/۰۳۶۱	۰/۷۱۰۷	۱۰		
۰/۰۳۶۷	۰/۶۴۴۳	۰/۰۳۷۰	۰/۰۳۶۸	۰/۰۳۷۳	۰/۶۶۰۸	۰/۰۳۷۰	۰/۶۷۷۳	۱۵		

ادامه جدول ۲ -

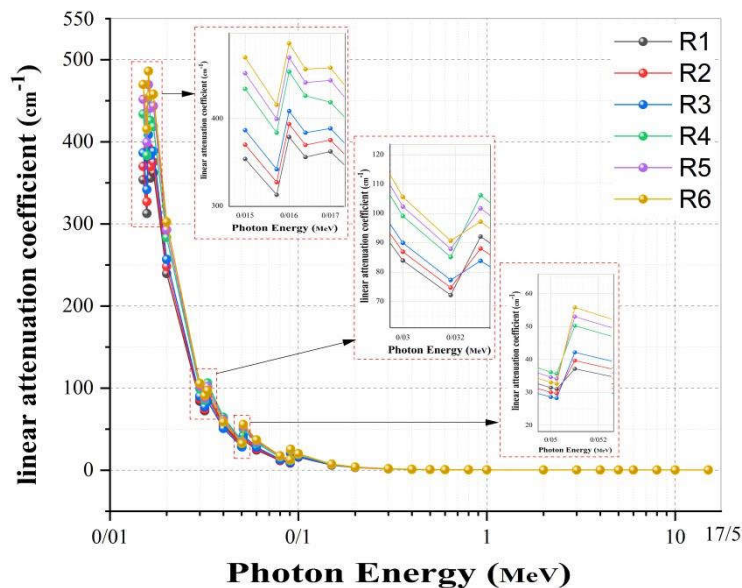
Our Work	R4			R5			R6			Energy (MeV)
	Phy-X	%IRD	Our Work	Phy-X	%IRD	Our Work	Phy-X	%IRD	Our Work	
۶۷/۱۵۸۳	۶۷/۱۶۵۲	۰/۰۱۰۳	۶۹/۱۷۸۵	۶۹/۱۷۹۴	۰/۰۰۱۳	۷۱/۱۹۸۷	۷۱/۱۹۳۵	۰/۰۰۷۱	۰/۰۱۵	
۴۳/۸۸۵۲	۴۳/۹۸۷۶	۰/۲۳۲۸	۴۴/۸۴۴۳	۴۴/۹۴۱۰	۰/۲۱۵۲	۴۵/۸۰۳۳	۴۵/۸۹۴۴	۰/۱۹۸۷	۰/۰۰۲	
۱۵/۳۴۶۷	۱۵/۳۴۷۱	۰/۰۰۲۹	۱۵/۶۷۷۸	۱۵/۶۷۴۷	۰/۰۱۹۴	۱۶/۰۰۸۹	۱۶/۰۰۲۴	۰/۰۴۰۹	۰/۰۰۳	
۹/۹۶۳۸	۹/۹۸۴۰	۰/۲۰۱۹	۹/۴۳۵۲	۹/۴۵۷۶	۰/۲۳۷۰	۸/۹۰۶۵	۸/۹۳۱۲	۰/۲۷۶۲	۰/۰۰۴	
۵/۵۹۰۵	۵/۵۹۱۶	۰/۰۱۹۷	۵/۲۹۷۲	۵/۳۰۰۴	۰/۰۵۹۴	۵/۰۰۴۰	۵/۰۰۹۲	۰/۱۰۳۴	۰/۰۰۵	
۵/۱۲۶۸	۵/۱۲۲۴	۰/۲۸۰۸	۵/۳۵۷۵	۵/۳۴۰۲	۰/۳۲۴۰	۵/۵۸۸۲	۵/۵۶۸۰	۰/۳۶۳۷	۰/۰۰۶	
۲/۴۴۰۴	۲/۴۴۸۸	۰/۸۵۳۴	۲/۵۴۰۳	۲/۵۵۹۹	۰/۸۶۹۲	۲/۶۵۰۱	۲/۶۷۱۱	۰/۸۸۴۲	۰/۰۰۸	
۲/۹۳۵۰	۲/۹۳۶۵	۰/۰۰۵۶	۲/۹۹۷۵	۲/۹۹۸۹	۰/۰۴۵۷	۳/۰۶۰۰	۳/۰۶۱۳	۰/۰۴۱۰	۰/۰۱	
۱/۰۸۵۳	۱/۰۸۴۷	۰/۰۰۲۱	۱/۱۰۷۰	۱/۱۰۶۰	۰/۰۸۴۳	۱/۱۲۸	۱/۱۲۷۳	۰/۱۱۵۳	۰/۰۱۵	
۰/۵۶۰۹	۰/۵۶۰۲	۰/۱۰۸۰	۰/۵۷۰۷	۰/۵۷۰۱	۰/۱۰۲۹	۰/۵۸۰۶	۰/۵۸۰۰	۰/۰۹۷۸	۰/۰۲	
۰/۲۵۴۰	۰/۲۵۱۳	۱/۰۷۵۶	۰/۲۵۷۴	۰/۲۵۴۷	۱/۰۸۲۳	۰/۲۶۰۹	۰/۲۵۸۱	۱/۰۸۸۸	۰/۰۳	
۰/۱۶۰۸	۰/۱۶۰۴	۰/۲۴۱۰	۰/۱۶۲۴	۰/۱۶۲۰	۰/۲۴۹۷	۰/۱۶۴۰	۰/۱۶۳۶	۰/۲۵۷۵	۰/۰۴	
۰/۱۲۱۶	۰/۱۲۱۱	۰/۳۷۶۵	۰/۱۲۲۵	۰/۱۲۲۱	۰/۳۸۳۰	۰/۱۲۳۵	۰/۱۲۳۰	۰/۳۸۹۴	۰/۰۶	
۰/۱۰۰۰۴	۰/۱۰۰۹۹	۰/۴۹۲۷	۰/۱۰۱۰	۰/۱۰۰۵	۰/۴۹۵۱	۰/۱۰۱۶	۰/۱۰۱۱	۰/۴۹۷۴	۰/۰۸	
۰/۰۷۸۱	۰/۰۷۷۴	۰/۸۶۵۵	۰/۰۷۸۴	۰/۰۷۷۷	۰/۸۶۷۵	۰/۰۷۸۷	۰/۰۷۸۰	۰/۸۶۹۳	۱	
۰/۰۶۵۸	۰/۰۶۵۳	۰/۸۰۸۹	۰/۰۶۶۰	۰/۰۶۵۵	۰/۸۰۹۵	۰/۰۶۶۲	۰/۰۶۵۶	۰/۸۱۰۲	۲	
۰/۰۴۴۳	۰/۰۴۴۳	۰/۰۹۷۳	۰/۰۴۴۴	۰/۰۴۴۳	۰/۰۹۷۲	۰/۰۴۴۵	۰/۰۴۴۴	۰/۰۹۷۲	۳	
۰/۰۳۸۸	۰/۰۳۹۰۱	۰/۲۹۵۲	۰/۰۳۹۰	۰/۰۳۹۱	۰/۲۹۷۷	۰/۰۳۹۱	۰/۰۳۹۱۳	۰/۳۰۰۰	۴	
۰/۰۳۷۰	۰/۰۳۷۰	۰/۱۲۱۱	۰/۰۳۷۱	۰/۰۳۷۲	۰/۱۱۹۱	۰/۰۳۷۳	۰/۰۳۷۳	۰/۱۱۷۲	۵	
۰/۰۳۶۴	۰/۰۳۶۴	۰/۱۵۶۴	۰/۰۳۶۶	۰/۰۳۶۶	۰/۱۶۳۴	۰/۰۳۶۸	۰/۰۳۶۷	۰/۱۷۰۵	۶	
۰/۰۳۶۵	۰/۰۳۶۳	۰/۴۲۷۱	۰/۰۳۶۷	۰/۰۳۶۵	۰/۴۳۷۲	۰/۰۳۶۹	۰/۰۳۶۷	۰/۴۴۷۲	۸	
۰/۰۳۷۴	۰/۰۳۷۱	۰/۶۹۶۵	۰/۰۳۷۶	۰/۰۳۷۴	۰/۸۱۱۳	۰/۰۳۷۹	۰/۰۳۷۶	۰/۸۱۵۹	۱۰	
۰/۰۳۸۶	۰/۰۳۸۴	۰/۶۲۶۱	۰/۰۳۸۹	۰/۰۳۸۷	۰/۶۵۱۸	۰/۰۳۹۲	۰/۰۳۸۹	۰/۶۶۷۲	۱۵	

