



شبیه‌سازی مونت‌کارلو و تعیین ویژگی‌های محافظت پرتو گامای کامپوزیت‌های حاوی اکسیدبیس‌موت و عناصر گادمیم، تیتانیوم، تنگستن، زیرکونیم، روی و ایتريوم

محمد رضا علی‌پور¹، مهدی عشقی^{2*}

1- دانشجوی دکترا، فیزیک، دانشگاه جامع امام حسین(ع)، تهران، ایران.

2- استادیار فیزیک، مرکز علم و فناوری فیزیک، دانشگاه جامع امام حسین(ع)، تهران، ایران.

* تهران، صندوق پستی 16987-15461، meshghi@ihu.ac.ir، eshghi54@gmail.com

چکیده

اطلاعات مقاله:

در این پژوهش، استفاده از کامپوزیت‌های حاوی اکسید بیسموت با ناخالصی گادمیم، تیتانیوم، ایتريوم، تنگستن، زیرکونیم و روی، به عنوان ماده حفاظی برای محافظت مؤثر پرداخته شده است. در اینجا، ارزیابی محافظت‌های پرتوهای ایکس و گاما برای کامپوزیت‌های منتخب، با استفاده از ابزار شبیه‌سازی بر پایه روش مونت‌کارلو Geant4، در محدوده انرژی فوتون 15 کیلوالکترون‌ولت تا 15 مگا الکترون‌ولت پرداخته شده است. برای بررسی عملکرد این کامپوزیت‌های منتخب، کمیت‌های مؤثر در تضعیف پرتو گاما مانند: ضریب تضعیف‌های (کل، خطی و جرمی)، مسافت آزاد میانگین، لایه‌های یک‌دهم‌مقدار و نیم‌مقدار، نسبت پراکندگی کامپتون به ضریب تضعیف کل محاسبه شده است. برای تأیید نتایج شبیه‌سازی، نتایج حاصل از شبیه‌سازی انجام شده با داده‌های مستخرج از پایگاه داده NIST-XCOM مقایسه می‌شود، که داده‌های مستخرج از پایگاه NIST-XCOM و نتایج شبیه‌سازی انجام گرفته توافقی خوبی با یکدیگر دارند. همچنین، درصد انحراف (RD) بین نتایج محاسبه‌شده در بیشتر موارد کمتر از 2 درصد مشاهده می‌شوند. ترکیب اکسید بیسموت حاوی گادمیم به دلیل عدد اتمی بالای بیسموت و گادمیم، جذب و تضعیف فوتون‌های پرتوهای را با کارایی بالاتری نسبت به سرب داشته و سمیت کمتری دارند. حفاظ‌های ترکیب اکسید بیسموت با عنصر گادمیم می‌تواند به‌عنوان جاذب فوتون‌های پرتوهای برای مشاغل مختلف حوزه پرتو پزشکی مانند پزشکان، دندان‌پزشکان، کارکنان اتاق عمل و کارشناسان رادیولوژی استفاده شود و باعث افزایش سلامت و ایمنی کارکنان گردد.

دریافت: ...

پذیرش: ...

کلیدواژه‌ها

روش مونت‌کارلو،

ابزار شبیه‌سازی Geant4،

پرتو گاما،

نوترون،

کامپوزیت‌های بر پایه بیسموت.

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

Mohamadreza Alipoor¹, Mahdi Eshghi^{1*}

1- Department of Physics, Imam Hossein Comprehensive University, Tehran, Iran.

* P.O.B. 16987-15461, Tehran, Iran, meshghi@ihu.ac.ir, eshghi54@gmail.com

Keywords

Monte Carlo method, Geant4 simulator, Gamma-ray, Neutron, Composites based on bismuth.

Abstract

In this research, the use of composites based on bismuth oxide with impurities of Gadolinium, titanium, yttrium, tungsten, zirconium and zinc as a protective material for effective protection has been discussed. In here, the evaluation of X-ray and gamma ray shielding for selected composites has been done using the simulation tool based on Monte Carlo method of Geant4, in the photon energy range of 15 keV to 15 MeV. To investigate the performance of these selected composites, effective quantities in gamma ray attenuation such as: attenuation coefficients (total, linear and mass), mean free distance, one-tenth and half-value layers, the ratio of Compton scattering to the total attenuation coefficient have been calculated. To verify the simulation results, the simulation results are compared with the data extracted from the NIST-XCOM database, and the data extracted from the NIST-XCOM database and the simulation results are in good agreement with each other. Also, the percentage deviation (RD) between the calculated results is less than 2% in most cases. Due to the high atomic number of bismuth and Gadolinium, compound of bismuth oxide containing Gadolinium absorb and attenuate high-energy photons with higher efficiency than lead and are less toxic. Bismuth oxide compound shields with Gadolinium element can be used as absorbers of high-energy photons for various jobs in the field of medical radiation, such as doctors, dental hygienists, operating room workers, and radiologists, and can improve the health and safety of workers.

1- مقدمه

استفاده از فناوری هسته‌ای در زندگی روزمره به‌طور تصاعدی در حال افزایش است. کاربردهای پرتو شامل تصویربرداری، رادیوتراپی و رادیوداروها در پزشکی، تولید انرژی، کشاورزی، صنایع و غیره می‌باشد. نگرانی عمده آلودگی و نشت پرتوها به محیط است که منجر به خطر جبران‌ناپذیری بر روی انسان و محیط‌زیست می‌شود. تشعشعات هسته‌ای مختلف در زمینه‌های مختلفی مورد استفاده قرار می‌گیرند که محافظ‌ها نقش مهمی در به حداقل رساندن خطرات قرار گرفتن در معرض پرتو دارد و یکی از اصول اساسی کار با پرتو، حفاظت در برابر تشعشعات است [1].

با توجه به ماهیت یونیزه‌کننده و قدرت نفوذ بالا فوتون‌ها، قرارگرفتن در معرض پرتوهای یونیزان اثرات نامطلوب زیادی بر سلامتی دارد (مانند افزایش خطر ابتلا به سرطان‌ها و تغییر در ساختار DNA). علاوه بر این، فوتون‌ها نه‌تنها برای بیمار، بلکه برای رادیولوژیست‌ها و اپراتورهای مداخله‌ای در طول روش‌های تصویربرداری مداخله‌ای مانند فلوروسکوپی و توموگرافی کامپیوتری¹ به‌طور بالقوه مضر است. پیچیدگی شرایط قرار گرفتن در معرض پرتو در طی اقدامات تصویربرداری و مداخله‌ای، حفاظت در برابر پرتو را به یک کار چالش‌برانگیز تبدیل می‌کند [2-5].

در کاربردهای عملی چندین ماده به‌عنوان محافظ پرتویی مانند دیوارهای سربی یا انواع خاصی از بتن‌هایی که چگالی بالایی دارند، مورد استفاده قرار می‌گرفت. با توسعه مواد، برخی مواد دیگر که به خوبی با مواد چگالی بالا ترکیب می‌شدند، مانند: بیسموت، مس، فولاد و برخی از انواع سیستم‌های شیشه‌ای با اکسیدهای فلزات سنگین نیز مورد استفاده قرار گرفتند. با این حال، برخی از کاستی‌ها در پایداری شیمیایی، سنگینی، انعطاف‌پذیری و سمیت این مواد محافظ رایج وجود داشت. برای غلبه بر این چالش‌ها در سرب و بتن، محققان شروع به توسعه انواع جدیدی از مواد محافظ کردند، که بدون سرب، ارزان، انعطاف‌پذیر و موثر در جذب فوتون‌های گاما با ترکیب ذرات معدنی و قابل بازیافت مانند سرب یا اکسید سرب در پلیمرها باشند [6-8].

