



بررسی مشخصات حفاظ پرتوی گاما با افزایش غلظت TiO_2 در نمونه شیشه‌ای $Bi_2O_3-ZnO-Pb_3O_4-Al_2O_3$ با ابزارهای شبیه‌سازی و محاسباتی

علی اروانه، علی اسدی*، سید ابوالفضل حسینی

دانشکده مهندسی انرژی، دانشگاه صنعتی شریف، صندوق پستی: ۱۴۵۶۵-۱۱۱۴، تهران - ایران

*Email: aliasadi.mr@gmail.com

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۵/۶ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۱۰/۳

چکیده

در این مطالعه ما با استفاده از کد مونت کارلو MCNP خواص حفاظت در برابر اشعه گاما سیستم شیشه‌ای با ترکیب $xTiO_2 - (55-x)Bi_2O_3 - 15Pb_3O_4 - 20Al_2O_3 - 10ZnO$ را با محاسبه چندین پارامتر مربوط به تضعیف فوتون مانند لایه نیم‌جذب (HVL)، پوشش آزاد میانگین (MFP)، ضریب تضعیف جرمی (μ_m)، عدد اتمی مؤثر (Z_{eff}) و ضریب انباشت (BF) برای سطوح مختلف انرژی در محدوده ۱۵۰۰-۱۰۰ keV بررسی کردیم. برای تأیید نتایج شبیه‌سازی، نتایج حاصل از شبیه‌سازی با داده‌های مستخرج از پایگاه داده XCOM مقایسه شد. مشاهده شد که داده‌های مستخرج از پایگاه NIST-XCOM و نتایج کد کامپیوتری MCNP توافق خوبی با یکدیگر دارند. درصد انحراف (PD) بین داده‌های مستخرج از پایگاه NIST-XCOM و نتایج حاصل از کد کامپیوتری MCNP در بیش‌تر موارد کم‌تر از ۰/۵۹ درصد بود. نتایج نشان می‌دهد که در مقایسه با مواد حفاظ مرسوم مانند بتن و سرب، ترکیب جدید پارامترهای تضعیف مؤثرتری را علاوه بر خواص فیزیکی نشان می‌دهد. شیشه با بالاترین غلظت TiO_2 از نظر چگالی مطلوب‌ترین حالت را در مقایسه با مواد حفاظ بررسی شده دارد. در این مطالعه از یکی از روش‌های کاهش واریانس برای کاهش خطای محاسبات MCNP استفاده شد. توافق بین داده‌های مستخرج از پایگاه NIST-XCOM و نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های این مطالعه نشان می‌دهد که مدل‌سازی مونت کارلو یک روش خوب جهت بررسی مشخصات حفاظ پرتوی گاما می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: اشعه گاما، ضریب انباشت، کد MCNP و پایگاه داده XCOM، پارامترهای تضعیف مواد حفاظ

Examining the specification of gamma-ray shielding with increasing TiO_2 concentration in the $Bi_2O_3-ZnO-Pb_3O_4-Al_2O_3$ glass sample with simulation and computational tools

A. Arvaneh, A. Asadi*, S.A. Hosseini

Department of Energy Engineering, Sharif University of Technology, P.O.BOX: 1114-14565, Tehran - Iran

Research Article

Received 28.7.2022, Accepted 24.12.2022

Abstract

In this study, using the MCNP Monte Carlo code, the gamma-ray protection properties of the glass system with the composition of $(55-x)Bi_2O_3-15Pb_3O_4-20Al_2O_3-10ZnO-xTiO_2$ with certain concentrations (35, 30, 25, 20, 15, 10, 5 = mol percent) were examined by calculating the several parameters related to photon attenuation such as half-value layer (HVL), mean free path (MFP), mass attenuation coefficient (μ_m), effective atomic number (Z_{eff}) and buildup factor (BF) for different energies in the range of 1500-100 keV. To verify the simulation results, a comparison was made with the XCOM database. It was observed that the data extracted from the NIST-XCOM database and the MCNP simulation results are in reasonable agreement with each other. The percentage deviation (PD) between the data extracted from the NIST-XCOM database and the results obtained from the MCNP simulations was less than 0.59% in most cases. The results show that compared to conventional protective materials such as concrete and lead, the new composition shows more effective attenuation parameters in addition to physical properties. The glass with the highest concentration of TiO_2 has the most favorable properties in terms of density compared to the investigated protective materials. In this study, one of the variance reduction methods was used in order to reduce the error in MCNP calculations. The agreement between the data extracted from the NIST-XCOM database and the results of the simulations of this study shows that Monte Carlo modeling is an effective method to investigate gamma-ray shielding characteristics.

