د کامپوزیت

جلد 10، شماره 4، صص 2356-2348

نشریه علمی پژوهشی





# شبیهسازی مونتکارلو و تعیین ویژگیهای محافظت پرتو گامای کامپوزیتهای حاوی اکسیدبیسموت و عناصر گادمیم، تیتانیم، تنگستن، زیرکونیم، روی و ایتریوم

محمدرضا على پور <sup>1</sup>، مهدى عشقى<sup>2\*</sup>

۱- دانشجوی دکتری، فیزیک، دانشگاه جامع امام حسین(ع)، تهران.
 2- استادیار فیزیک، مرکز علم و فناوری فیزیک، دانشگاه جامع امام حسین(ع)، تهران.
 \* تهران، صندوق پستی 15461-eshgi54@gmail.com ،meshghi@ihu.ac.ir

چکیدہ
در این پژوهش، استفاده از کامپوزیتهای حاوی اکسید بیسموت با ناخالصی گادمیم، تیتانیم، ایتریوم، تنگستن، زیرکونیم و روی، بهعنوان
ماده حفاظی برای محافظت مؤثر پرداخته شده است. در اینجا، ارزیابی محافظهای 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 توافق 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 بهدلیل عدد اتمی بالای
بیسموت و گادمیم، جذب و تضعیف فوتونهای پرانرژی را با کارایی بالاتری نسبت به سرب داشته و سمیت کمتری دارند. حفاظهای
ترکیب اکسید بیسموت با عنصر گادمیم میتواند بهعنوان جاذب فوتونهای پرانرژی برای مشاغل مختلف حوزه پرتو پزشکی مانند
پزشکان، دندانپزشکان، کارکنان اتاق عمل وکارشناسان رادیولوژی استفاده شود و باعث افرایش سلامت و ایمنی کارکنان گردد.

### 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 Alipoor<sup>1</sup>, Mahdi Eshghi<sup>1</sup>\*

1- Department t of Physics, Imam Hossein Comprehensive University, Tehran, Iran. \* P.O.B. 16987-15461, Tehran, Iran, meshghi@ihu.ac.ir, eshgi54@gmail.com

Keywords	Abstract
Monte Carlo method, Geant4 simulator, Gamma-ray, Neutron, Composites based on bismuth.	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 data extracted from the NIST-XCOM database. 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.

Please cite this article using:

#### برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

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," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 10, No. 4, pp. 2348-2356, 2024. https://doi.org/10.22068/JSTC.2024.2007267.1845

شبیهسازی مونت کارلو و تعیین ویژگیهای محافظت پرتو گامای کامپوزیتهای حاوی اکسیدبیسموت و عناصر گادمیم، ...

#### 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 جبران ناپذیری بر روی انسان و محیطزیست میشود. تشعشعات هستهای مختلف در زمینههای مختلفی مورد استفاده قرار می گیرند 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 یونیزه کننده و قدرت نفوذ بالا فوتونها، قرار گرفتن 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 کامپیوتری<sup>8</sup> 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 [5–2].

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، انعطاف پذیری 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، انعطاف پذیر و موثر در جذب فوتونهای گاما با ترکیب ذرات معدنی و قابل بازیافت مانند سرب یا اکسید سرب در پلیمرها باشند [8-6].

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 [11-9]. یکی از راههای برطرف کردن ضعفهای این کامپوزیتها، استفاده از کامپوزیتهای اصلاح شده بهوسیله ذرات می باشد. این کامپوزیتها، با توجه به سازوکار استحکامی، به دو گروه درشتذره و این کامپوزیتهای با توجه به سازوکار استحکامی، به دو گروه درشتذره و مستحکم شده با ذرات پراکنده، تقسیم می شوند. در کامپوزیتهای درشتذره و فاز اصلاح شده سفت تر از زمینه است. به نحوی که این ذرات، باعث توقف حرکت فاز زمینه در مجاورت خود می شوند. کامپوزیتهای مستحکم شده با درات پراکنده در این کامپوزیتها، اندازه ذرات بین 10 تا 100 نانومتر بوده و برهم کنش بین آنها، در مقیاس اتمی و مولکولی اتفاق می افتد. در این نوع درات پراکنده در این کامپوزیتها، اندازه ذرات بین 10 تا 100 نانومتر بوده و کرمپوزیتها، این عمل باعث افزایش استحکام می شود [21-21].

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 [19–16].