کامپوزیت‌ها می‌توانند معمولاً انتخاب مناسبی برای جایگزینی مواد معمولی باشند. کامپوزیت‌ها به‌دلیل خواص فیزیکوشیمیایی منحصر به‌فرد مورد توجه پژوهشگران قرار گرفتند. گزارش‌های مختلفی مبنی بر استفاده از کامپوزیت‌ها به‌عنوان جاذب پرتو گاما منتشر شده است اما استفاده از آن با مشکلات خاصی همراه بود [9-11]. یکی از راه‌های برطرف کردن ضعف‌های این کامپوزیت‌ها، استفاده از کامپوزیت‌های اصلاح‌شده به‌وسیله ذرات می‌باشد. این کامپوزیت‌ها، با توجه به سازوکار استحکامی، به دو گروه درشت‌ذره و مستحکم‌شده با ذرات پراکنده، تقسیم می‌شوند. در کامپوزیت‌های درشت‌ذره، برهم‌کنش بین ذره و ماتریس، نمی‌تواند در مقیاس مولکولی یا اتمی رخ دهد و فاز اصلاح‌شده سفت‌تر از زمینه است. به نحوی که این ذرات، باعث توقف حرکت فاز زمینه در مجاورت خود می‌شوند. کامپوزیت‌های مستحکم‌شده با ذرات پراکنده در این کامپوزیت‌ها، اندازه ذرات بین 10 تا 100 نانومتر بوده و برهم‌کنش بین آن‌ها، در مقیاس اتمی و مولکولی اتفاق می‌افتد. در این نوع کامپوزیت‌ها، این عمل باعث افزایش استحکام می‌شود [12-15].

کامپوزیت‌های پلیمری دارای دو فاز هستند، می‌توانند به‌عنوان کامپوزیت ماتریسی، خواص آن‌ها به نوع پُرکننده، محتوای پُرکننده، پیوند بین پلیمر و ماتریس و روش‌های آماده‌سازی کامپوزیت بستگی دارد. انواع مختلفی از پلیمرها ممکن است به‌عنوان یک ماتریس مانند ترموپلاستیک، ترموست و

الاستومر استفاده شوند. محققان با استفاده از ترکیب‌های مختلف مواد مانند کامپوزیت‌های زمینه فلزی، سیستم‌های شیشه‌ای، کامپوزیت‌های پلیمری و بسیاری موارد دیگر برای کشف کارایی مواد مجذوب شده‌اند [16-19].

محققان تلاش کرده‌اند، پُرکننده‌های مختلفی را که در کاهش شدت پرتوهای یونیزان موثر هستند، کشف کنند. کامپوزیت تنگستن، بیسموت و سرب توسط بایومی² و همکاران مورد بررسی قرار گرفتند [20]. گزارشی توسط ژو³ و همکاران مبنی بر کارآمدترین کامپوزیت سه‌تایی، نانوذرات بورات و بیسموت برای محافظت در برابر پرتو گاما ارائه شد [21]. سید⁴ و همکاران با روش تولید سلژل و کارایی بالای نانومواد با ترکیبات سرب مانند سولفات سرب، کلرید سرب، برمید سرب، یدید سرب و ترکیبات بیسموت مانند اکسید بیسموت کلرید، بیسموت بروماید، بیسموت فلوراید، یدید بیسموت را در جذب پرتوهای گاما و نوترون بررسی کردند [22]. خواص فیزیکی و کمیت‌های محافظ پرتویی شیشه‌های بیسموت بورات دوپ شده با 0.7 درصد وزنی با فلزات واسطه مانند مس، کبالت و نیکل به‌منظور بررسی کارایی محافظ توسط سلام⁵ و همکاران مورد مطالعه قرار گرفت [23]. پلی دی متیل سیلوکسان⁶ تقویت‌شده با اکسید بیسموت توسط السوی⁷ و همکاران ساخته شد و خواص حرارتی، مکانیکی آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت [24]. حسن و همکاران نقش اکسید بیسموت را در افزایش توانایی محافظ گاما کامپوزیت‌های پلیمری حاوی پلی‌استر غیراشباع مطالعه کرده‌اند [25]. عملکرد محافظ فوتونی کامپوزیت‌های پلی‌استر دوپ‌شده با اکسید بیسموت با کلرید توسط راشد⁸ و همکاران مورد بررسی قرار گرفت [26]. بسیاری دیگر از ترکیبات در قالب بیسموت و اکسید بیسموت به عنوان اصلاح‌کننده مورد استفاده و از نظر حفاظت گاما مورد ارزیابی قرار گرفتند [27، 30]. کامپوزیت اکسید نیکل، آهن و باریم برای تقویت نانوکامپوزیت‌ها با چگالی بالا با استفاده از روش مذاب و ترکیب مورد بررسی قرار گرفتند و نتایج حاصل از محافظ نشان داد برای پرتو گاما و نوترون عملکرد مناسبی دارند [31].

در ادامه مطالعات قبلی محققین، شبیه‌سازی و اعتبارسنجی عملکرد حفاظ پرتو گاما نمونه‌های کامپوزیتی، هدف این مطالعه بوده و بررسی عملکرد یک محافظ گاما کامپوزیت جدید متشکل از عناصر گادمیم، تنگستن، تیتانیوم، زیرکونیم، روی و ایتريوم است. به این منظور، از عناصر گادمیم، تنگستن، تیتانیوم، زیرکونیم، روی و ایتريوم که به‌تنهایی عملکرد مناسبی در برخی از انرژی‌ها برای جذب پرتو گاما دارند با اکسید بیسموت که عملکرد مناسبی برای تضعیف پرتو گاما دارد استفاده شده است تا موجب اصلاح کامپوزیت‌های منتخب گردد.

همچنین، این مواد با ماتریس‌های مختلفی مانند بتن، لاستیک سیلیکون، رزین اپوکسی، پلی‌وینیل کلراید⁹، لاستیک متیل وینیل سیلان¹⁰، پلی‌استایرن¹¹ و پلی‌اتیلن¹² قابلیت ترکیب شدن را دارند. ترکیب شدن با مواد اشاره‌شده سبب ایجاد خواص دیگری مانند انعطاف‌پذیری، وزن کم و کشسانی بیشتر در مواد حفاظی می‌شود که برای طراحی لباس‌های محافظ پرتو و

2 Bayoumi

3 Zhou

4 Sayyed

5 Salam

6 Poly Dimethyl Siloxane

7 ElSawy

8 Rashad

9 Polyvinyl Chloride (PVC)

10 Di Methylene Thoxyvinyl Silane

11 Polystyrene

12 Polyethylene

¹ Computed tomography (CT)