Keywords: Gamma-ray, Buildup factor, MCNP code and the XCOM database, Attenuation parameters Shielding materials



۱. مقدمه

تشعشعات هسته‌ای در تشخیص سرطان، پرتودرمانی، تولید برق، زمینه‌های صنعتی و همچنین در تشخیص ترکیب‌های لوله‌ها و بسیاری از موارد دیگر استفاده می‌شود [۱]. بنابراین در تمامی فعالیت‌های هسته‌ای موضوع ایمنی هسته‌ای مورد توجه قرار می‌گیرد. از این‌رو ساخت حفاظ‌های مقاوم در برابر اشعه برای انتقال منابع رادیواکتیو و رعایت اصول حفاظت در برابر تأثیرات مخرب و بیولوژیکی تشعشع از اهمیت بالایی برخوردار است [۲-۴]. طبق اصل ۱ ALARA، به طور کلی برای محافظت در برابر تشعشعات، می‌توان با استفاده از یک یا دو روش محافظت هم‌زمان، تشعشعات را کنترل کرد که عبارتند از: افزایش فاصله جسم محافظت شده از منبع تشعشع، کاهش مدت تابش و استفاده از حفاظ‌هایی که می‌توانند از نفوذ اشعه به مناطق حفاظت شده جلوگیری کنند [۵-۸]. به دلیل تغییر شرایط و نیاز به افراد یا وسایل در محیط‌های خاص، همیشه نمی‌توان به موارد اول و دوم توجه کرد، اما مورد سوم که موضوع اصلی این مطالعه است، می‌تواند بازدارنده باشد. بنابراین طراحی یک حفاظ مناسب برای کاهش پرتوگیری کارکنان ضروری است [۹-۱۲]. در سال‌های اخیر بهترین انتخاب برای محافظت در برابر اشعه گاما سرب و بتن بوده است. اما سرب یک ماده سمی است که استفاده از آن به طور فزاینده‌ای محدود می‌شود. با این حال، مواد سنتی دو مشکل اصلی دارند: مات بودن و حمل و نقل دشوار. در نتیجه جاذب‌های غیرسربی انعطاف‌پذیر برای محافظت از پرتوها ساخته می‌شوند. کامپوزیت‌ها به دلیل مشخصات مکانیکی عالی، سبکی، مقاومت در برابر خوردگی عالی و سهولت کار [۶، ۱۲]، معمولاً انتخاب ایده‌آلی هستند که می‌توانند جایگزین مناسبی برای مواد معمولی باشند. برخی از محققان تلاش کرده‌اند تا مشخصات حفاظت در برابر پرتو گاما حفاظ‌های کامپوزیتی را شبیه‌سازی کنند. برخی از این تحقیقات در ادامه بیان شده و به اختصار در مورد آن‌ها توضیحاتی ارائه می‌شود:

۱. آگار و همکاران [۱۱]، از نمونه شیشه‌های مختلف با ترکیب $(1-x)Nb_2O_5 \cdot 75TeO_2 - 10ZnO - (x)Er_2O_3 - 5Li_2O$ با غلظت‌های مختلف (x = 0, 0,5, 1, 1,5, 2, 2,8) درصد مول) برای مطالعه نحوه عملکرد تضعیف فوتون و نوترون استفاده کردند. برخی از پارامترهای تضعیف فوتون مانند لایه نیم‌جذب^۲ (HVL)، لایه یک‌دهم جذب^۳ (TVL)، پویش آزاد میانگین^۴ (MFP)، ضریب تضعیف جرمی^۵ (μ_m)، عدد

اتمی مؤثر^۶ (Z_{eff}) و ضریب انباشت^۷ (BF) و موارد دیگر محاسبه شدند. نتایج حاصل از کد مونت کارلو MCNP^۸ با داده‌های مستخرج از پایگاه NIST^۹-XCOM [۱۳] مقایسه و تطبیق داده شدند. نتایج نشان داد که با جایگزین کردن جزء محدودی از Er_2O_3 با Nb_2O_5 در سیستم شیشه‌ای $(1-x) Nb_2O_5 - 75TeO_2 - 10ZnO - (x) Er_2O_3 - 5Li_2O$ مشخصه‌های تضعیف نوترون و فوتون را افزایش می‌دهد.