محققان تلاش کردهاند، پُرکنندههای مختلفی را که در کاهش شدت پرتوهای یونیزان موثر هستند، کشف کنند. کامپوزیت تنگستن، بیسموت و سرب توسط بايومي^ و همكاران مورد بررسي قرار گرفتند [20]. گزارشي توسط ژو^ و همكاران مبنى بر كارآمدترين كامپوزيت سەتايى، نانوذرات بورات و بیسموت برای محافظت در برابر پرتو گاما ارائه شد [21]. سید^ و همکاران با روش تولید سُل ژل و کارایی بالای نانومواد با ترکیبات سرب مانند سولفات سرب، كلريد سرب، برميد سرب، يديد سرب و تركيبات بيسموت مانند اكسيد بيسموت كلريد، بيسموت برومايد، بيسموت فلورايد، يديد بيسموت 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 سلام^ و همكاران مورد مطالعه قرار گرفت [23]. پلي دي متيل سيلوكسان^ تقويتشده با اكسيد بيسموت توسط الساوى و همكاران ساخته شد و خواص حرارتی، مکانیکی آنها مورد بررسی قرار گرفت [24]. حسن و همكاران نقش اكسيد بيسموت را در افزايش توانايي محافظ گاما كامپوزيتهاى پليمرى حاوى پلى استر غيراشباع مطالعه كردهاند [25]. عملکرد محافظ فوتونی کامپوزیتهای پلیاستر دوپشده با اکسید بیسموت با کلرید توسط راشد^ و همکاران مورد بررسی قرار گرفت [26]. بسیاری دیگر از تركيبات در قالب بيسموت و اكسيد بيسموت به عنوان اصلاح كننده مورد استفاده و از نظر حفاظ 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، تیتانیم، زیرکونیم، روی و ایتریوم است. به این منظور، از عناصر گادمیم، تنگستن، تیتانیم، زیرکونیم، روی و ایتریوم 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 کلراید<sup>8</sup>، لاستیک متیل وینیل سیلان<sup>^</sup>، پلیاستایرن<sup>^</sup> و پلیاتیلن<sup>^</sup> قابلیت ترکیبشدن را دارند. ترکیبشدن با مواد اشارهشده سبب ایجاد خواص دیگری مانند انعطاف پذیری، وزن کم و کشسانی بیشتر در مواد حفاظی میشود که برای طراحی لباسهای محافظ پرتو و

نشريه علوم و فناورى كامپوزيت

<sup>&</sup>lt;sup>8</sup> Computed tomography (CT)

<sup>8</sup> Bayoumi

<sup>&</sup>lt;sup>8</sup> Zhou

<sup>8</sup> Sayyed 8 Salam

<sup>8</sup> Poly Dimethyl Siloxane

<sup>&</sup>lt;sup>8</sup> ElSawy

<sup>8</sup> Rashad

<sup>&</sup>lt;sup>8</sup> Polyvinyl Chloride (PVC)
8 Di Methyle Thoxyvinyl Silane

<sup>8</sup> Polystyrene

<sup>8</sup> Polyethylene

شبیهسازی مونت کارلو و تعیین ویژگیهای محافظت پرتو گامای کامپوزیتهای حاوی اکسیدبیسموت و عناصر گادمیم، ...

علیپور و عشقی

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 شبيهسازی Geant4 ^

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 می شود. روش های مونت کارلویی دستهای از روشهای محاسباتی هستند که برای بهدست آوردن نتایج عددی بر نمونه گیری تصادفی تکیه می کنند. 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 برهم کنش ذرات با ماده ترکیب می باشد. برای شبیه سازی حفاظت از تشعشع، فرآيندهايي مانند پراكندگي كامپتون، اثر فوتوالكتريك، توليد زوج و برهم کنشهای 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 مىتوانند دادەها را براى مطالعه توزيع دُز تشعشع، شناسايى نقاط حساس تشعشع، ارزيابي اثربخشي محافظ و بهينهسازي طرحهاي محافظ تجزيه و تحلیل کنند. یکی از ویژگیهای اصلی که عبور یک فوتون از ماده را مشخص می کند، انرژی از دست فته فوتون و دادن این انرژی به ذراتی مانند الكترونها مىباشد. اين اثر نتيجه برخورد غيركشسان با الكترونهاى اتمى ماده است. ذرات تولیدشده توسط فرآیند مرحلهای، باعث یونیزهشدن اتمهای ماده هدف می شوند. 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 می توان ضرایب تضعیف را با استفاده از منحنیهای ضريب انتقال از طريق برازش قانون بير-لامبرت بهعنوان تابعى از ضخامت نمونه تعيين كرد [32، 33].