از دمای محیط تا دمای 728 درجه سانتی‌گراد حالت پایدار دارد با گذر از این دما اکسید بیسموت با یک برهم‌کنش گرماگیر که موجب تشکیل بلورهایی با ساختار مکعبی با وجوه مرکزی می‌شود. این ساختار مکعبی، فاز δ نامیده می‌شود که به علت رسانایی یونی زیادی که دارد مورد توجه است. این پلی‌آمورف از دمای 728 درجه سانتی‌گراد تا نقطه ذوب آن در حدود 825 درجه سانتی‌گراد پایدار است و به هنگام سرد شدن تا 650 درجه سانتی‌گراد در حالت پایدار باقی خواهد ماند. در حین فرآیند تشکیل کامپوزیت لایه نازکی با ضخامت نانو در میان الیاف و ماتریس تشکیل می‌شود. که از این فاز به عنوان فاز میانی و یا لایه میانی نام برده می‌شود [34، 36]. در تشکیل فاز میانی خواص از الیاف تا ماتریس تغییر می‌کند. عوامل مختلفی در تشکیل فاز میانی تأثیرگذار هستند، که در این میان می‌توان به عواملی مانند هندسه ی نمونه، درصد حجمی الیاف و نوع سازوکار اتصالی که ما بین الیاف و ماتریس وجود دارد اشاره نمود. ذکر این نکته بسیار حائز اهمیت است که با توجه به نوع بار اعمالی بر کامپوزیت‌ها میزان انتقال تنش در فاز میانی کامپوزیت‌ها تغییر می‌کند، و از این رو بررسی تنش انتقالی در کامپوزیت‌ها امری بسیار مهم خواهد بود. برای بررسی اثر لایه میانی بر عملکرد کلی کامپوزیت‌ها پژوهش‌های زیادی انجام شده است [37، 38]. اکسید ایتیریم یکی از معروف‌ترین افزودنی‌های مورد استفاده در پایدارسازی ساختار مکعبی اکسید بیسموت می‌باشد و فاز مکعبی را در دمای اتاق پایدار می‌نماید [39]. ویژگی کامپوزیت‌های منتخب در جدول 1 نشان داده شده است.

2-3- روابط ریاضی

در اینجا، کمیت‌های معمول مرتبط، پارامترهای محافظ پایه برای پارامترهای محافظ پرتوگاما به صورت معادلات زیر استنتاج می‌شوند. ضریب تضعیف کل معیاری است که نشان می‌دهد یک ماده در حین عبور از هدف، شدت پرتوی تابش را چقدر کاهش می‌دهد که حاصل جمع ضریب جذب و ضریب پراکندگی است. ضریب جذب نشان‌دهنده کسری از تابش فرودی است که توسط ماده در واحد طول جذب می‌شود. بستگی به انرژی تابش و ترکیب اتمی و مولکولی ماده دارد. ضریب پراکندگی نشان‌دهنده کسری از تابش فرودی است که توسط ماده در واحد طول پراکنده می‌شود. پراکندگی می‌تواند به روش‌های مختلفی رخ دهد، مانند پراکندگی ریلی که در آن تابش پراکنده انرژی مشابه تابش فرودی دارد و پراکندگی کامپتون که در آن تابش پراکنده انرژی کم‌تری نسبت به تابش فرودی دارد. ضریب تضعیف کل به ضخامت ماده، انرژی تابش و ترکیب مواد بستگی دارد. هنگام در نظر گرفتن پراکندگی کشسان، ضریب تضعیف کل را می‌توان به سه جزء تقسیم کرد: ضریب جذب فوتوالکتریک، ضریب پراکندگی کامپتون و ضریب پراکندگی کشسان. ضریب جذب فوتوالکتریک نشان‌دهنده احتمال جذب فوتون فرودی در ماده است و باعث می‌شود که یک الکترون از پوسته اتمی داخلی خارج شود. این فرآیند بسیار وابسته به انرژی است و در انرژی‌های فوتون پایین و برای موادی با عدد اتمی بالا بسیار مهم است. ضریب پراکندگی کامپتون نشان‌دهنده احتمال برهم‌کنش فوتون فرودی با یک الکترون لایه بیرونی است که باعث پرتاب شدن آن و پراکندگی فوتون با انرژی کم‌تری می‌شود. این فرآیند همچنین وابسته به انرژی است و در انرژی‌های فوتون بالاتر قابل توجه‌تر می‌شود. ضریب پراکندگی کشسان نشان‌دهنده این احتمال است که فوتون فرودی با الکترون‌های اتمی به صورت منسجم و بدون ایجاد اتلاف انرژی برهم‌کنش خواهد کرد.

پوشش‌های محافظتی برای دیوارها و درب‌های اتاق‌های پرتونگاری نسبت به محافظ‌های سربی مناسب‌تر خواهد بود.

2- مواد و روش‌ها

برای درک بهتر خواننده، یک پیشینه نظری از رابطه‌های معمول برای محافظت در برابر پرتو گاما، برنامه Geant4 و ترکیبات کامپوزیت‌های مورد استفاده در ادامه به اختصار توضیح داده شده‌اند.

1-2- ابزار شبیه‌سازی Geant4¹

جینت-4 اغلب در شبیه‌سازی حفاظت در برابر تشعشع برای ارزیابی و بهینه‌سازی طرح‌های محافظ، ارزیابی سطوح دُز تشعشع و مطالعه رفتار پرتو با استفاده از روش مونت کارلو در مواد مختلف استفاده می‌شود. روش‌های مونت کارلویی دسته‌ای از روش‌های محاسباتی هستند که برای به دست آوردن نتایج عددی بر نمونه‌گیری تصادفی تکیه می‌کنند. این روش‌ها به‌ویژه برای مدل‌سازی موقعیت‌هایی با رفتار پیچیده یا احتمالی مفید هستند. یک چارچوب جامع برای مدل‌سازی و شبیه‌سازی برهم‌کنش ذرات با مواد آشکارساز و تجزیه و تحلیل داده‌های حاصل ارائه می‌کند. این برای شبیه‌سازی دقیق فرآیندهای الکترومغناطیسی، هادرونیک و نوری طراحی شده است که آن را برای طیف گسترده‌ای از کاربردها مناسب می‌کند. از جمله قابلیت‌های جدید آن مدل‌های فیزیکی متنوع برای توصیف برهم‌کنش ذرات با ماده ترکیب می‌باشد. برای شبیه‌سازی حفاظت از تشعشع، فرآیندهایی مانند پراکندگی کامپتون، اثر فوتوالکتریک، تولید زوج و برهم‌کنش‌های نوترون برای پیش‌بینی دقیق انباشت انرژی و دُز تابش در مواد مختلف ضروری هستند. این ابزار شامل ابزارهای تجسم را برای ارائه طرح شبیه‌سازی شده و تجسم مسیرهای تشعشع فراهم می‌کند که کاربران می‌توانند داده‌ها را برای مطالعه توزیع دُز تشعشع، شناسایی نقاط حساس تشعشع، ارزیابی اثربخشی محافظ و بهینه‌سازی طرح‌های محافظ تجزیه و تحلیل کنند. یکی از ویژگی‌های اصلی که عبور یک فوتون از ماده را مشخص می‌کند، انرژی از دست‌رفته فوتون و دادن این انرژی به ذراتی مانند الکترون‌ها می‌باشد. این اثر نتیجه برخورد غیرکشسان با الکترون‌های اتمی ماده است. ذرات تولیدشده توسط فرآیند مرحله‌ای، باعث یونیزه شدن اتم‌های ماده هدف می‌شوند. در فرآیندهای یونیزاسیون، انتشار الکترون در پایان هر مرحله رخ می‌دهد. از این رو، اندازه گام به آستانه تولید بستگی دارد. شایان ذکر است برای نمونه‌ها می‌توان ضرایب تضعیف را با استفاده از منحنی‌های ضریب انتقال از طریق برازش قانون بیر-لامبرت به عنوان تابعی از ضخامت نمونه تعیین کرد [32، 33].