مگا الکترون ولت است که به دلیل برجسته بودن جذب فوتوالکتریک در این ناحیه انرژی می باشد. این بدان معناست که با افزایش انرژی فوتون فرودی، کاهش در تضعیف رخ می دهد که منجر به نفوذ بیشتر پرتوهای گاما در پلیمرها می شود. به علاوه، مقادیر ضریب تضعیف جرمی برای همه نمونه ها با افزایش انرژی فوتون تا ۲ مگا الکترون ولت (تأثیر اثر فوتوالکتریک) به سرعت کاهش می یابد. سپس، آن ها در محدوده انرژی ۲ تا ۱۵ مگا الکترون ولت، تقریباً ثابت هستند (مستقل از انرژی فوتون) که در آن فرآیند پراکندگی کامپتون غالب است که حتی اضافه شدن سطح مقطع فرآیند تولید زوج (هسته ای و الکتریکی) به مقادیر ضریب تضعیف جرمی تأثیر چندانی در افزایش آن ندارد. با کمی دقت در شکل (۳) متوجه خواهیم شد که مقادیر ضریب تضعیف جرمی در پنج قسمت دارای یک جهش کوچکی هستند. این پنج نقطه در محدوده های انرژی (۰/۰۱۵۷۱۱)، (۰/۰۱۶۳۸۸)، (۰/۰۳۱۸۱۴)، (۰/۰۵۰۲۳۹) و (۰/۰۹۰۵۲۴) مگا الکترون ولت قرار دارند که به ترتیب مربوط به جذب لبه L1 عنصر بیسموت، جذب لبه L2 عنصر بیسموت، جذب لبه K عنصر تلوریم، جذب لبه K عنصر گادولینیوم و جذب لبه K عنصر بیسموت می باشند. در تغییر انرژی از ۰/۰۱۵۷۱۱ تا ۰/۰۱۶۳۸۸ مگا الکترون ولت برای تمام نمونه ها روند کاهشی مقادیر ضریب تضعیف جرمی افزایشی می شود که این رفتار به دلیل جذب لبه L1 و L2 عنصر بیسموت می باشد. در تغییر انرژی از ۰/۰۳۱۸۱۴ تا ۰/۰۳۳ مگا الکترون ولت، برای تمام نمونه ها روند کاهشی مقادیر ضریب تضعیف جرمی افزایشی می شود که به دلیل غلبه جذب لبه K عنصر تلوریم می باشد. در اینجا مقادیر ضریب تضعیف جرمی نمونه ها نسبت به هم جابه جا می شود که به میزان عنصر تلوریم موجود در نمونه ها بستگی دارد. در این نقطه از انرژی هر ترکیبی بیشترین مقدار تلوریم را داشته باشد ضریب تضعیف جرمی آن از بقیه بیشتر می شود. با این توصیف ها، پلیمر R4 دارای بیشترین مقدار و پلیمر R3 دارای کمترین مقدار ضریب تضعیف جرمی می شود.

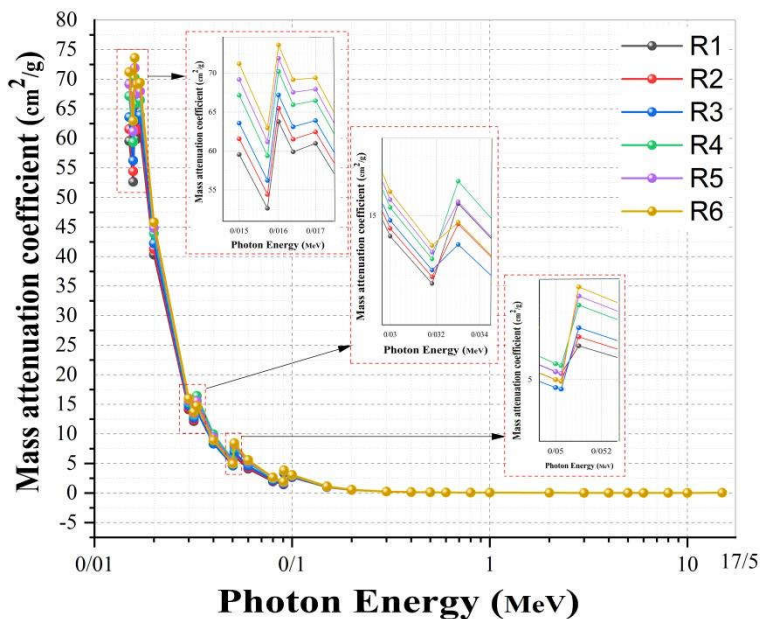
آورده شده است. مقایسه کمی نتایج این دو برنامه با نماد RD% که نماد درصد انحراف از معیار می باشد، که در جدول (۲) نشان داده شده است. لازم به توضیح است که رابطه درصد انحراف از معیار به صورت رابطه (۱۲) تعریف می شود.

$$RD\% = \frac{(\mu_{Ph-x} - \mu_{Geant4})}{\mu_{Geant4}} \quad (12)$$

مقادیر RD% برای ترکیبات پلیمری R1 تا R6 به ترتیب در محدوده های، (۰/۰۱۹۱ تا ۰/۰۲۰۷)، (۰/۰۰۹۷ تا ۰/۰۳۸۴)، (۰/۰۰۳۴ تا ۰/۰۴۶۳)، (۰/۰۰۰۲ تا ۰/۰۷۵۶)، (۰/۰۰۱۳ تا ۰/۰۸۲۳) و (۰/۰۰۷۱ تا ۰/۰۸۸۸)، قرار دارند که حتی از ۱/۰۹ درصد هم فراتر نمی رود که نشان می دهد داده های حاصل از شبیه سازی جینت ۴، مطابقت خوبی با نتایج معیار دارد. شکل (۲) ضریب تضعیف خطی R1 تا R6 در محدوده انرژی ۰/۰۱۵ تا ۱۵ مگا الکترون ولت را نشان می دهد. از تقسیم مقادیر این نمودار بر چگالی نمونه ها ضریب تضعیف جرمی به دست می آید که در شکل (۳) نشان داده شده است روند تغییرات شکل (۲) و شکل (۳) تقریباً به یک شکل است. با توجه به شکل (۳) که به مقایسه ضریب تضعیف جرمی R1 تا R6 در محدوده انرژی ۰/۰۱۵ تا ۱۵ مگا الکترون ولت پرداخته است، مشاهده می شود که با افزایش انرژی گاما، ضریب تضعیف جرمی کاهش می یابد. به طور کلی، با افزایش اکسید گادولینیوم در داخل نمونه ها از ۱۰ درصد وزنی تا ۳۰ درصد وزنی، همچنین کاهش اکسید تلوریم، ضریب تضعیف جرمی در این محدوده از انرژی ها افزایش یافته است، اما در بعضی نقاط نوساناتی دارد که در ادامه به توضیح آن خواهیم پرداخت. در انرژی ۰/۰۱۵ مگا الکترون ولت، ضریب تضعیف جرمی از مقدار $59/5464 \text{ (cm}^2/\text{g)}$ در R1 تا مقدار $71/1987 \text{ (cm}^2/\text{g)}$ در R6 افزایش می یابد که نشان می دهد با افزودن مواد با عدد اتمی بالاتر در یک ترکیب، قدرت جذب گاما ترکیب افزایش یافته و ضریب تضعیف جرمی آن بیشتر می شود. در میان نمونه های R1 تا R6، نمونه R1، به دلیل داشتن کمترین چگالی، قدرت تضعیف فوتون کمتری دارد. بیشترین ضریب تضعیف جرمی مربوط به بازه انرژی ۰/۰۱۵ تا ۰/۰۴



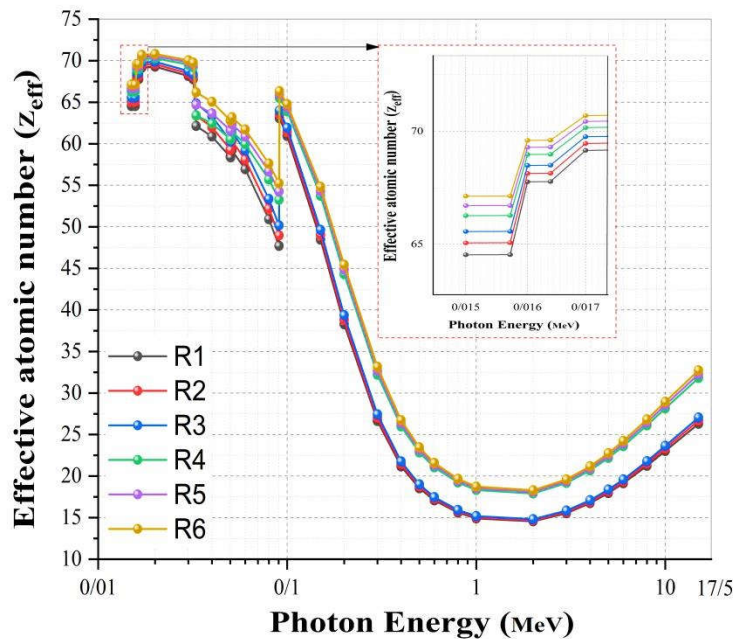
شکل ۲- تغییرات مقادیر ضریب تضعیف خطی کل برای پلیمرهای منتخب برحسب انرژی فوتون‌های فرودی.



شکل ۳- تغییرات مقادیر ضریب تضعیف جرمی کل برای پلیمرهای منتخب برحسب انرژی فوتون‌های فرودی.

به روند افزایشی اولیه R1 تا R6، خواهیم بود. در تغییر انرژی از ۰/۰۹۱ تا ۰/۰۹۵۲۴ مگا الکترون‌ولت، جذب لبه K عنصر بیسموت در تمام نمونه‌ها باعث تغییر روند کاهش‌شی مقادیر ضریب تضعیف جرمی به افزایشی می‌شود. شکل (۴) تغییرات عدد اتمی مؤثر در محدوده انرژی ۰/۱۵ تا ۱۵ مگا الکترون‌ولت

در تغییر انرژی از ۰/۰۵۰۲۳۹ تا ۰/۰۵۱ مگا الکترون‌ولت، جذب لبه K عنصر گادولینیوم در تمام نمونه‌ها باعث تغییر روند کاهش‌شی مقادیر ضریب تضعیف جرمی به افزایشی می‌شود. در اینجا با توجه به روند افزایشی مقدار عنصر گادولینیوم از R1 تا R6، شاهد جابجایی مقادیر ضریب تضعیف جرمی و بازگشت



شکل ۴- تغییرات مقادیر عدد اتمی مؤثر برای پلیمرهای منتخب بر حسب انرژی فوتونهای فرودی.