۲. ابوحاسوا و همکارانش [۱۴]، مطالعه‌ای با نمونه شیشه‌ای حاوی $(55-x) B_2O_3 + 20Na_2O + 20SrF_2 + 5 Bi_2O_3 + x Ag_2O$ با غلظت‌های مختلف (x = 0, 1, 2, 4) درصد مول) انجام دادند. از اثر جایگزینی B_2O_3 با Ag_2O برای دستیابی به ظرفیت مکانیکی، عملکرد نوری، فیزیکی و حفاظ پرتو گاما استفاده شد. جذب نوری اندازه‌گیری شد و تأثیر جایگزینی B_2O_3 بر ظرفیت تضعیف پرتوی گاما حفاظ با استفاده از کد کامپیوتری MCNP شبیه‌سازی و ارزیابی شد. نتایج نشان داد که جایگزینی B_2O_3 باعث افزایش قابل توجه پارامترهای حفاظ مانند قابلیت‌های حفاظ پرتوی گاما و ضریب تضعیف خطی می‌شود. مطلوب‌ترین مشخصات حفاظ تشعشع گاما برای نمونه‌هایی با ترکیبات چهار مول درصد Ag_2O به دست آمد.

۳. رامه و همکارانش [۱۵]، بر روی تأثیر TiO_2 بر ویژگی‌های حفاظ اشعه گاما شیشه $60B_2O_3 - 10Na_2O - 20TeO_2 - (10-x) CaO + xTiO_2$ این مطالعه اثر غلظت TiO_2 بر خواص دمایی انتقال شیشه‌ای (T_g) و دمایی تبلور (T_c) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که افزودن غلظت کمی از TiO_2 منجر به تغییرات T_c و T_g می‌شود.

در ادامه مطالعات قبلی برای شبیه‌سازی و اعتبارسنجی عملکرد حفاظ پرتو گاما نمونه‌های کامپوزیت، هدف این مطالعه، بررسی عملکرد یک محافظ گاما کامپوزیت جدید متشکل از عناصر Pb, Zn, Al, Bi و Ti است. به این منظور، برای سیستم شیشه‌ای با ترکیب $(55-x)Bi_2O_3 - 15PbO_2 - 20Al_2O_3 - 10ZnO - xTiO_2$ با غلظت‌های مشخص (x = 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35) درصد مول)، پارامترهای تضعیف حفاظ پرتو گاما مانند MFP، HVL، μ_m ، Z_{eff} و BF برای سطوح مختلف انرژی در محدوده 100-1500 keV از طریق شبیه‌سازی MC محاسبه شده و نتایج حاصل از کد MCNP با داده‌های مستخرج از پایگاه XCOM مقایسه خواهند شد.

5. Mass Attenuation Coefficient
6. Effective Atomic Number
7. Buildup Factor
8. Monte Carlo N-Particle Transport Code
9. National Institute of Standards and Technology
Journal of Nuclear Science and Technology

1. As Low As Reasonably Achievable
2. Half Value Layer
3. Tenth Value Layer
4. Mean Free Path



۲. مواد و روش

۱.۲ هندسه و تالی

در مطالعه حاضر، هندسه مکعبی برای نمونه‌های شیشه‌ای با ترکیب $Bi_2O_3 - PbO - Al_2O_3 - ZnO - TiO_2$ انتخاب شد. ارتفاع و طول این حفاظ مکعبی 10×10 سانتی‌متر در نظر گرفته شده است و پارامترهای تضعیف فوتون در ضخامت‌های مختلف برای هر نمونه محاسبه شده است. تالی F_2 برای به دست آوردن داده‌های شبیه‌سازی کد کامپیوتری MCNPX به همراه کتابخانه‌های ENDF استفاده شد. این تالی شار متوسط روی سطح را برای یک پرتوی گاما که وارد انتهای حفاظ می‌شود محاسبه می‌کند [۱۶-۱۸].

۲.۲ مشخصات منبع

برای محاسبه پارامترهای تضعیف نمونه‌های شیشه‌ای، از یک چشمه نقطه‌ای همسانگرد تک انرژی پرتو گاما استفاده شد. چشمه نقطه‌ای در 10 سانتی‌متری سیستم شیشه‌ای قرار گرفت، جایی که پرتو گامای فرودی به طور یکنواخت و عمودی به سطح جلوی حفاظ برخورد کرد (شکل ۱). در کد کامپیوتری MCNP، این چشمه توسط کارت داده با دستور PAR.ERG، POS، DIR و VEC به ترتیب برای انرژی، نوع ذره، موقعیت، جهت و بردار مشخص می‌شود.