2-2- مواد

اثربخشی یک ماده به عنوان محافظ هنگامی که در معرض تابش گاما قرار می‌گیرد، نتیجه ساختار عنصری و چگالی آن است. در نتیجه، ویژگی‌های نمونه مورد مطالعه باید در حین انجام آزمایش‌های شبیه‌سازی در نظر گرفته شود. اخیراً، از ترفندهای شبیه‌سازی مونت کارلو برای بررسی نمونه‌های کامپوزیت مونتاژ شده برای خواص محافظ آن‌ها استفاده شده است. جهت تکمیل بحث، اشاره می‌شود که اکسید بیسموت با نماد شیمیایی Bi_2O_3 ماده‌ای زرد رنگ، کاملاً غیرسمی و در دمای اتاق جامد است. اکسید بیسموت با توجه به شرایط دمایی پلی‌آمورف‌های مختلف دارد که شامل چهار پلی‌آمورف α ، β ، γ ، δ می‌باشد. فاز α ، که دارای ساختار مونوکلینیک³ است،

¹ Geometry and Tracking 4

² Poly-Amorphous

³ Monoclinic

جدول 1 ترکیب شیمیایی و کسر وزن عناصر برای نمونه‌ها

Table 1 Chemical composition and wt. fraction of elements for samples

کسر وزن عناصر %								چگالی (g/cm ³)	نمونه‌ها
Zn	Zr	Y	W	Ti	Gd	O	Bi		
-	-	-	-	-	8.51	10.76	80.72	8.89	Bi-Gd
-	-	-	-	8.51	-	10.76	80.72	8.37	Bi-Ti
-	-	-	8.51	-	-	10.76	80.72	9.62	Bi-W
-	-	8.51	-	-	-	10.76	80.72	8.36	Bi-Y
-	8.51	-	-	-	-	10.76	80.72	8.53	Bi-Zr
8.51	-	-	-	-	-	10.76	80.72	8.59	Bi-Zn

با این حال μ برای محاسبه این کمیت‌ها به صورت زیر استفاده می‌شود [41]:

$$HVL(cm) = \frac{\ln(2)}{\mu} \quad (3)$$

لایه یک‌دهم مقدار (TVL) به عنوان ضخامت ماده مورد نیاز برای کاهش شدت پرتو تابش به یک‌دهم مقدار اولیه آن تعریف می‌شود. لایه یک‌دهم مقدار به انرژی پرتو و خواص ماده از جمله چگالی و عدد اتمی آن بستگی دارد. لایه یک‌دهم مقدار اغلب در حفاظت در برابر تشعشع برای تعیین ضخامت مناسب مواد محافظ برای محافظت از کارگران و عموم مردم در برابر خطرات پرتویی استفاده می‌شود.

$$TVL(cm) = \frac{\ln(10)}{\mu} \quad (4)$$

درصد انحراف (%RD) بین نتایج حاصل از ابزار شبیه‌سازی Geant4 و داده‌های مستخرج از پایگاه XCOM بر اساس رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$RD\% = \left(1 - \frac{\mu_{Geant4}}{\mu_{XCOM}}\right) * 100 \quad (5)$$

3- نتایج و بحث

همانطور که در شکل 1 مشاهده می‌شود در انرژی‌های کمتر از 1 مگا الکترون‌ولت پدیده غالب فوتوالکتریک بوده و با افزایش انرژی فوتون‌ها میزان این پدیده نیز کاهش می‌یابد. پراکندگی کشسان در انرژی‌های کمتر از 500 کیلو الکترون‌ولت قابل توجه است و پراکندگی ناکشسان تا انرژی 10 مگا الکترون‌ولت وجود دارد و باعث کاهش انرژی فوتون‌های فرودی می‌شود. پدیده تولید زوج نیز با افزایش انرژی، به میزان انرژی آستانه تولید زوج الکترون، پوزیترون خودش را نشان می‌دهد و در انرژی‌های بالاتر از 1 مگا الکترون‌ولت پدیده غالب می‌باشد. در نهایت، ضریب تضعیف کل نیز متناسب با این پدیده‌ها تغییر می‌کند و با آن‌ها رابطه مستقیم دارد.

در این مطالعه، مقدار ضریب تضعیف جرمی در انرژی‌های مختلف برای کامپوزیت‌ها در محدوده انرژی‌های بین 15 تا 15000 کیلو الکترون‌ولت با استفاده از ابزار شبیه‌سازی Geant4 محاسبه شد.

این فرآیند در انرژی‌های فوتون بسیار پایین غالب است. بنابراین، ضریب تضعیف کل با پراکندگی کشسان، مجموع این سه ضریب است و به انرژی فوتون‌های فرودی، ترکیب اتمی و مولکولی ماده و چگالی ماده بستگی دارد. هنگامی که پراکندگی کشسان در نظر گرفته نمی‌شود، ضریب تضعیف کل مجموع ضریب جذب فوتوالکتریک و ضریب پراکندگی کامپتون است. ضریب تضعیف جرمی کمیت مفیدی است زیرا به ما امکان می‌دهد خواص تضعیف مواد مختلف را بدون توجه به چگالی آن‌ها مقایسه کنیم.

در آزمایش‌های جذب پرتو باریک بدون هیچ‌گونه اثرات پراکندگی، شدت فوتون‌های فرود (I₀) بسته به ضخامت ماده (t) و چگالی (g/cm³) کاهش می‌یابد.

طبق قانون بیر-لامبرت، ضریب تضعیف خطی، کمیتی است که توانایی ماده را برای مقاومت در برابر اشعه فرودی توضیح می‌دهد. می‌توان آن را برای فوتون‌های گاما که از یک نمونه عبور می‌کنند، نوشت [40]:

$$\mu(cm^{-1}) = \frac{1}{t} \ln\left(\frac{I_0}{I}\right) \quad (1)$$

در جایی که t (cm) ضخامت نمونه‌ها است، نسبت I / I₀ ضریب انتقال در معادله (1) نامیده می‌شود.

ضریب تضعیف خطی که با نماد μ نشان داده می‌شود، معیاری است که نشان می‌دهد یک ماده چقدر شدت پرتو تابش را در واحد مسافت طی شده از ماده کاهش می‌دهد. اگر با ترکیبات بسیار بیشتری سروکار داریم، آنگاه مقدار ضریب تضعیف جرمی اجزاء و مخلوط‌های بیش از یک عنصر را می‌توان به سادگی با استفاده از قانون مخلوط‌ها با استفاده از معادله زیر به دست آورد [41]:

$$\mu_m = \sum_i W_i \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_i \quad (2)$$

که در آن ρ ، چگالی ماده است، W_i کسر وزنی عنصر سازنده در نمونه است و μ ضریب تضعیف جرمی عنصر مورد استفاده در ترکیب می‌باشد.

لایه نیم‌مقدار (HVL) به عنوان ضخامت ماده مورد نیاز برای کاهش شدت پرتو تابشی به نصف مقدار اولیه آن تعریف می‌شود. لایه نیم‌مقدار به انرژی پرتو و خواص ماده از جمله چگالی و عدد اتمی آن بستگی دارد. ماده‌ای با لایه نیم‌مقدار بالاتر به ضخامت بیشتری نیاز دارد تا شدت پرتو را به نصف مقدار اولیه خود کاهش دهد.