الکترون ولت به بالا تناسب مقادیر ضریب تضعیف جرمی عناصر ترکیبات به هم می خورد. در این انرژی درصد مشارکت مقادیر ضریب تضعیف جرمی عنصر بیسموت که تقریباً حدود ۱/۵ تا ۲ برابر عنصر گادولینیوم و تلوریم و ۳ تا ۴ برابر عناصر دیگر موجود در ترکیبات است کاهش می یابد. با وارد شدن تأثیر عدد اتمی عناصر دیگر در محاسبه عدد اتمی مؤثر، میزان آن به طور چشمگیری کاهش می یابد. همان طور که در بالاتر اشاره گردید، سه قله در شکل (۴) مشاهده می شود. یکی در انرژی حدود ۰/۰۲ مگا الکترون ولت، یکی در انرژی حدود ۰/۳۳ مگا الکترون ولت و دیگری در انرژی حدود ۰/۱ مگا الکترون ولت که به تفسیر آن می پردازیم. دو لبه جذب L برای عنصر بیسموت وجود دارد یکی L1 در ۱۵/۷۱۱ کیلو الکترون ولت و دیگری L2 در ۱۶/۳۸۸ کیلو الکترون ولت که اثرات جذب این لبه ها باعث افزایش مقادیر عدد اتمی مؤثر در حرکت از انرژی ۰/۱۵ مگا الکترون ولت به سمت انرژی ۰/۰۲ مگا الکترون ولت می شود. با توجه به اینکه جذب لبه K عنصر تلوریم در انرژی حدود ۰/۳۳ مگا الکترون ولت رخ می دهد، در حرکت از انرژی ۰/۰۳ مگا الکترون ولت به سمت انرژی ۰/۳۳ مگا الکترون ولت، تأثیر

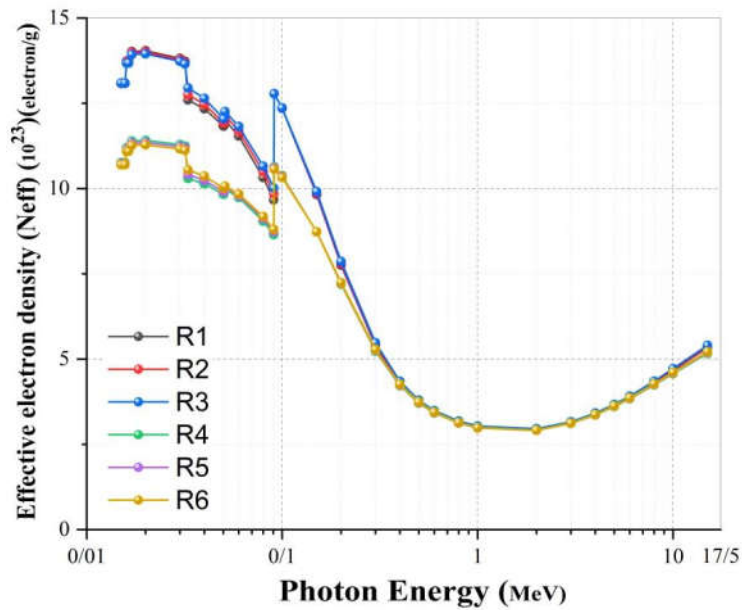
برای پلیمرهای R1 تا R6، را نشان می دهد. در این شکل مشاهده می شود که مقادیر عدد اتمی مؤثر، هم با انرژی فوتون و هم با افزایش چگالی نمونه ها تغییر می کند. روند تغییرات عدد اتمی مؤثر در شکل (۴) بدین صورت است که برای همه نمونه ها، در محدوده های انرژی ۰/۰۲، ۰/۳۳ و ۰/۱ مگا الکترون ولت، به ترتیب افزایش، کاهش و افزایش ناگهانی مشاهده می شود. در نهایت یک روند پیوسته کاهشی افزایشی با شیب ملایم در عدد اتمی مؤثر را شاهد خواهیم بود. نکته ای که در اینجا قابل ذکر است این است که مقادیر ضریب تضعیف جرمی هر عنصری در ترکیبات پلیمر در هر انرژی نقش برجسته داشته باشد، Z آن عنصر نیز در محاسبه عدد اتمی مؤثر در آن انرژی، مؤثرتر خواهد بود. با توجه به این مطلب، در محدوده انرژی ۰/۱۵ تا ۰/۰۳ مگا الکترون ولت به دلیل افزایش درصد مشارکت مقادیر ضریب تضعیف جرمی عنصر بیسموت، که حدود ۱/۵ تا ۲ برابر عنصر گادولینیوم و تلوریم و همچنین ۲۰ تا ۳۰ برابر عناصر دیگر موجود در ترکیبات پلیمر می باشد، عدد اتمی بالای عنصر بیسموت بیشترین تأثیر را در محاسبه عدد اتمی مؤثر از خود نشان می دهد. در انرژی یک مگا

معمولاً برای اینکه یک پلیمر به عنوان حفاظ پرتو گاما در نظر گرفته شود باید مقدار عدد اتمی مؤثر بزرگی داشته باشد. زمانی که فوتون‌ها با تعداد الکترون‌های بیش‌تری مواجه شوند احتمال اندرکنش آن‌ها با الکترون‌ها و در نتیجه جذب فوتوالکتریک آن‌ها افزایش می‌یابد، به طوری که نمونه R6 یک جاذب خیلی خوب در مقایسه با سایر نمونه‌ها می‌باشد. شکل (۵) تغییرات چگالی الکترونی مؤثر برحسب انرژی در محدوده انرژی ۰/۱۵ تا ۱۵ مگا الکترون‌ولت را نشان می‌دهد. چگالی الکترونی مؤثر از ضرب عدد اتمی مؤثر در عدد آوگادرو و تقسیم آن بر وزن اتمی میانگین ترکیب به دست می‌آید. از آنجایی که عدد آوگادرو و وزن اتمی میانگین برای یک ترکیب ثابت هستند و به انرژی فوتون فرودی بستگی ندارند؛ نتیجه می‌گیریم که شکل نمودار چگالی الکترونی مؤثر همان شکل نمودار عدد اتمی مؤثر است که در عدد ثابتی ضرب شده است. مقدار وزن اتمی میانگین از یک ترکیب به ترکیب دیگر تغییر می‌کند و ترکیبی که چگالی بیش‌تری دارد وزن اتمی میانگین آن بیشتر است. یعنی، نمودار مربوط به نمونه R6 بر عدد بزرگ‌تری تقسیم شده و نمودار مربوط به نمونه R1 بر عدد کوچک‌تری تقسیم شده است. همین امر، باعث به هم ریختگی نمودارهای چگالی اتمی مؤثر شده و روندی که در نمودارهای عدد اتمی مؤثر وجود داشته، کمی جابه‌جا می‌شود و از روی آن نمی‌توان وضعیت نمونه‌های R1 تا R6 را با یک نگاه با هم مقایسه کرد. روند تغییرات چگالی الکترونی مؤثر برحسب انرژی فوتون، همان روند تغییرات عدد اتمی مؤثر برحسب انرژی فوتون می‌باشد که تحلیل‌های نمودارهای عدد اتمی مؤثر را برای نمودارهای چگالی الکترونی مؤثر نیز می‌توان در نظر گرفت.

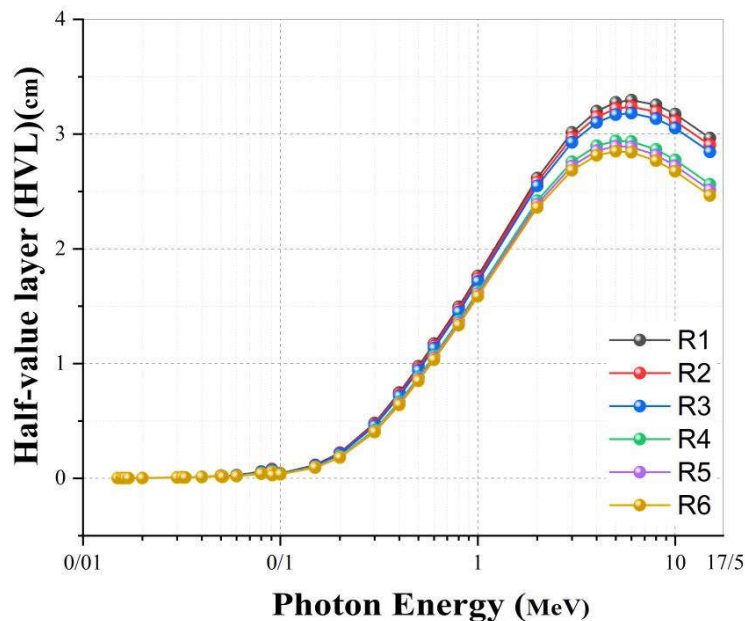
تنها یک نکته باقی می‌ماند و آن این است که در شکل (۵) بر خلاف شکل (۴)، دو شاخه شدن نمودارها این بار در بازه انرژی قبل از ۰/۱ مگا الکترون‌ولت رخ می‌دهد. این به خاطر این است که چگالی نمونه‌ها از R1 تا R3 با اختلاف ۰/۰۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب افزایش می‌یابد، ولی از R3 به R4 ناگهان یک افزایش ۰/۳۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب رخ می‌دهد، سپس

عنصر تلوریم افزایش می‌یابد. در نتیجه با افزایش اثر عدد اتمی تلوریم در محاسبه عدد اتمی مؤثر، مقدار این متغیر کاهش می‌یابد در نهایت، با توجه به اینکه جذب لبه K عنصر بیسموت در انرژی حدود ۰/۱ مگا الکترون‌ولت رخ می‌دهد، در حرکت از انرژی ۰/۰۹ مگا الکترون‌ولت به سمت انرژی ۰/۱ مگا الکترون‌ولت، تأثیر عنصر بیسموت افزایش می‌یابد. در نتیجه، با افزایش عدد اتمی بیسموت در محاسبه عدد اتمی مؤثر، مقدار این متغیر افزایش می‌یابد. برای همه نمونه‌ها حداکثر مقدار عدد اتمی مؤثر در بازه انرژی ۰/۱۵ تا ۰/۰۳ مگا الکترون‌ولت رخ می‌دهد که به دلیل اثر جذب فوتوالکتریک است. همچنین در بازه انرژی ۰/۱ تا ۰/۸ مگا الکترون‌ولت، مقادیر عدد اتمی مؤثر به سرعت کاهش می‌یابد که به دلیل کاهش اثر جذب فوتوالکتریک با افزایش انرژی می‌باشد. در بازه انرژی ۰/۸ تا ۲ مگا الکترون‌ولت، به دلیل برجسته شدن اثر پراکندگی کامپتون، مقادیر عدد اتمی مؤثر تقریباً ثابت باقی می‌ماند و تغییرات آن قابل چشم‌پوشی است که این مقادیر در انرژی ۱/۵ مگا الکترون‌ولت به حداقل مقدار خود می‌رسد. از انرژی ۲ مگا الکترون‌ولت به بالا، افزایش مقادیر عدد اتمی مؤثر با شیب ملایم رخ می‌دهد. که به دلیل اضافه شدن اثر تولید زوج در انرژی‌های بالا است.