### 2-2- مواد

اثربخشی یک ماده بهعنوان 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 درنظر گرفته شود. اخیراً، از ترفندهای شبیهسازی مونتکارلو برای بررسی نمونههای کامپوزیت مونتاژ شده برای خواص محافظ آنها استفاده شده است.

جهت تکمیل بحث، اشاره میشود که اکسید بیسموت با نماد شیمیایی Bi2O3 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<sup>4</sup> δ، β، γ، δ میباشد. فاز α، که دارای ساختار مونوکلینیک<sup>4</sup> است،

از دمای محیط تا دمای 728 درجه سانتی گراد حالت پایدار دارد با گذر از این دما اکسید بیسموت با یک برهم کنش گرماگیر که موجب تشکیل بلورهایی با ساختار مکعبی با وجوه مرکزی میشود. این ساختار مکعبی، فاز  $\delta$  نامیده می شود که به علت رسانایی یونی زیادی که دارد مورد توجه است. این پلی آمورف از دمای 728 درجه سانتی گراد تا نقطه ذوب آن در حدود 825 درجه سانتی گراد پایدار است و به هنگام سرد شدن تا 650 درجه سانتی گراد در حالت پایدار باقی خواهد ماند. در حین فرآیند تشکیل کامپوزیت لایه ناز کی با ضخامت نانو در میان الیاف و ماتریس تشکیل می شود. که از این فاز بهعنوان فاز میانی و یا لایه میانی نام برده می شود [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 هندسهی نمونه، درصد حجمي الياف و نوع سازوكار اتصالى كه ما بين الياف و ماتريس وجود دارد اشاره نمود. ذكر اين نكته بسيار حائز اهميت است كه 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 لایهی میانی بر عملکرد کلی کامپوزیتها پژوهشهای زیادی انجام شدهاست[37، 38]. اکسید ایتریم 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.

#### 3-2- روابط رياضي

در اینجا، کمیتهای معمول مرتبط، پارامترهای محافظ پایه برای پارامترهای محافظ پرتوگاما بهصورت 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 حاصلجمع ضریب جذب و ضریب پراکندگی است. ضریب جذب نشاندهنده کسری از تابش فرودی است که توسط ماده در واحد طول جذب می شود. بستگی به انرژی تابش و ترکیب اتمی و مولکولی ماده دارد. ضریب پراکندگی نشان دهنده کسری از تابش فرودی است که توسط ماده در واحد طول پراکنده می شود. 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 نشان دهنده احتمال جذب فوتون فرودی در ماده است و باعث می شود 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 الكترون لايه بيرونى است كه باعث پرتابشدن آن و پراكندگى فوتون با انرژى کمتری می شود. این فرآیند همچنین وابسته به انرژی است و در انرژی های فوتون بالاتر قابل توجهتر مىشود. ضريب پراكندگى كشسان نشاندهنده اين احتمال است که فوتون فرودی با الکترونهای اتمی بهصورت منسجم و بدون ایجاد اتلاف انرژی برهم کنش خواهد کرد.

<sup>&</sup>lt;sup>8</sup> Geometry and Tracking 4

<sup>&</sup>lt;sup>8</sup> Poly-Amorphous

<sup>8</sup> Monoclinic

علیپو*ر* و عشقی

Archive of SID.ir

جدول 1 ترکیب شیمیایی و کسر وزن عناصر برای نمونهها

کسر وزن عناصر ٪								چگالی	lau: i	
Zn	Zr	Y	W	Ti	Gd	0	Bi	$(g/cm^3)$	تموتهما	
-	-	-	-	-	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	

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

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. هنگامیکه پراکندگی کشسان درنظر گرفته نمی شود، 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 (Io) بسته به ضخامت ماده (t) و چگالی (g/cm<sup>-3</sup>) کاهش می یابد.

طبق قانون بير-لامبرت، ضريب تضعيف خطى، كميتى است كه توانايي ماده را برای مقاومت در برابر اشعه فرودی توضیح میدهد.

می توان آن را برای فوتون های گاما که از یک نمونه عبور می کنند، نوشت :[40]

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

در جایی که (t (cm) ضخامت نمونهها است، نسبت  $I \ / I_0$  ضریب انتقال در معادله (1) نامیده می شود.

ضریب تضعیف خطی که با نماد  $\mu$  نشان داده می شود، معیاری است که نشان میدهد یک ماده چقدر شدت پرتو تابش را در واحد مسافت طیشده 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 بهسادگی با استفاده از قانون مخلوطها با استفاده از معادله زیر بهدست آورد :[41]

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

که در آن ho، چگالی ماده است،  $W_i$  کسر وزنی عنصر سازنده در نمونه است و  $\mu$  ضریب تضعیف جرمی عنصر مورد استفاده در ترکیب میباشد.