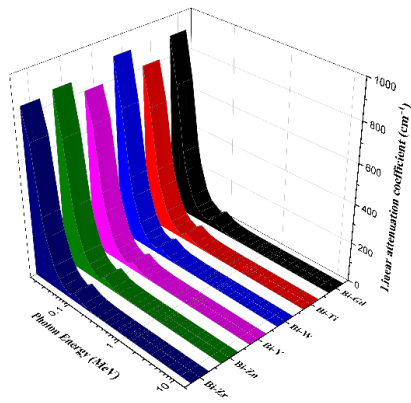


Fig. 3 Linear attenuation coefficient for samples according to energy

شکل 3 ضریب تضعیف خطی برای نمونه ها بر حسب انرژی

مسیر آزاد میانگین اندازه گیری میانگین مسافت طی شده توسط یک ذره یا فوتون بین برخوردهای متوالی با سایر ذرات یا اتمها در یک ماده است. در شکل 4 مشاهده می شود که در انرژی های پایین پرتو بیشتر می توانند با ماده هدف برهم کنش کنند و ترکیبات مسافت آزاد کمتری در این انرژی ها دارند. با افزایش انرژی میزان برهم کنش پرتو با ماده هدف کاهش یافته و مسافت آزاد میانگین نیز افزایش می یابد. تیتانیوم به طور میانگین مسافت بیشتری را در هدف طی می کند و نسبت به سایر ترکیبات عملکرد ضعیف تری برای کاهش شدت پرتوهای گاما دارد.

در شکل 5 میانگین ضخامت در طول انرژی 150 کیلو الکترون ولت تا 1.5 مگا الکترون ولت را مشاهده می کنید. در این بازه انرژی میزان کمترین ضخامت لایه نیم مقدار 5 میلی متر و بیشترین مقدار آن 1.2 سانتی متر می باشد. کاملاً واضح است که هر چقدر طول بازه ضخامت کم تر باشد، مقدار میانگین عدد کمتری را نسبت به دیگران خواهد داشت، که این مقدار میانگین نماد دایره بر روی هر نمودار مشخص شده است. گادیمیم و تنگستن میانگین ضخامت کمتری را نسبت به دیگر عناصر دارند و برای استفاده در این طیف انرژی مطلوب هستند.

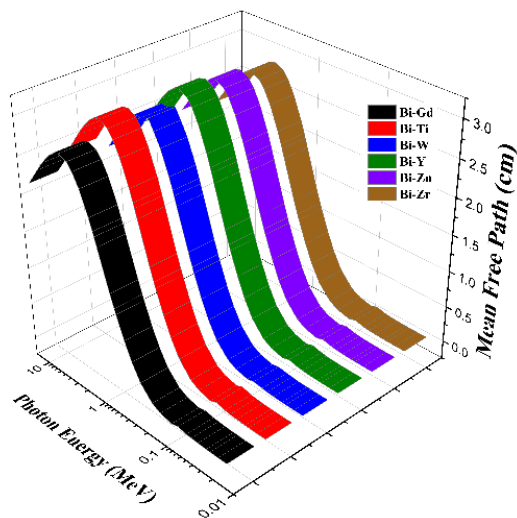


Fig. 4 Mean free path test for samples according to energy

شکل 4 مسافت آزاد میانگین بر حسب انرژی برای نمونه های منتخب

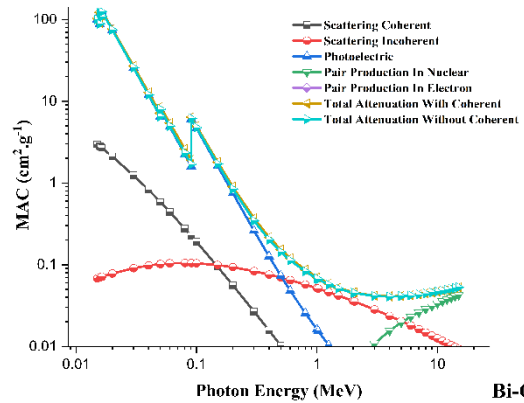


Fig. 1 Total Attenuation coefficient for samples according to energy

شکل 1 ضریب تضعیف کل برای نمونه ها بر حسب انرژی

همچنین داده های پایگاه XCOM نیز برای اعتبارسنجی داده های حاصل از شبیه سازی استخراج شد. نتایج به دست آمده از رابطه 5 در جدول 2 شرح داده شده است. درصد انحراف بین نتایج حاصل از ابزار شبیه سازی Geant4 و داده های مستخرج از پایگاه XCOM برای ترکیب های مورد بررسی در محدوده 0.04 تا 2 درصد بود. این نتایج نشان می دهد، مقادیر ضریب تضعیف شبیه سازی شده توسط ابزار شبیه سازی Geant4 برای ترکیب های مورد بررسی بسیار نزدیک به داده های تجربی برنامه XCOM است و باهم توافق دارند.

در ناحیه انرژی اول (انرژی های کم تر از 100 کیلو الکترون ولت)، نتایج به دست آمده ضریب تضعیف جرمی نمونه های انتخابی با افزایش انرژی فوتون بسیار سریع کاهش می یابد و قله های ناشی از اثر فوتوالکتریک اطراف لبه های جذب M، L و K عنصر بیسموت، گادیمیم، تیتانیوم، زیرکونیم، روی، تنگستن، ایتیریم است.

همان طور که در شکل 3 مشاهده می شود، گادیمیم و تنگستن وقتی با اکسید بیسموت ترکیب می شوند، نسبت به سایر ترکیبات ضریب تضعیف بالاتری دارند و بهتر می توانند پرتوهای گاما را جذب یا تضعیف کنند. در نزدیکی انرژی 100 کیلو الکترون ولت یک قله مشاهده می شود که نشان دهنده لبه جذب K عنصر بیسموت است.