با توجه به نمودار شکل (۴)، شاهد دوشاخه شدن نمودارها خواهیم بود. این بدان معنی است که از انرژی ۰/۱ مگا الکترون‌ولت به بالا، عناصر رزین، بیش‌ترین تأثیر را در تعیین عدد اتمی مؤثر خواهند داشت. دسته بالایی مربوط به گروه با رزین ۲۰ درصد می‌باشد که با تأثیر عدد اتمی عناصر دیگر بالاتر قرار می‌گیرد و دسته پایینی مربوط به گروه با رزین ۳۰ درصد می‌باشد. در تغییرات سطح مقطع‌های جذب فوتوالکتریک، پراکندگی کامپتون و تولید زوج برحسب انرژی به ترتیب متناسب است با روابط E^{-1} ، $E^{-3.5}$ و $\log E$ و همچنین تغییرات این سطح مقطع‌ها برحسب عدد اتمی به ترتیب متناسب است با روابط Z^2 و $Z^{4.5}$. بیش‌ترین مقدار عدد اتمی مؤثر مربوط به نمونه R6 با مقدار ۷/۷۹۹۲۲ در انرژی ۰/۰۲ مگا الکترون‌ولت می‌باشد.



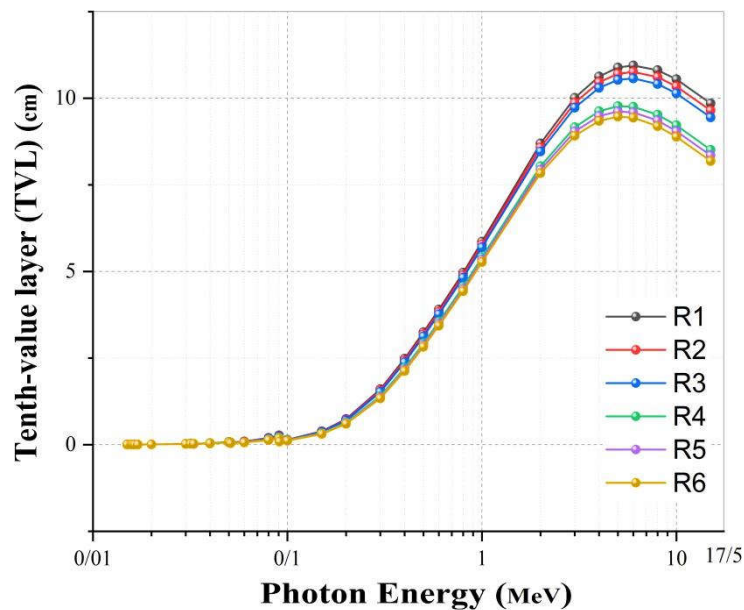
شکل ۵- تغییرات مقادیر چگالی الکترونی مؤثر برای پلیمرهای منتخب برحسب انرژی فوتونهای فرودی.



شکل ۶- تغییرات مقادیر لایه نیم مقدار برای پلیمرهای منتخب برحسب انرژی فوتونهای فرودی.

پلیمرهای R1 تا R6 در محدوده انرژی ۰/۱۵ تا ۱۵ مگا الکترون ولت نشان داده می شود. از شکل های (۶) و (۷) مشاهده می شود لایه نیم مقدار و یک دهم مقدار تا ۰/۱ بسیار کوچک (کمتر از ۰/۸۱ و ۲/۷ میلی متر) و تقریباً ثابت است. سپس، با افزایش انرژی فوتون، افزایش سریعی در مقادیر لایه نیم مقدار و

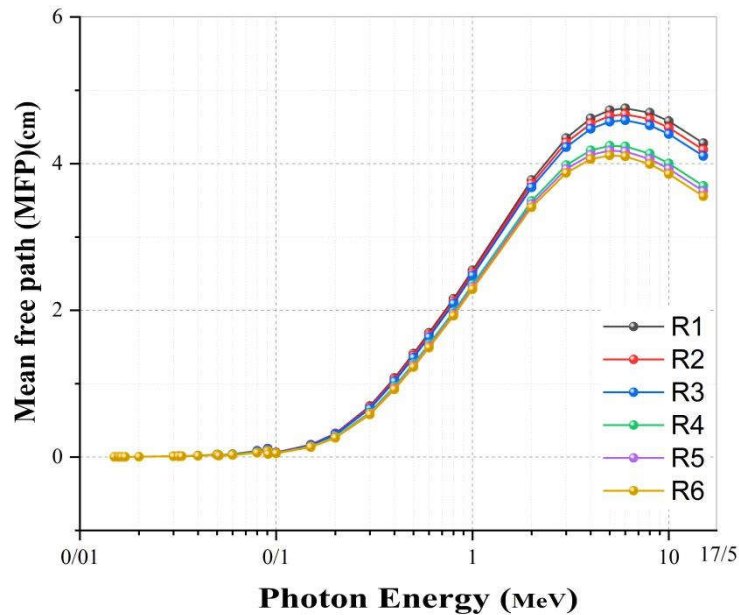
مجدداً از R4 تا R6 با اختلاف ۰/۰۷ گرم بر سانتی متر مکعب افزایش می یابد. همین دو دسته شدن چگالی ها، نمودار چگالی الکترونی مؤثر را در قسمت اول انرژی دو شاخه می کند و در قسمت دوم از حالت دو شاخه ای خارج نموده و یکی می کند. در شکل های (۶) و (۷)، لایه نیم مقدار و یک دهم مقدار برای



شکل ۷- تغییرات مقادیر لایه یک‌دهم مقدار برای پلیمرهای منتخب برحسب انرژی فوتون‌های فرودی.

مباحث قبلی مربوط به ضریب تضعیف جرمی و عدد اتمی مؤثر تفسیر کرد. علاوه بر این، مقادیر لایه نیم‌مقدار و لایه یک‌دهم مقدار با افزایش چگالی در تمام پلیمرهای مورد مطالعه کاهش می‌یابد (کاهش ضخامت). تغییر مقادیر مسیر آزاد میانگین در محدوده انرژی فوتون ۰/۱۵ تا ۱۵ مگا الکترون‌ولت برای همه نمونه‌های R1 تا R6 در شکل (۸) ارائه شده است. در اینجا تا محدوده انرژی ۰/۲ مگا الکترون‌ولت، می‌توان مشاهده کرد که مقادیر مسیر آزاد میانگین از روندی مشابه با مقادیر لایه نیم‌مقدار و لایه یک‌دهم مقدار برای همه پلیمرهای انتخاب شده پیروی می‌کند. تا انرژی ۰/۱ مگا الکترون‌ولت، همه نمونه‌ها مقادیر بسیار کوچک مسیر آزاد میانگین را نشان می‌دهند. سپس، با افزایش انرژی، به حداکثر مقدار خود در انرژی ۶ مگا الکترون‌ولت برای نمونه‌های R1 تا R3 و در انرژی ۵ مگا الکترون‌ولت برای همه نمونه‌های R4 تا R6 می‌رسد. پس از آن، مقادیر مسافت آزاد میانگین یک روند کاهشی تا ۱۵ مگا الکترون‌ولت برای همه نمونه‌ها نشان می‌دهد. همان‌طور که برای روند مقادیر ضریب تضعیف جرمی، عدد اتمی مؤثر، لایه نیم‌مقدار و لایه یک‌دهم مقدار در مطالب قبل توضیح داده شد، در اینجا، برای مقادیر مسافت آزاد میانگین نیز، فرآیندهای

لایه یک‌دهم مقدار رخ می‌دهد که به بالاترین مقدار در ۶ مگا الکترون‌ولت برای پلیمرهای R1 تا R3 و در ۵ مگا الکترون‌ولت برای پلیمرهای R4 تا R6 می‌رسند. از انرژی فوتون ۵ و ۶ مگا الکترون‌ولت به بعد، می‌توان متوجه شد که هر دو کمیت (لایه نیم‌مقدار و لایه یک‌دهم مقدار) با افزایش انرژی تا ۱۵ مگا الکترون‌ولت کاهش جزئی نشان می‌دهند. در بین نمونه‌ها بیش‌ترین مقادیر لایه نیم‌مقدار و لایه یک‌دهم مقدار شناسایی شده مربوط به نمونه R1 در ۶ مگا الکترون‌ولت، با مقادیر ۳/۳ سانتی‌متر و ۱۰/۹۵ سانتی‌متر می‌باشد. با افزایش چگالی پلیمرها این مقادیر حداکثری (قله نمودار) نمونه به نمونه کاهش می‌یابد و اندکی جابه‌جا می‌شود و در نمونه R6 به حداقل مقدار قله در انرژی ۵ مگا الکترون‌ولت با مقادیر ۲/۸۵ و ۹/۴۷ سانتی‌متر می‌رسد. حداکثر مقادیر لایه نیم‌مقدار و لایه یک‌دهم مقدار مشاهده شده برای پلیمرهای R2، R3، R4 و R5 به ترتیب ۳/۲۴ و ۱۰/۷۶ سانتی‌متر، ۳/۱۸ و ۱۰/۵۷ سانتی‌متر، ۲/۹۴ و ۹/۷۷ سانتی‌متر و ۲/۹ و ۹/۶۲ سانتی‌متر است. تغییرات در لایه نیم‌مقدار و لایه یک‌دهم مقدار در رابطه با انرژی فوتون را می‌توان به عنوان یک نتیجه از فرآیندهای جذب فوتوالکتریک، پراکندگی کامپتون و تولیدزوج در مناطق مختلف انرژی، مشابه