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

با این حال  $\mu$  برای محاسبه این کمیتها بهصورت زیر استفاده می شود  $\mu$ :[41]

$$HVL(cm) = \frac{\ln\left(2\right)}{\mu} \tag{3}$$

لایه یکدهم مقدار (TVL) بهعنوان ضخامت ماده موردنیاز برای کاهش شدت پرتو تابش به یکدهم مقدار اولیه آن تعریف می شود. 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 يرتويي استفاده مي شود.

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

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

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

#### 3- نتايج و بحث

همانطور که در شکل 1 مشاهده می شود در انرژی های کمتر از 1 مگا الكترونولت پديده غالب فوتوالكتريك بوده و با افزايش انرژى فوتونها ميزان این پدیده نیز کاهش مییابد. پراکندگی کشسان در انرژیهای کمتر از 500 کیلو الکترونولت قابل توجه است و پراکندگی ناکشسان تا انرژی 10 مگا الكترونولت وجود دارد و باعث كاهش انرژی فوتونهای فرودی می شود. پديده توليد زوج نيز با افزايش انرژي، بهميزان انرژي آستانه توليد زوج الکترون، پوزیترون خودش را نشان میدهد و در انرژیهای بالاتر از 1 مگا الكترونولت پديده غالب مي باشد. در نهايت، ضريب تضعيف كل نيز 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.

شبیه سازی مونت کارلو و تعیین ویژگیهای محافظت پرتو گامای کامپوزیت های حاوی اکسیدبیسموت و عناصر گادمیم، ...





شکل 1 ضریب تضعیف کل برای نمونهها بر حسب انرژی

همچنین دادههای پایگاه XCOM نیز برای اعتبارسنجی دادههای حاصل از شبیهسازی استخراج شد. نتایج بهدستآمده از رابطه 5 در جدول 2 شرح داده شده است. درصد انحراف بین نتایج حاصل از ابزار شبیهسازی Geant4 و دادههای مستخرج از پایگاه XCOM برای ترکیبهای مورد بررسی در محدوده 0.04 تا 2 درصد بود. این نتایج نشان میدهد، مقادیر ضریب تضعیف شبیهسازی شده توسط ابزار شبیهسازی Geant4 برای ترکیبهای مورد بررسی بسیار نزدیک به دادههای تجربی برنامه XCOM است و باهم توافق دارند.

در ناحیه انرژی اول (انرژیهای کمتر از 100 کیلو الکترونولت)، نتایج بهدست آمده ضریب تضعیف جرمی نمونههای انتخابی با افزایش انرژی فوتون بسیار سریع کاهش مییابد و قلههای ناشی از اثر فوتوالکتریک اطراف لبههای جذب M و K عنصر بیسموت، گادمیم، تیتانیم، زیرکونیم، روی، تنگستن، ایتریم است.

همان طور که در شکل 3 مشاهده می شود، گادمیم و تنگستن وقتی با اکسید بیسموت ترکیب می شوند، نسبت به سایر ترکیبات ضریب تضعیف بالاتری دارند و بهتر می توانند پر توهای گاما را جذب یا تضعیف کنند. در نزدیکی انرژی 100 کیلو الکترونولت 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 برحسب انرژی برای نمونههای منتخب



Fig. 3 Linear attenuation coefficient for samples according to energy  $% \left[ {{{\mathbf{F}}_{i}}_{i}} \right]$ 

**شکل 3** ضریب تضعیف خطی برای نمونهها برحسب انرژی

مسیر آزاد میانگین اندازه گیری میانگین مسافت طیشده توسط یک ذره یا فوتون بین برخوردهای متوالی با سایر ذرات یا اتهها در یک ماده است. در شکل 4 مشاهده میشود که در انرژیهای پایین پرتو بیشتر میتوانند با ماده هدف برهم کنش کند و ترکیبات مسافت آزاد کمتری در این انرژیها دارند. با افزایش انرژی میزان برهم کنش پرتو با ماده هدف کاهشیافته و مسافت آزاد میانگین نیز افزایش مییابد. تیتانیم به طور میانگین مسافت بیشتری را در هدف طی میکند و نسبت به سایر ترکیبات عملکرد ضعیفتری برای کاهش شدت پرتوهای گاما دارد.