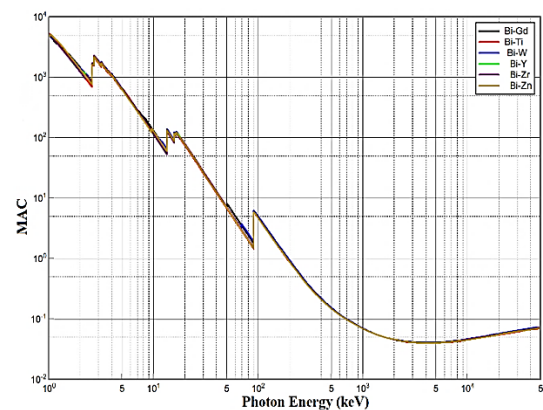


Fig. 2 Mass attenuation coefficient for samples according to energy

شکل 2 ضریب تضعیف جرمی بر حسب انرژی برای نمونه های منتخب

جدول 2 مقادیر محاسبه شده ضریب تضعیف جرمی برای نمونه های منتخب

Table 2 The values of calculated mass attenuation coefficient for chosen samples

Energy (MeV)	Bi-Gd			Bi-Ti			Bi-W			Bi-Y			Bi-Zn			Bi-Zr		
	Cratt4	XCoM	RD%	Cratt4	XCoM	RD%	Cratt4	XCoM	RD%	Cratt4	XCoM	RD%	Cratt4	XCoM	RD%	Cratt4	XCoM	RD%
0.015	101.678	101.753	0.07	96.768	96.863	0.09	105.488	105.627	0.13	95.6582	95.750	0.095	100.62	100.717	0.09	95.817	95.906	0.09
0.02	75.767	76.067	0.39	73.413	73.705	0.39	77.6493	77.947	0.38	77.89	78.188	0.383	75.210	75.520	0.41	78.2466	78.514	0.34
0.03	26.726	26.745	0.07	25.896	25.906	0.03	27.4002	27.417	0.06	27.4527	27.466	0.047	26.505	26.510	0.01	27.5873	27.597	0.03
0.05	7.0735	7.115	0.58	6.858	6.890	0.46	7.25829	7.293	0.47	7.24826	7.277	0.396	7.007	7.033	0.45	7.28092	7.312	0.42
0.0596	5.3198	5.345	0.46	4.363	4.310	1.21	4.61512	4.561	1.17	4.60045	4.542	1.26	4.449	4.395	1.21	4.622	4.563	1.26
0.08	2.487	2.528	1.63	2.049	2.088	1.90	2.6805	2.718	1.4	2.15306	2.191	1.74	2.0861	2.125	1.86	2.16019	2.200	1.85
0.1	4.893	4.913	0.40	4.651	4.672	0.44	5.00497	5.026	0.42	4.70463	4.725	0.44	4.6704	4.691	0.43	4.71034	4.731	0.43
0.15	1.781	1.789	0.41	1.70	1.710	0.45	1.82217	1.830	0.44	1.71872	1.726	0.44	1.708	1.716	0.44	1.72051	1.728	0.43
0.2	0.89	0.895	0.42	0.855	0.859	0.40	0.91065	0.914	0.39	0.86235	0.866	0.39	0.8577	0.861	0.40	0.8631	0.867	0.39
0.3	0.366	0.368	0.35	0.355	0.357	0.35	0.37393	0.375	0.35	0.35738	0.359	0.35	0.3561	0.357	0.35	0.35762	0.359	0.36
0.4	0.215	0.216	0.38	0.210	0.211	0.38	0.21885	0.220	0.39	0.21108	0.212	0.38	0.2106	0.211	0.38	0.21119	0.212	0.38
0.511	0.148	0.153	3.20	0.145	0.150	2.14	0.14992	0.155	3.24	0.14579	0.145	0.51	0.1456	0.144	1.48	0.14585	0.145	0.54
0.8	0.087	0.087	0.10	0.086	0.086	0.52	0.08788	0.086	1.9	0.0866	0.085	1.48	0.0866	0.085	1.59	0.08662	0.088	1.40
1.173	0.061	0.062	0.38	0.0619	0.062	0.33	0.06227	0.063	1.4	0.06182	0.063	1.68	0.0619	0.062	0.14	0.06183	0.062	0.04
1.5	0.052	0.053	0.32	0.052	0.052	1.63	0.05274	0.053	0.05	0.05247	0.052	1.47	0.0525	0.052	1.49	0.05248	0.053	0.41
2	0.045	0.045	1.62	0.0459	0.045	1.49	0.04614	0.045	1.93	0.0459	0.045	1.46	0.0459	0.045	1.60	0.0459	0.045	1.98
3	0.041	0.042	0.36	0.0412	0.041	0.38	0.04105	0.042	2.0	0.04135	0.042	0.365	0.0413	0.042	0.37	0.04137	0.042	0.36
4	0.041	0.041	0.08	0.0401	0.040	0.07	0.04173	0.041	1.71	0.04053	0.040	0.08	0.0404	0.040	0.07	0.04055	0.041	0.08
5	0.042	0.042	0.59	0.0406	0.040	0.58	0.04159	0.041	0.61	0.04093	0.041	0.58	0.0408	0.041	0.58	0.04096	0.041	0.58
6	0.042	0.042	1.00	0.0414	0.041	0.98	0.04259	0.042	1.03	0.04183	0.041	0.98	0.0416	0.041	0.98	0.04185	0.041	0.98
8	0.044	0.044	1.39	0.043	0.043	1.38	0.04503	0.044	1.43	0.04408	0.043	1.36	0.0438	0.043	1.36	0.04411	0.044	1.36
10	0.047	0.047	1.34	0.045	0.045	1.34	0.04752	0.047	1.38	0.04641	0.046	1.31	0.0461	0.046	1.32	0.04645	0.046	1.31
15	0.052	0.052	0.37	0.050	0.051	0.43	0.05299	0.053	0.41	0.05162	0.051	0.38	0.0512	0.051	0.40	0.05167	0.051	0.38

محاسبه تضعیف نوترون‌های سریع در مواد و طراحی سیستم‌های حفاظتی که حفاظت کافی در برابر نوترون‌های سریع را فراهم می‌کند، استفاده می‌شود. طبق جدول 3 کامپوزیت حاوی بیسموت با ترکیب تنگستن بهتر می‌تواند نوترون‌های سریع را حذف کند.

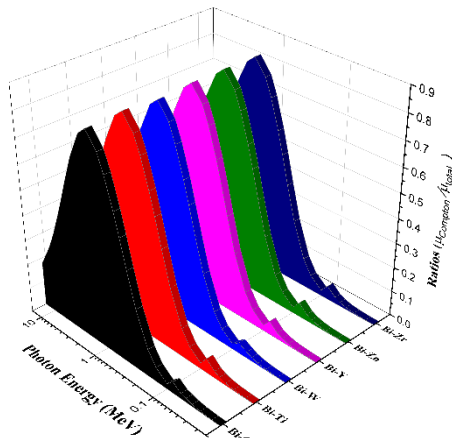


Fig. 7 Ratios ($\mu_{\text{Compton}}/\mu_{\text{total}}$) for samples according to energy

شکل 7 نسبت ضریب تضعیف پراکندگی کامپتون به ضریب تضعیف کل برای نمونه‌ها برحسب انرژی

جدول 3 سطح مقطع حذف نوترون‌های سریع برای نمونه‌های منتخب

Table 3 Fast neutron removal cross section for chosen samples

نمونه‌ها	سطح مقطع حذف نوترون‌های سریع (cm^{-1})
Bi-Gd	1.122
Bi-Ti	1.121
Bi-W	1.131
Bi-Y	1.114
Bi-Zn	1.122
Bi-Zr	1.122

4- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، خواص محافظ گاما کامپوزیت‌های حاوی بیسموت، گادمیم، ایتیریم، تنگستن، تیتانیوم، روی و زیرکونیم، مانند ضریب تضعیف جرمی، ضریب تضعیف خطی، لایه نیم‌مقدار، لایه یک‌دهم مقدار، مسیر آزاد میانگین و کمیت‌های دیگر در محدوده انرژی فوتون 0.015 تا 10 مگا الکترون‌ولت بررسی گردید. نتایج با استفاده از ابزار شبیه‌سازی Geant4 به‌دست آورده شد. این نتایج نشان داد که در انرژی‌های کمتر از 500 کیلو الکترون‌ولت لایه‌های جذب باعث بهتر شدن عملکرد ماده به‌عنوان حفاظ می‌شود و در انرژی‌های بالاتر اثر چگالی در کاهش تابش بهتر خودش را نشان می‌دهد. در واقع، لایه نیم‌مقدار، لایه یک‌دهم مقدار و مقادیر مسیر آزاد میانگین برای کامپوزیت‌های مورد بررسی، نشان داد که با افزایش انرژی فوتون، تضعیف کاهش یافته است. با توجه به استحکام، مقاومت در برابر خوردگی شیمیایی و فیزیکی و شکل‌دهی راحت این کامپوزیت‌ها، می‌توان آنها را در محل‌هایی که محدودیت وزنی، دمایی وجود دارد، در برابر اثرات پرتو گاما و نوترون قرار داد. در پایان، نتایج به‌دست‌آمده را در اشکال مناسب نشان داده و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته شد.