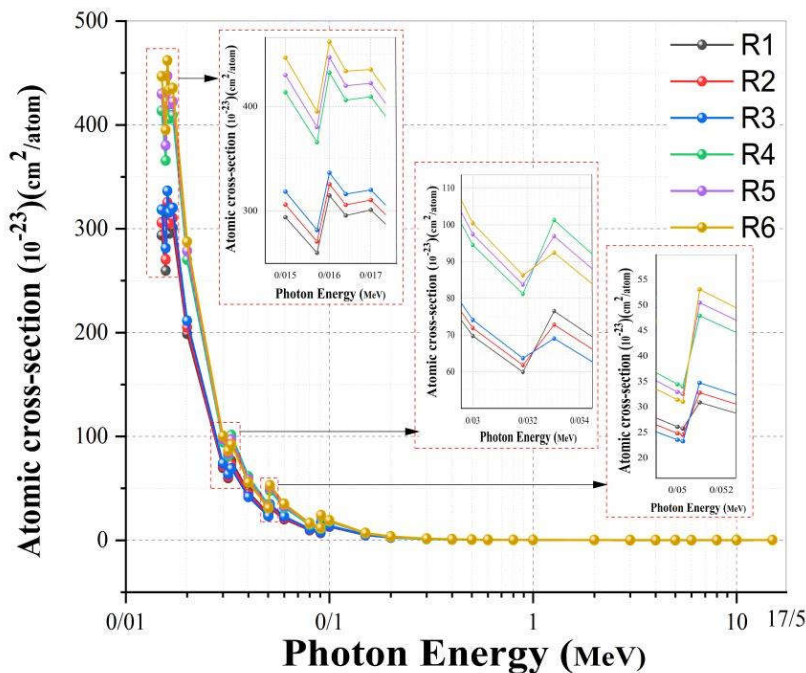


شکل ۸- تغییرات مقادیر مسافت آزاد میانگین برای پلیمرهای منتخب برحسب انرژی فوتونهای فرودی.

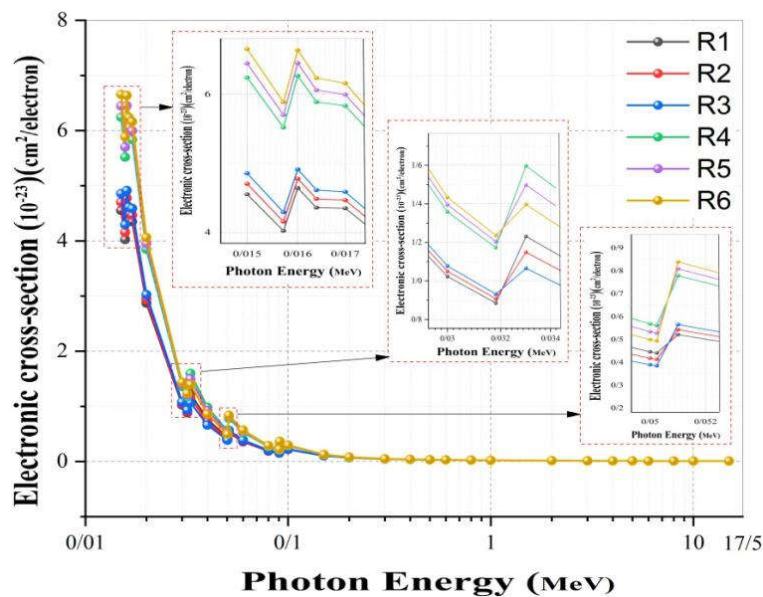
می‌شود. بزرگنمایی مربوط به مناطق انرژی فوتون ۰/۰۱۵ تا ۰/۰۲ مگا الکترون‌ولت، ۰/۰۳ تا ۰/۰۴ مگا الکترون‌ولت و ۰/۰۵ تا ۰/۰۵۲ مگا الکترون‌ولت، به‌عنوان نمودارهای درونی برای شکل‌ها نشان داده شده‌اند. برای همه نمونه‌های انتخاب شده، می‌توان متوجه شد که هر دو مقادیر سطح مقطع اتمی و سطح مقطع الکترونی با افزایش چگالی در انرژی‌های فوتون پایین‌تر افزایش می‌یابند، درحالی‌که تغییرات در این مقادیر در انرژی‌های بالاتر حداقل است. روند تغییرات مقادیر سطح مقطع اتمی و سطح مقطع الکترونی با تغییر انرژی فوتون گاما همانند روند تغییرات ضریب تضعیف جرمی می‌باشد. و تأثیرات لبه‌های عناصر بیسموت و تلوریم و گادولینیوم نیز در اینجا به همان شکل مشاهده می‌شود.

از آنجایی‌که بحث در مورد خاصیت حفاظتی یک ترکیب بدون پرداختن به ذرات ثانویه ناشی از اندرکنش‌های پرتوهای یونیزان با این ترکیب ناقص می‌باشد، در نتیجه در ادامه به بحث در مورد ذرات ثانویه^{۱۱} خواهیم پرداخت. لندرنش پرتو گاما با ماده از چهار طریق اتفاق می‌افتد؛ ۱- اثر فوتوالکتریک ۲- پراکندگی رایلی ۳- پراکندگی کامپتون ۴- تولید زوج (۱۹). در پدیده فوتوالکتریک پرتو گاما جذب می‌شود و الکترون

فوتوالکتریک، پراکندگی کامپتون و تولید زوج نقش مهمی در مناطق مختلف انرژی (یعنی کم، متوسط و زیاد) بازی می‌کنند. حداکثر مقادیر مسافت آزاد میانگین شناسایی شده برای نمونه‌های R1 تا R3، در انرژی فوتون ۶ مگا الکترون‌ولت، ۴/۷۵ سانتی‌متر، ۴/۶۷ سانتی‌متر و ۴/۵۹ سانتی‌متر هستند. درحالی‌که، حداکثر مقادیر مسافت آزاد میانگین برای نمونه‌های R4 تا R6، در انرژی فوتون ۵ مگا الکترون‌ولت، با مقادیر ۴/۲۴ سانتی‌متر، ۴/۱۸ سانتی‌متر و ۴/۱۱ سانتی‌متر مشاهده می‌شود. از شکل (۸)، مشاهده می‌شود که در محدوده انرژی فوتون در نظر گرفته شده، مقادیر مسافت آزاد میانگین برای نمونه R6 کم‌ترین و برای نمونه R1 بیش‌ترین است. در محدوده انرژی ۰/۰۱۵ تا ۱۵ مگا الکترون‌ولت این روند نشان می‌دهد که نمونه R6 با داشتن بالاترین عدد اتمی مؤثر، بهترین پلیمر محافظ در بین تمام نمونه‌های انتخاب شده است. زیرا به‌خوبی می‌دانیم که هرچه مقدار مسافت آزاد میانگین کمتر باشد، تضعیف اشعه گاما بهتر است (احتمال بیشتر برای برهم‌کنش‌های فوتون). برای همه نمونه‌های R4 تا R6، تغییرات در مقادیر سطح مقطع اتمی و سطح مقطع الکترونی در محدوده انرژی فوتون ۰/۰۱۵ تا ۱۵ مگا الکترون‌ولت به ترتیب در شکل‌های (۹) و (۱۰) نشان داده



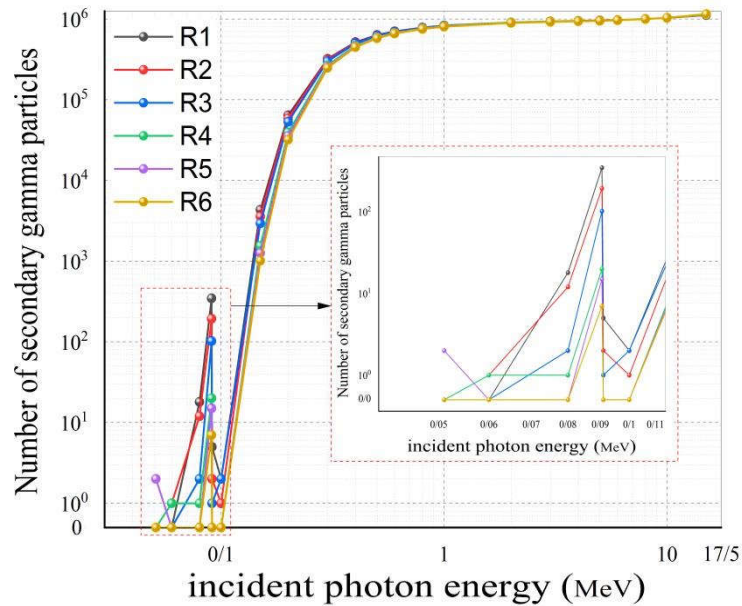
شکل ۹- تغییرات مقادیر سطح مقطع اتمی برای پلیمرهای منتخب برحسب انرژی فوتون‌های فرودی.