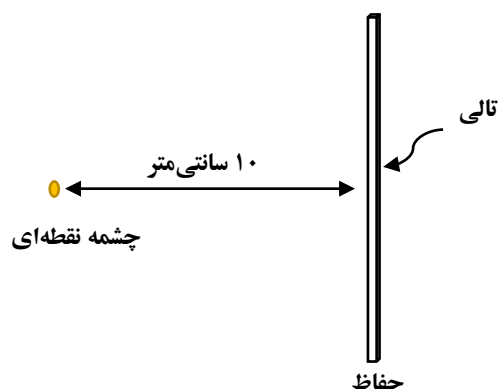
۳.۲ کاهش واریانس

کارایی یک کد MC به پارامترهای سرعت و دقت (واریانس) در محاسبه پاسخ بستگی دارد. روش‌های مختلفی برای کاهش واریانس نتایج وجود دارد که هدف آن‌ها بهبود عملکرد محاسبات MC و کاهش زمان لازم برای دستیابی به دقت است. در این مطالعه از روش تقسیم هندسه با رولت روسی برای

کاهش واریانس استفاده کردیم. در این روش هندسه مکعبی به چند ناحیه یا سلول تقسیم می‌شود و با حرکت به سمت ناحیه مورد نظر بر اهمیت آن ناحیه افزوده می‌شود. به طوری که نسبت اهمیت سلول‌ها متوالی به یک‌دیگر بین ۲ تا ۴ تغییر کرد، طول سلول‌ها به اندازه دو برابر پویش آزاد میانگین در نظر گرفته شد و در نواحی خلأ تقسیم ذرات اعمال نشد [۱۹].

۴.۲ مشخصات مواد سیستم شیشه‌ای

ترکیب نمونه‌های شیشه‌ای حاوی عناصر شیمیایی که به عنوان حفاظ استفاده می‌شود بیش‌تر به نسبت مخلوط و ترکیب شیمیایی مواد استفاده بستگی دارد. نمونه شیشه‌ای ترکیب با $(55-x) Bi_2O_3 - 15PbO - 20Al_2O_3 - 10ZnO - x TiO_2$ ، با نسبت‌های مختلف (۳۵، ۳۰، ۲۵، ۲۰، ۱۵، ۱۰، ۵، $x=0$) درصد (مول) در نظر گرفته شد. درصد وزنی عناصر و چگالی استفاده شده در هر نمونه در کارت مواد کد کامپیوتری MCNP به ترتیب در جدول‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است.



شکل ۱. شماتیکی از هندسه مدل شده.

جدول ۱. درصد مول عنصر شیمیایی مورد استفاده در سیستم شیشه‌ای $Bi_2O_3 - PbO - Al_2O_3 - ZnO - TiO_2$

Zn	Pb	Bi	Al	O	Ti	نمونه شیشه
۰.۱۶۷۷۲	۰.۲۴۰۳۵۶	۰.۵۹۳۲۱۳	۰.۲۷۸۶۷	۰.۱۲۱۷۹۰	۰	C_1
۰.۱۷۶۵۱	۰.۲۵۲۹۵۳	۰.۵۶۷۵۴۹	۰.۲۹۳۲۷	۰.۱۲۶۰۰۱	۰.۰۰۶۵۱۷	C_2
۰.۱۸۶۲۷	۰.۲۶۶۹۴۳	۰.۵۳۹۰۴۵	۰.۳۰۴۹۹	۰.۱۳۰۶۷۷	۰.۰۱۳۷۵۵	C_3
۰.۱۹۷۱۷	۰.۲۸۲۵۷۲	۰.۵۰۷۲۰۴	۰.۳۲۷۶۲	۰.۱۳۵۹۰۱	۰.۰۲۱۸۴۱	C_4
۰.۲۰۹۴۴	۰.۳۰۰۱۴۴	۰.۴۷۱۴۰۳	۰.۳۴۷۹۹	۰.۱۴۱۷۷۵	۰.۰۳۰۹۳۲	C_5
۰.۲۲۳۳۲	۰.۳۲۰۰۴۸	۰.۴۳۰۸۵۳	۰.۳۷۱۰۷	۰.۱۴۸۴۲۸	۰.۰۴۱۲۳۰	C_6
۰.۲۳۹۱۹	۰.۳۴۲۷۷۸	۰.۳۸۴۵۴۴	۰.۳۹۷۴۲	۰.۱۵۶۰۲۵	۰.۰۵۲۲۹۸	C_7
۰.۲۵۷۴۷	۰.۳۶۸۹۸۳	۰.۳۳۱۱۵۴	۰.۴۲۷۸۰	۰.۱۶۴۷۸۵	۰.۰۶۶۵۴۷	C_8