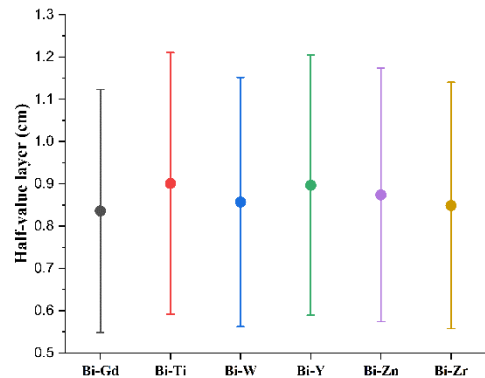


Fig. 5 Half value layer for samples according to energy

شکل 5 لایه نیم‌مقدار برای نمونه‌ها برحسب انرژی

لایه یک‌دهم مقدار که رابطه مستقیمی با میزان ضریب تضعیف خطی دارد. در انرژی‌های کمتر از 100 کیلو الکترون‌ولت ضخامت لایه یک‌دهم مقدار کمتر از 1 سانتی‌متر می‌باشد. با افزایش انرژی و غالب شدن پراکندگی کامپتون (انرژی‌های بیشتر از 100 کیلو الکترون‌ولت تا انرژی 1 مگا الکترون‌ولت) و در انرژی‌های بالاتر (انرژی‌های بیشتر از 1.022 مگا الکترون‌ولت که آستانه تولید زوج است) با غالب شدن پدیده تولید زوج، ضخامت این لایه نیز به‌شدت افزایش می‌یابد (شکل 6).

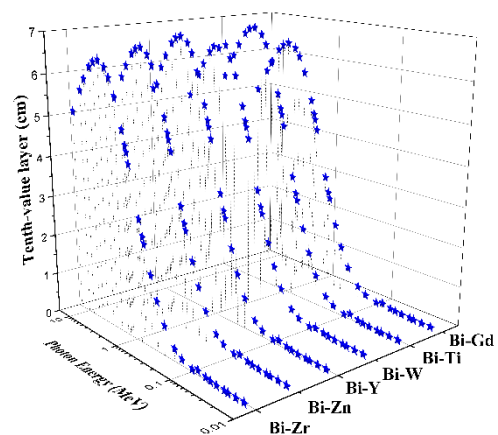


Fig. 6 Tenth value layer for samples according to energy

شکل 6 لایه یک‌دهم مقدار برای نمونه‌ها برحسب انرژی

نسبت پراکندگی کامپتون معیاری از سهم پراکندگی کامپتون در تضعیف کل یک پرتو تابشی در یک ماده است. نسبت پراکندگی کامپتون در انرژی‌های بالاتر و برای مواد با عدد اتمی پایین قابل توجه است. در انرژی‌های پایین‌تر و برای موادی با عدد اتمی بالا، انواع دیگر برهم‌کنش‌ها، مانند جذب فوتوالکتریک، بر تضعیف کل غالب است و کسر پراکندگی کامپتون نسبتاً کوچک است. شکل 7 به‌خوبی نشان می‌دهد که در انرژی 1 کیلو الکترون‌ولت تا 1 میلیون الکترون‌ولت که پراکندگی کامپتون غالب است، میزان این نسبت به‌شدت افزایش می‌یابد.

سطح مقطع حذف نوترون‌های سریع اندازه‌گیری احتمال حذف یک نوترون سریع از یک ماده از طریق واکنش هسته‌ای در واحد طول ماده است. معمولاً در واحد cm^{-1} بیان می‌شود. سطح مقطع حذف نوترون‌های سریع به انرژی نوترون و خواص اتمی و هسته‌ای ماده بستگی دارد. سطح مقطع حذف نوترون‌های سریع یک کمیت مهم در حفاظت در برابر پرتو است. برای