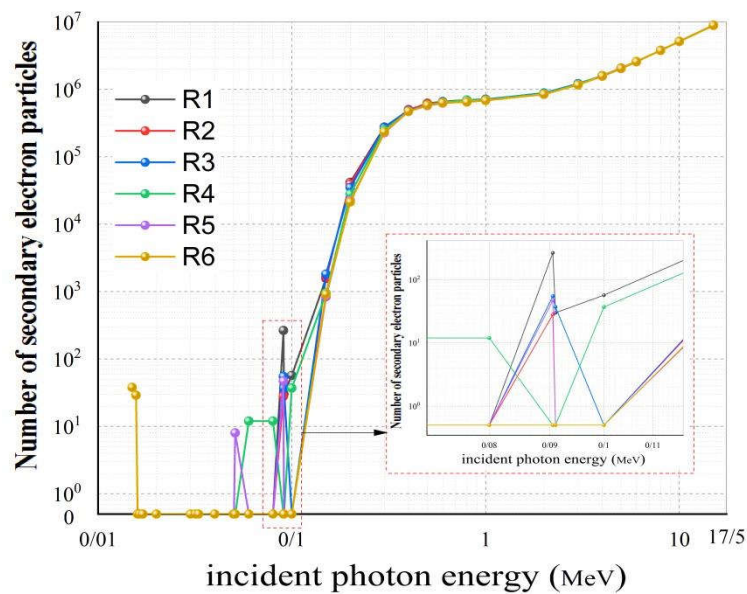
شکل ۱۰- تغییرات مقادیر سطح مقطع الکترونی برای پلیمرهای منتخب برحسب انرژی فوتون‌های فرودی.

پوزیترون ساطع می‌شود. با توجه به این مقدمات، در تابش پرتو گاما به یک ترکیب، ذرات ثانویه خروجی از آن، چیزی جز گاما، الکترون و پوزیترون نخواهد بود. شکل‌های (۱۱-۱۳) به ترتیب نمودار ذرات ثانویه گاما، الکترون و پوزیترون خروجی از یک

سطح می‌شود. در پراکندگی رایی فقط جهت پرتو گاما تغییر می‌کند. در پراکندگی کامپتون انرژی و جهت پرتو گامای فرودی تغییر می‌کند و همچنین الکترون‌های ثانویه تولید می‌شود. در تولید زوج پرتو گاما از بین می‌رود و به جای آن الکترون و



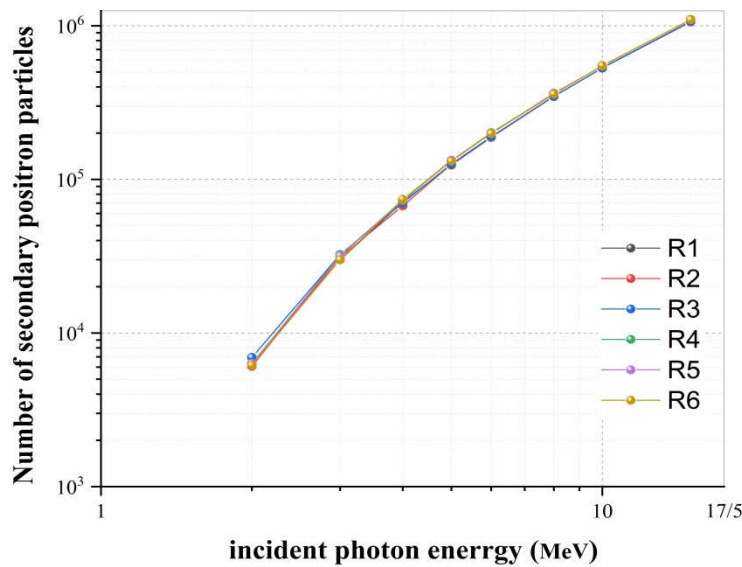
شکل ۱۱- تغییرات تعداد ذرات گامای ثانویه خروجی از حفاظ به ازای 10^6 ذره فرودی.



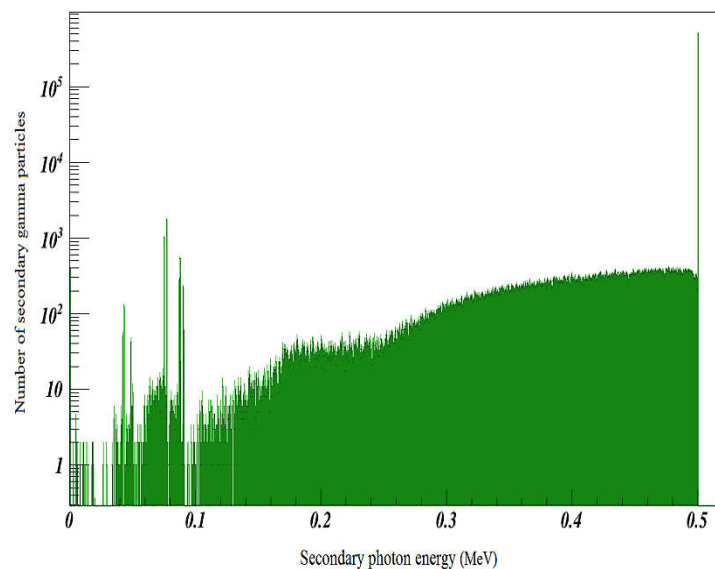
شکل ۱۲- تغییرات تعداد ذرات الکترون ثانویه خروجی از حفاظ به ازای 10^6 ذره فرودی.

الکترون ولت به دلیل اثر لبه K عنصر بیسموت، هم ضریب تضعیف جرمی کاهش می یابد و هم شاهد افزایش ذرات ثانویه خواهیم بود. در شکل (۱۲) مشاهده می شود که در انرژی های ۱۵ تا ۱۷ کیلو الکترون ولت با اینکه ضریب تضعیف جرمی به دلیل افزایش اثر فوتوالکتریک افزایش می یابد، اما تولید ذرات الکترون ثانویه نیز افزایش یافته که در خروجی حفاظ نمایان

حفاظ به ضخامت یک سانتی متر و شعاع 30 سانتی متر برای ترکیبات R1 تا R6، را برحسب انرژی گامای فرودی به ازای 10^6 ذره فرودی، به تصویر می کشند. با توجه به شکل ها مشاهده می شود با تغییر ترکیب از R1 تا R6، نه تنها ضریب تضعیف جرمی آن افزایش یافته و بهبود می یابد بلکه ذرات ثانویه خروجی از حفاظ نیز کاهش می یابد. در انرژی 0.09524 مگا



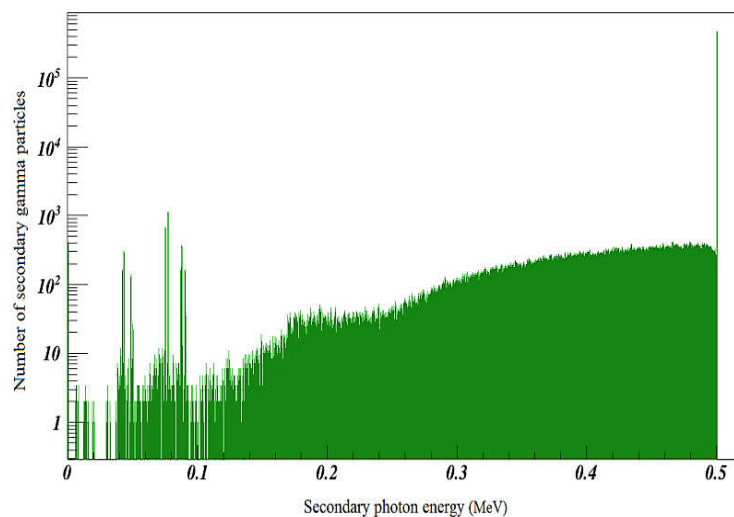
شکل ۱۳- تغییرات تعداد ذرات پوزیترون ثانویه خروجی از حفاظ به ازای 10^6 ذره فرودی.



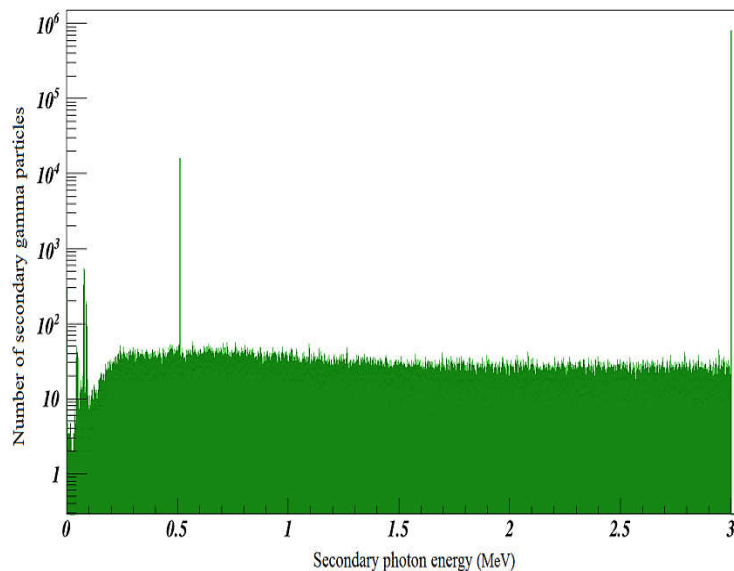
شکل ۱۴- نمایش طیف انرژی گامای ثانویه خروجی از حفاظ R1 به ازای 10^6 ذره فرودی با انرژی ۰/۵ مگا الکترون ولت.