در شکل 5 میانگین ضخامت در طول انرژی 150 کیلو الکترونولت تا 1.5 مگا الکترونولت را مشاهده می کنید. در این بازه انرژی میزان کمترین ضخامت لایه نیممقدار 5 میلیمتر و بیشترین مقدار آن 1.2 سانتیمتر میباشد. کاملاً واضح است که هر چقدر طول بازه ضخامت کمتر باشد، مقدار میانگین عدد کمتری را نسبت به دیگران خواهد داشت، که این مقدار میانگین نماد دایره بر روی هر نمودار مشخص شده است. گادمیم 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 نمونههای منتخب

نشريه علوم و فناوري كامپوزيت

علیپو*ر* و عشقی

شبیهسازی مونت کارلو و تعیین ویژگیهای محافظت پرتو گامای کامپوزیتهای حاوی اکسیدبیسموت و عناصر گادمیم، ...

leV)		Bi-Gd Bi-Ti Bi-W Bi-Y						Bi-Zn	Bi-Zr									
Energy (M	Geant4	XCoM	RD%	Geant4	XCoM	RD%	Geant4	XCoM	RD%	Geant4	XCoM	RD%	Geant4	XCoM	RD%	Geant4	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

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

**جدول 2** مقادیر محاسبه شده ضریب تضعیف جرمی برای نمونههای منتخب

شبیهسازی مونت کارلو و تعیین ویژگیهای محافظت پر تو گامای کامپوزیتهای حاوی اکسیدبیسموت و عناصر گادمیم، ...



Fig. 5 Half value layer for samples according to energy شکل 5 لایه نیم،مقدار 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 غالبشدن پراکندگی کامپتون (انرژیهای بیشتر از 100 کیلو الکترونولت تا انرژی 1 مگا الکترونولت که آستانه تولید زوج است) با غالبشدن 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 یک دهم 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 پایین تر و برای موادی با عدد اتمی بالا، انواع دیگر برهم کنشها، مانند جذب فوتوالکتریک، بر تضعیف کل غالب است و کسر پراکندگی کامپتون نسبتاً کوچک است. شکل 7 به خوبی نشان میدهد در انرژی 1 کیلو الکترونولت تا 1 میلیون الکترونولت که پراکندگی کامپتون غالب است، میزان این نسبت به شدت افزایش می یابد.

سطح مقطع حذف نوترونهای سریع اندازه گیری احتمال حذف یک نوترون سریع از یک ماده از طریق واکنش هستهای در واحد طول ماده است. معمولاً در واحد <sup>1-</sup>cm 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

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 کنند.



**Fig. 7** Ratios ( $\mu_{Compton}/\mu_{total}$ ) for samples according to energy شکل 7 نسبت ضریب تضعیف پراکندگی کامپتون به ضریب تضعیف کل برای نمونهها برحسب انرژی

ل 3 سطح مقطع حذف نوترونهای سریع برای نمونههای منتخب	عدوا
<b>Cable 3</b> Fast neutron removal cross section for chosen samples	

سطح مقطع حذف نوترونهای سریع ( <sup>1</sup> -cm)	نمونهها
1.122	Bi-Gd
1.121	Bi-Ti
1.131	Bi-W
1.114	Bi-Y
1.122	Bi-Zn
1.122	Bi-Zr

#### 4- نتيجەگيرى

در این تحقیق، خواص محافظ گاما کامپوزیتهای حاوی بیسموت، گادمیم، ایتریم، تنگستن، تیتانیم، روی و زیرکونیم، مانند ضریب تضعیف جرمی، ضریب تضعیف خطی، لایه نیممقدار، لایه یک دهم مقدار، مسیر آزاد میانگین و کمیتهای دیگر در محدوده انرژی فوتون 20.00 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 لبههای جذب باعث بهترشدن عملکرد ماده بهعنوان حفاظ میشود و در انرژیهای بالاتر اثر چگالی در کاهش تابش بهتر خودش را نشان میدهد. در واقع، لایه نیممقدار، لایه یک دهم 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 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 نتایج بهدستآمده را در اشکال مناسب نشان داده و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته شد.

علیپور و عشقی

- [18]. Uthoff, H., Benenati M. J., Katzen, B. T., Peña, C., Gandhi, R., Staub, D. and Schernthaner, 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., "Leadbismuth 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., Tekın. 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-Buriahi, "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]. Tekın, H. O. and Manıcı, 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., Tekın, H. O. and Ağar, 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.

 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.

5- مراجع

- [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 Malignencies: 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 Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/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-leaded Metal/Polymer composites for enhanced xray shielding," MRS Advances, vol. 3, no. 31, pp. 1789–1797, 2018.

Archive of SID.ir

#### 2355

نشريه علوم و فناورى كامپوزيت

علىپور و عشقى

- [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. Mahdavizade, 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 Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: no possibility of delta-Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 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.

2356