5- مراجع

- [18]. Uthoff, H., Benenati M. J., Katzen, B. T., Peña, C., Gandhi, R., Staub, D. and Scherthner, M., "Lightweight Bilayer Barium Sulfate-Bismuth Oxide Composite thyroid collars for superior radiation protection in fluoroscopy-guided interventions: a prospective randomized controlled trial," *Radiology*, vol. 270, no. 2, pp. 601-606, 2014.
- [19]. Johansen, S., Hauge, I. H. R., Hogg, P., England, A., Lança, L., Gunn, C. and Sanderud, A., "Are Antimony-Bismuth Aprons as Efficient as Lead Rubber Aprons in Providing Shielding against Scattered Radiation," *Journal of Medical Imaging and Radiation Sciences*, vol. 49, no. 2, pp. 201-206, 2018.
- [20]. Bayoumi, E. E., El-Magied, M. O. A., Elshehy, E. A., Atia, B. M., Mahmoud, K. A., Khalil, L. H. and Mohamed, A. A., "Lead-bismuth tungstate composite as a protective barrier against gamma rays," *Materials Chemistry and Physics*, vol. 275, p. 125262, 2022.
- [21]. Zhou, D., Zhang, J. P., Zheng, J., Wu, Y., Zhao, Y. and Zhou, Y., "Co-shielding of neutron and γ -ray with bismuth borate nanoparticles fabricated via a facile sol-gel method," *Inorganic Chemistry Communications*, vol. 77, pp. 55-58, 2017.
- [22]. Sayyed, M. I., Akman, F., Kaçal, and Kumar, A., "Radiation protective qualities of some selected lead and bismuth salts in the wide gamma energy region," *Nuclear Engineering and Technology*, vol. 51, no. 3, pp. 860-866, 2019.
- [23]. Sallam, F. M., Madbouly, O. I., Elalaily A. M., and Ezz-Eldin, N. A., "Physical properties and radiation shielding parameters of bismuth borate glasses doped transition metals," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 843, pp. 156056, 2020.
- [24]. ElSawy, A., "Performance of Nanoparticle Materials on Radiation Shielding Properties Using Mont Carlo Method", *Int. J. Eng. Sci.*, vol. 6, pp. 74-82, 2017.
- [25]. Hassan, H. E., Badran, H. M., Aydarous, A. and Sharshar, T., "Studying the effect of nano lead compounds additives on the concrete shielding properties for γ -rays," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, vol. 360, pp. 81-89, 2015.
- [26]. Rashad, M., Tekin, H. O., Zakaly, H. M. H., Pyshkina, M., Issa, S. A. M. and Süsoy, G., "Physical and nuclear shielding properties of newly synthesized magnesium oxide and zinc oxide nanoparticles," *Nuclear Engineering and Technology*, vol. 52, no. 9, pp. 2078-2084, 2020.
- [27]. Olarinoye, I. O., Alomairy, S., Sriwunkum, C. and Al-Buriah, "Effect of Ag₂O/V₂O₅ substitution on the radiation shielding ability of tellurite glass system via XCOM approach and FLUKA simulations," *Physica Scripta*, vol. 96, no. 6, p. 065308, 2021.
- [28]. Tekin, H. O. and Manıç, T., "Simulations of mass attenuation coefficients for shielding materials using the MCNP-X code," *Nuclear Science and Techniques*, vol. 28, no. 7, 2017.
- [29]. Akman, F., Özkan, İ., Kaçal, Polat, H., Issa, S. A. M., Tekin, H. O. and Açar, O., "Shielding features, to non-ionizing and ionizing photons, of FeCr-based composites," *Applied Radiation and Isotopes*, vol. 167, p. 109470, 2021.
- [30]. Alabsy M. T. and Elzaher M. A., "Radiation shielding performance of metal oxides/EPDM rubber composites using Geant4 simulation and computational study," *Scientific Reports*, vol. 13, no. 1, 2023.
- [31]. More, C. V., Akman, F., Dilsiz, K., Oğul, H. and Pawar, P. P., "Estimation of neutron and gamma-ray attenuation characteristics of some ferrites: Geant4, FLUKA and WinXCom studies," *Applied Radiation and Isotopes*, vol. 197, p. 110803, 2023.
- [32]. Taheri, A., Khandaker, M. U., Moradi, F., Bradley, D., "A review of recent advances in the modeling of nanoparticle radiosensitization with the Geant4-DNA toolkit". *Radiation Physics and Chemistry*, vol. 212, pp. 111146, 2023.
- [33]. Chatzipapas, K., Tran, N. H., Dordevic, M., Zivkovic, S., Zein, S. A., Shin, W., Sakata, D., Lampe, N., Brown, J. M., Ristić-Fira, A., Petrović, I., Kyriakou, I., Emfietzoglou, D., Guatelli, S., Incerti, S., "Simulation of DNA damage using Geant4-DNA: an overview of the molecularDNA example application". *Precision Radiation Oncology*, vol. 7, no. 1, 4-14, 2023.
- [1]. Beyer, T., Bailey, D. L., Birk, U., Buvat, I., Catana, C., Cheng, Z., Fang, Q., Giove, F., Kuntner, C., Laistler, E., Moscato, F., Nekolla, S. G., Rausch, I., Ronen, I., Saarakkala, S., Thielemans, K., Van Elmpt, W. and Moser, E., "Medical Physics and Imaging—A Timely Perspective," *Frontiers in Physics*, vol. 9, pp.1-12, 2021.
- [2]. Hussain, S. T., Mubeen, I., Ullah, N., Shah, S. S. U. D., Khan, B. A., Zahoor, M., Ullah, R., Khan, F. A. and Sultan, M. A., "Modern Diagnostic Imaging Technique Applications and Risk Factors in the Medical field: A review," *BioMed Research International*, vol. 2022, pp. 1-19, 2022.
- [3]. Berger, M., Yang, Q. and Maier, A., "X-ray Imaging," in *Lecture Notes in Computer Science*, pp. 119-145, 2018.
- [4]. Datta, A., Zhong, Z. and Motakef, S., "A new generation of direct X-ray detectors for medical and synchrotron imaging applications," *Scientific Reports*, vol. 10, no. 1, 2020.
- [5]. Kovács, A., Bischoff, P., Haddad, H., Kovács, G., Schaefer, A., Zhou, W. and Pinkawa, M., "Personalized Image-Guided Therapies for Local Malignancies: Interdisciplinary options for interventional radiology and interventional radiotherapy," *Frontiers in Oncology*, vol. 11, 2021.
- [6]. Vaz, P., "Radiological protection, safety and security issues in the industrial and medical applications of radiation sources," *Radiation Physics and Chemistry*, vol. 116, pp. 48-55, 2015.
- [7]. Erdem, M., Baykara, O., Doğru, M. and Kuluöztürk, F., "A novel shielding material prepared from solid waste containing lead for gamma ray," *Radiation Physics and Chemistry*, vol. 79, no. 9, pp. 917-922, 2010.
- [8]. Nambiar, S. and Yeow, J. T. W., "Polymer-Composite materials for radiation protection," *ACS Applied Materials & Interfaces*, vol. 4, no. 11, pp. 5717-5726, 2012.
- [9]. Ahmadi, S.J., Rafiei Sarmazdeh, Z., Zahedi Dizji, S. M., Jafari, S. H., Kasesaz, Y., "Comparison of performance of composite and nanocomposites based on heavy polyethylene and boron nitride for use in neutron shielding". In Persian, *Journal of Nuclear Sciences and Techniques*, vol. 42, no. 3, pp.79-88, 2023.
- [10]. Murki, A., Qasri, M., Murki, Gh., A-Kasai, P., Ahadi, B., Rahmati, A., "Preparation of flexible gamma ray shielding composites based on SBR rubber". In Persian, *Journal of Nuclear Science and Technology*, vol. 41, no. 3, pp. 97-106, 2019.
- [11]. Shirmardi, S.P., Adeli, R., Ahmadi, S. J., Mazinani, S., "Attenuation of high-energy secondary neutron field gamma using a lead-free reinforced composite shield". In Persian, *Journal of Nuclear Science and Technology*, vol. 37, no. 1, pp. 23-29, 2015.
- [12]. Jiang, Y., Guo, W., Yang, H., "Numerical studies on the effective shear modulus of particle reinforced composites with an inhomogeneous inter-phase". *Computational Materials Science*, vol. 43, no. 4, pp. 724-73, 2008.
- [13]. Jiang, Y., Yang, H., Tohgo, K., "Three-phase incremental damage theory of particulate-reinforced composites with a brittle interphase". *Composite Structures*, vol. 93, no. 3, pp. 1136-1142, 2011.
- [14]. Yang, H., Chen, P., Jiang, Y., Tohgo, K., "Incremental damage theory of particulate-reinforced composites with a ductile interphase". *Composite Structures*, vol. 93, no. 10, pp. 2655-2662, 2011.
- [15]. Ye, J., Chu, C., Zhai, Z., Wang, Y., Shi, B., Qiu, Y., "The Interphase Influences on the Particle-Reinforced Composites with Periodic Particle Configuration". *Applied Sciences*, vol. 7, no. 1, pp. 102, 2017.
- [16]. Thumwong, A., Darachai, J. and Saenboonruang, K., "Comparative x-ray shielding properties of Single-Layered and Multi-Layered Bi₂O₃/Nr composites: simulation and numerical studies," *Polymers*, vol. 14, no. 9, p. 1788, 2022.
- [17]. Park, S.-E., Kim, H., Kim, Y., Kim, E. and Seo, Y., "Multilayer-Structured non-lead Metal/Polymer composites for enhanced x-ray shielding," *MRS Advances*, vol. 3, no. 31, pp. 1789-1797, 2018.

- [34]. Motakef Kazemi N., "Preparation and evaluation of bismuth oxide nanoparticles by thermal degradation of metal organic framework". In Persian, Medical Science Journal of Islamic Azad University, Tehran Medical Branch, vol. 31, No. 3, pp. 259-265, 2021.
- [35]. Ghorbankhan, A., Nakhaei, M.R, and Safarpour, P., "Modeling and Optimization of Mechanical Properties of PA6/NBR Nanocomposite Reinforced with Perlite Nanoparticles", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 8, No. 1, pp. 1421-1430, 2021.
- [36]. Soleymani, H., Fereidoon, A., Albooyeh, A., Nakhaei, M. R., "Effect of perlite nanoparticles addition on the mechanical and microstructure properties of PP/NR blend fabricated by melt mixing processing: Optimizing by Response Surface Approach," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 9, No. 4, pp. 2089-2098, 2023.
- [37]. Soleymani, H., Nakhaei, M. R., Naderi, Gh., "Experimental and mathematical investigation of mechanical and microstructural properties of PA6/NBR nanocomposite reinforced with silicon carbide (SiC) nanoparticles," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 8, No. 4, pp.1789-1796, 2022.
- [38]. Taheri-Behrooz, Fathollah. Mahdavezade, S. M. J. and Gholami, M. J., "Micromechanics of stress transfer through the interphase in pull out test of fiber through the resin", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 4, No. 3, pp. 283-294, 2017.
- [39]. Watanabe, A., Phase equilibria in the system $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-Y}_2\text{O}_3$: no possibility of delta- Bi_2O_3 stabilization. Solid State Ionics, Vol.86-88, pp. 1427-1430, 1996.
- [40]. Alipoor, M.R. and Eshghi, M., "Ionizing radiation shielding properties of ceramic fibers using Monte Carlo simulation," In Persian, Journal of The Iranian Ceramic Society, Vol.18, No. 4, pp. 48-56, 2023.
- [41]. Alipoor, M. and Eshghi, M., "Evaluation of carbon-platinum nanotubes in the performance of gamma ray shields". *Nano World*, Vol. 19, No. 72, pp. 1-9, 2023.