آن‌ها برای هر شش ترکیب تقریباً یکسان است. شکل‌های (۱۸) - (۱۴) به بررسی طیف انرژی ذرات ثانویه می‌پردازد. شکل‌های (۱۴) و (۱۵) به ترتیب طیف انرژی ذرات گامای ثانویه برای ترکیبات R1 و R6، به ازای ذرات گامای فرودی با انرژی ۵۰۰ کیلو الکترون‌ولت را نشان می‌دهند. با دقت در این دو شکل به چند نکته پی خواهیم برد. اکثر گاماهای خروجی همان گامای

می‌شوند. انرژی این الکترون‌ها از ۱ تا ۱۴ کیلو الکترون‌ولت متغیر است و کمتر از نیمی از آن‌ها دارای انرژی زیر یک کیلو الکترون‌ولت می‌باشند. پس، افزایش اثر فوتوالکتریک لزوماً مطلوب نیست، بلکه منجر به افزایش الکترون‌های ثانویه نیز خواهد شد. ذرات پوزیترون ثانویه در انرژی‌های نزدیک ۲ مگا الکترون‌ولت به بالا در خروجی حفاظ مشاهده می‌شوند و مقدار



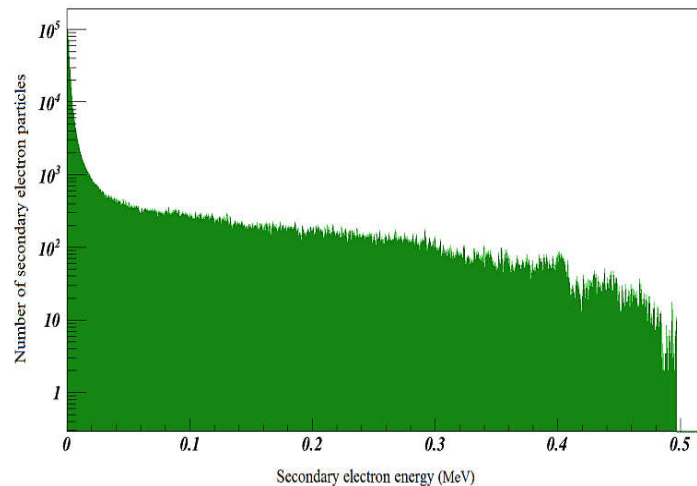
شکل ۱۵- نمایش طیف انرژی گامای ثانویه خروجی از حفاظ R6 به ازای 10^6 ذره فرودی با انرژی ۰/۵ مگا الکترون ولت.



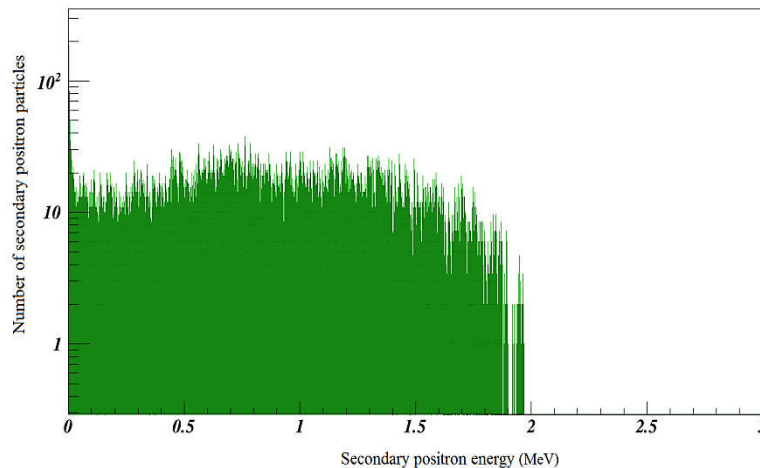
شکل ۱۶- نمایش طیف انرژی گامای ثانویه خروجی از حفاظ R6 به ازای 10^6 ذره فرودی با انرژی ۳ مگا الکترون ولت.

گاماها با انرژی متناظر این قله‌ها ساطع خواهد شد. به دلیل بالا بودن احتمال رخداد این پدیده، تعداد گاماها با انرژی قله‌ها افزایش می‌یابد. شکل (۱۶)، طیف انرژی گاماها با انرژی ۳ مگا الکترون ولت را نشان می‌دهد. در این شکل، علاوه بر قله‌های شکل (۱۴)، قله دیگری در انرژی ۵۱۱ کیلو الکترون ولت مشاهده می‌شود که مربوط به نابودی پوزیترون است. شکل (۱۷)

ورودی می‌باشند که بدون برخورد از حفاظ خارج می‌شوند. برای هر دو شکل در بازه انرژی ۴۰ تا ۹۱ کیلو الکترون ولت تعدادی قله مشاهده می‌شود که مربوط به مدارهای انرژی عنصر بیسموت، گادولینیوم و تلوریم می‌باشند. در اثر جذب فوتوالکتریک در لبه K عنصر بیسموت، گادولینیوم و تلوریم محل الکترون در این لایه خالی می‌شود و با جایگزینی الکترون‌های لایه‌های بالاتر یا الکترون‌های ثانویه در این لایه،



شکل ۱۷- نمایش طیف انرژی الکترون ثانویه خروجی از حفاظ R6 به ازای 10^6 ذره فرودی با انرژی ۰/۵ مگا الکترون ولت.



شکل ۱۸- نمایش طیف انرژی پوزیترون ثانویه خروجی از حفاظ R6 به ازای 10^6 ذره فرودی با انرژی ۳ مگا الکترون ولت.

انرژی ذرات فرودی صرف تولید زوج شده است. همچنین مشاهده می‌کنیم طیف انرژی پوزیترون‌های ثانویه خروجی در همه انرژی‌ها تقریباً یکنواخت است.

۴- نتیجه‌گیری

با استفاده از ابزار شبیه‌سازی جینت ۴، تأثیر اکسید بیسموت و اکسید گادولینیوم به عنوان یک تقویت‌کننده بر تولدایی محافظ گاما مبتنی بر رزین غیر اشباع در قلب ۶ نوع ترکیب پلیمری به صورت کمی بررسی شد. نتایج نشان داد که اختلاف بین داده‌های شبیه‌سازی جینت ۴ و پایگاه داده Phy-x از مرتبه ۰/۱

طیف انرژی الکترون‌های ثانویه خروجی از حفاظ P6 به ازای ذرات گامای فرودی با انرژی ۵۰۰ کیلو الکترون‌ولت را نشان می‌دهد. از آنجا که شکل طیف انرژی الکترون‌های ثانویه با تغییر ترکیبات حفاظ از R1 تا R6، و همچنین با تغییر انرژی گاماها فرودی، مشابه شکل (۱۷) است، به همین شکل بسنده نمودیم.

شکل (۱۸)، طیف انرژی پوزیترون‌های ثانویه خروجی از حفاظ R6 به ازای ذرات گامای فرودی با انرژی ۳ مگا الکترون‌ولت را نشان می‌دهد. با کمی دقت در این شکل متوجه خواهیم شد که انرژی این ذرات در محدوده کمتر از ۲ مگا الکترون‌ولت است که نشان می‌دهد ۱/۰۲۲ مگا الکترون‌ولت از

به عنوان یک تضعیف کننده پرتوی عالی پیشنهاد می کند که می تواند جایگزین خوبی برای پلیمرهای حاوی سرب، عنصری با سمیت بالا، در تاسیساتی مانند راکتورهای هسته ای و رادیوتراپی پزشکی شود. با بررسی ذرات ثانویه و انرژی آن ها، مسیرهای کنترل این ذرات هموارتر شده است که نباید در بررسی حفاظ نادیده گرفته شود. همچنین با بررسی طیف گاماهاى خروجی از حفاظ و تحلیل قله های انرژی آن می توان برخی از عناصر موجود در حفاظ را شناسایی کرد.

تشکر و سپاسگزاری

این تحقیق حمایت خاصی از مؤسسات عمومی، صنعتی و غیرانتفاعی دریافت نکرده است.

تضاد منافع

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

درصد بود که نشان دهنده دقت و صحت شبیه سازی های انجام شده با ابزار شبیه سازی جینت ۴ می باشد. نتایج به گونه ای است که با افزایش گادولینیوم و در نتیجه چگالی ترکیب، ضریب تضعیف خطی و ضریب تضعیف جرمی و همچنین عدد اتمی مؤثر، به صورت کلی در هر نقطه از انرژی گاما (به جز محدوده ۰/۰۳۳ تا ۰/۰۵۰۲۳۹ مگا الکترون ولت، که در این محدوده، روند افزایشی وابسته به افزایش تلوریم است)، افزایش می یابد و لایه نیم مقدار، لایه یک دهم مقدار و مسیر آزاد میانگین روند کاهش را نشان می دهد. با توجه به نمودار نتایج ضریب تضعیف جرمی معلوم می شود که اگر ما یک گرم از هر شش ترکیب را در نظر بگیریم، ترکیب با بیشترین گادولینیوم به طور کلی سطح مقطع تضعیف بزرگتری دارد که در نتیجه در یک وزن مشخص می توان پلیمرهای نازک تر با کارایی تضعیف فوتون بهتری تولید کرد. چگالی بالا (۶/۶ گرم بر سانتی متر مکعب)، مقادیر بالای ضریب تضعیف جرمی و عدد اتمی مؤثر، مقادیر کم لایه نیم مقدار، لایه یک دهم مقدار و مسیر آزاد میانگین که برای نمونه R6 استنتاج شده است، آن را

واژه نامه

1. Geant4
2. photoelectric absorption
3. Compton scattering
4. Rayleigh scattering
5. pair production
6. linear attenuation coefficient

7. mass attenuation coefficient
8. half-value layer
9. tenth value layer
10. mean free path
11. secondary particles

مراجع

1. Cózar IR, Otero F, Maimí P, González EV, Turon A, Camanho PP. An enhanced constitutive model to predict plastic deformation and multiple failure mechanisms in fibre-reinforced polymer composite materials. *Compos Struct.* 2024; 330: 117696. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263822323010425?via%3Dihub>
2. Bhowmik S, Kumar S, Mahakur VK. Various factors affecting the fatigue performance of natural fiber-reinforced polymer composites: a systematic review. *Iran Polym J.* 2023; 33(2): 249–71. <https://doi.org/10.1007/s13726-023-01243-z>
3. Makinde-Isola BA, Taiwo AS, Oladele IO, Akinwekomi AD, Adelani SO, Onuh LN. Development of sustainable and biodegradable materials: A review on banana and sisal fibre-based polymer composites. *J Thermoplast Compos Mater.* 2023; 37(4): 1519–39. <https://doi.org/10.1177/08927057231186324>
4. Machello C, Bazli M, Santos J, Rajabipour A, Arashpour M, Hassanli R. Tensile strength retention of fibre-reinforced polymer composites exposed to elevated temperatures: A meta-analysis review. *Constr Build Mater.* 2024; 438: 137150. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137150>
5. Moola AK, Prabhakar MR, Dey B, Paramasivan B,

- Vangala SM, Jakkampudi R, et al. Biopolymeric composite materials for environmental applications. *Phys Sci Rev.* 2023; 9(6): 2153–74. <https://doi.org/10.1515/psr-2022-0223>
6. Khan F, Hossain N, Mim JJ, Rahman SMM, Iqbal MdJ, Billah M, et al. Advances of Composite Materials in Automobile Applications – a review. *J Eng Res.* 2024 [In Press]. <https://doi.org/10.1016/j.jer.2024.02.017>
 7. Yamaya T, Tashima H, Takyu S, Takahashi M. Whole gamma imaging. *PET Clin.* 2024; 19(1): 83–93. <https://doi.org/10.1016/j.cpet.2023.08.003>
 8. Hiremath GB, Singh VP, Patil PN, Ayachit NH, Badiger NM. Investigation of the nuclear radiation parameters of some Ti alloys for biomedical applications. *Radiat Eff Defects Solids.* 2023; 179: 301–314. <https://doi.org/10.1080/10420150.2023.2265020>
 9. Saleh A, Almohiy H, Shalaby RM, Saad M. Comprehensive investigation on physical, structural, mechanical and nuclear shielding features against X/gamma-rays, neutron, proton and alpha particles of various binary alloys. *Radiat Phys Chem.* 2024; 216: 111443. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2023.111443>
 10. Alzahrani FMA, Elqahtani ZM, Alzahrani JS, Eke C, Alrowaili ZA, Al-Buriahi. Gamma attenuation characteristics of silicon-rich glasses in Na₂O–SiO₂–Al₂O₃–CaO–ZnO system for radiation applications. *J Radiat Res Appl Sci.* 2024; 17(1): 100760. <https://doi.org/10.1016/j.jrras.2023.100760>
 11. Alabsy MT, Abbas MI, El-Khatib AY, El-Khatib AM. Attenuation properties of poly methyl methacrylate reinforced with micro/nano ZrO₂ as gamma-ray shields. *Sci Rep.* 2024; 14(1): 1279. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-51551-4>
 12. Eshghi M, Alipoor M. A Comprehensive Study of Gamma-rays Shielding Features of Binary Compounds. *Prog Physi Appl Mater.* 2024; 4(1): 59-67. <https://doi.org/10.22075/ppam.2024.32949.1082>
 13. Elmahroug Y, Tellili B, Souga C, Manai K. ParShield: A computer program for calculating attenuation parameters of the gamma rays and the fast neutrons. *Ann Nucl Energy* 2015; 76: 94–9. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2014.09.044>
 14. Sadeq, Bashter II, Salem SM, Mansour SF, Saudi HA, Sayyed MI, et al. Enhancing the gamma-ray attenuation parameters of mixed bismuth/barium borosilicate glasses: Using an experimental method, Geant4 code and XCOM software. *Prog Nuclear Energy* 2022; 145: 104124. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2022.104124>
 15. Abbasova N, Yüksel Z, Abbasov E, Gülbiçim H, Tufan MÇ. Investigation of gamma-ray attenuation parameters of some materials used in dental applications. *Results in Phys.* 2019; 12: 2202–5. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2019.02.068>
 16. Alsayed Z, Badawi MS, Awad R, Thabet AA, El-Khatib AM. Study of some γ -ray attenuation parameters for new shielding materials composed of nano ZnO blended with high density polyethylene. *Nucl Technol Radiat Prot.* 2019; 34(4): 342–52. <https://doi.org/10.2298/ntrp190718033a>
 17. Baiocco G, Bocchini L, Giraud M, Barbieri S, Narici L, Lobascio C, et al. Innovative solutions for personal radiation shielding in space. *Radiat Prot Dosimetry* 2018; 183(1–2): 228–32. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncy216>
 18. Ahern M, McEntee MF, Moore N. Radiographers' attitudes toward the use of lead contact shielding. *J Med Radiat Sci.* 2023; 54(3): 415–20. <https://doi.org/10.1016/j.jmir.2023.07.006>
 19. Mansouri E, Mesbahi A, Malekzadeh R, Mansouri A. Shielding characteristics of nanocomposites for protection against X- and gamma rays in medical applications: effect of particle size, photon energy and nano-particle concentration. *Radiat Environ Biophys* 2020; 59(4): 583–600. <https://doi.org/10.1007/s00411-020-00865-8>
 20. Burahmah N, Heilbronn L. Dose measurements at Provision Proton Therapy Center. *Health Phys.* 2024; 126(4): 252–8. <https://doi.org/10.1097/hp.0000000000001796>
 21. Zensen S, Bos D, Opitz M, Forsting M, Guberina N, Deuschl C, et al. Single- and Dual-Source CT myelography: comparison of radiation exposure and establishment of diagnostic reference levels. *Diagnostics* 2021; 11(10): 1809. <https://doi.org/10.3390/diagnostics11101809>
 22. Akuwudike P, López-Riego M, Marczyk M, Kocibalova Z, Brückner F, Polańska J, et al. Short- and long-term effects of radiation exposure at low dose and low dose rate in normal human VH10 fibroblasts. *Front Public Health* 2023; 11: 1297942. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2023.1297942>
 23. Lubczak R, Duliban J. Derivatives of phenylene-1,2-diamine as modifiers for unsaturated polyester resins. *Acta Chim Slov.* 2020; 67(1): 221–34. <https://doi.org/10.17344/acs.2019.5374>
 24. Yılmaz M, Akman F. Gamma radiation shielding properties for polymer composites reinforced with bismuth tungstate in different proportions. *Appl Radiat Isot.* 2023; 200: 110994. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2023.110994>
 25. Mehnati P, Malekzadeh R, Sooteh MY. Use of bismuth shield for protection of superficial radiosensitive organs in patients undergoing computed tomography: a literature review and meta-analysis. *Radiol Phys Technol.* 2019; 12(1): 6–25. <https://doi.org/10.1007/s12194-019-00500-2>
 26. Mahalingam S, Kwon DS, Kang SG, Kim J. Multicomponent X-ray shielding using sulfated cerium oxide and bismuth halide composites. *Mol.* 2023; 28(16): 6045. <https://doi.org/10.3390/molecules28166045>
 27. Akman F, Kaçal, Almousa N, Sayyed MI, Polat H.

- Gamma-ray attenuation parameters for polymer composites reinforced with BaTiO₃ and CaWO₄ compounds. *Prog Nuclear Energy* 2020; 121: 103257. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2020.103257>
28. Elsafi Mohamed, Almuqrin AH, Almutairi HM, Al-Saleh WM, Sayyed MI. Grafting red clay with Bi₂O₃ nanoparticles into epoxy resin for gamma-ray shielding applications. *Sci Rep.* 2023; 13(1): 5472. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-32522-7>
29. Almuqrin AH, Sayyed MI, Khandaker MU, Elsafi M. Exploring the impact of Bi₂O₃ particle size on the efficacy of dimethylpolysiloxane for medical gamma/X-rays shielding applications. *Radiat Phys Chem.* 2024; 220: 111629. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2024.111629>
30. Paçzkowski P, Puszka A, Gawdzik B. Investigation of degradation of composites based on unsaturated polyester resin and vinyl ester resin. *Mater.* 2022; 15(4): 1286. <https://doi.org/10.3390/ma15041286>
31. Hashemi R, Tajik M, Asadi-Amirabadi E. Design and manufacture of composite flexible shield for neutron-gamma mixed fields. *J Radiat Saf Meas.* 2019; 8: 25-34. <https://doi.org/10.22052/7.2.25>
32. Zhou L, Zhu X, Shen P, Huang C, Guo S, Zhou W, Gao Y. Constructing multilayered WB₂/Bi/poly(ethylene-co-1-octene) composites with excellent nuclear radiation shielding efficiency and radiation damage prevention. *J Chem Eng.* 2023; 464: 142625. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.142625>
33. Apte K, Bhide S. Basics of radiation. In: Elsevier eBooks [Internet]. 2024. p. 1–23. <https://doi.org/10.1016/b978-0-323-95387-0.00013-3>
34. Alipoor M, Eshghi M. Ionizing radiation shielding properties of ceramic fibers using Monte Carlo simulation. *Jicers* 2023; 18(4) :48-56 (In Persian). <http://jicers.ir/article-1-463-fa.html>
35. Arce P, Bolst D, Bordage M, Brown JMC, Cirrone P, Cortés-Giraldo MA, Wright DH. Report on G4-Med, a Geant4 benchmarking system for medical physics applications developed by the Geant4 Medical Simulation Benchmarking Group. *Med Phys.* 2020; 48(1): 19–56. <https://doi.org/10.1002/mp.14226>
36. Alipoor M, Eshghi M. Monte Carlo simulation and determination of gamma ray protection characteristics of composites containing Bismuth Oxide and elements of Gadolinium, Titanium, Tungsten, Zirconium, Zinc and Yttrium. *J Sci Technol Compos.* 2024; 10(4): 2348-2356 (In Persian). <https://doi.org/10.22068/jstc.2024.2007267.1845>