جدول ۲. چگالی نمونه‌های شیشه‌ای و ترکیب‌ها

چگالی (g/cm ^۳)	نمونه ترکیب	نمونه شیشه‌ای
۴٫۹۶	۵۵Bi _۲ O _۳ +۱۵Pb _۲ O _۴ +۲۰Al _۲ O _۳ +۱۰ZnO	C _۱
۴٫۸۶	۵۰Bi _۲ O _۳ +۱۵Pb _۲ O _۴ +۲۰Al _۲ O _۳ +۱۰ZnO+۵TiO _۲	C _۲
۴٫۷۵	۴۵Bi _۲ O _۳ +۱۵Pb _۲ O _۴ +۲۰Al _۲ O _۳ +۱۰ZnO+۱۰TiO _۲	C _۳
۴٫۶۳	۴۰Bi _۲ O _۳ +۱۵Pb _۲ O _۴ +۲۰Al _۲ O _۳ +۱۰ZnO+۱۵TiO _۲	C _۴
۴٫۵	۳۵Bi _۲ O _۳ +۱۵Pb _۲ O _۴ +۲۰Al _۲ O _۳ +۱۰ZnO+۲۰TiO _۲	C _۵
۴٫۳۷	۳۰Bi _۲ O _۳ +۱۵Pb _۲ O _۴ +۲۰Al _۲ O _۳ +۱۰ZnO+۲۵TiO _۲	C _۶
۴٫۲۳	۲۵Bi _۲ O _۳ +۱۵Pb _۲ O _۴ +۲۰Al _۲ O _۳ +۱۰ZnO+۳۰TiO _۲	C _۷
۴٫۰۸	۲۰Bi _۲ O _۳ +۱۵Pb _۲ O _۴ +۲۰Al _۲ O _۳ +۱۰ZnO+۳۵TiO _۲	C _۸

۵.۲ مبانی نظری

در این مطالعه، فاکتورهای تضعیف مختلفی مانند HVL، MFP، μ_m ، Z_{eff} و BF نمونه شیشه‌ای $Bi_2O_3 - PbO_2 - Al_2O_3 - ZnO - TiO_2$ کامپیوتری MCNP برای پرتوهای گاما با انرژی‌های ۱۰۰، ۳۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ کیلو الکترون ولت برای تعیین اثر Ti_2O بر روی عملکرد حفاظ پرتو گاما مورد بررسی قرار گرفت. تضعیف پرتو گاما در ضخامت و هر قسمت از ماده به شدت پرتو در آن نقطه و ضخامت ماده بستگی دارد که برابر با معادله ۱ است [۲۰، ۱۷، ۱۶].

$$I = I_0 \exp(-\mu_1 x) \quad (۱)$$

در این رابطه I_0 شدت پرتو فرودی، I شدت پرتو عبوری، x ضخامت حفاظ و μ_1 ضریب تضعیف خطی است. اثر تضعیف کلی از یک نوع ماده خاص را می‌توان با ذکر ضریب تضعیف جرمی که فقط به نوع ماده بستگی دارد، همراه با چگالی ماده و ضخامت آن توصیف کرد. این کمیت مجموع احتمالات برهم‌کنش فوتوالکتریک، تولید زوج، کامپتون و موارد دیگر با الکترون‌های ماده است که رابطه ۱ به صورت رابطه ۲ بازنویسی می‌شود [۱۸].

$$I = I_0 \exp(-\mu_m \rho x) \quad (۲)$$

از این نظر ρ چگالی ماده و μ_m ضریب تضعیف جرمی است که طبق رابطه ۲ از رابطه ۳ به دست می‌آید [۲۰].

$$\mu_m = \frac{1}{\rho x} \ln\left(\frac{I_0}{I}\right) \quad (۳)$$

رابطه بالا فقط در شرایطی برقرار است که هر فوتون که با حفاظ وارد اندرکنش می‌شود از حفاظ خارج خواهد شد. اما در شرایطی که فوتون پس از پراکندگی‌های متعدد از حفاظ خارج

شود رابطه (۳) صادق نیست و از رابطه (۴) به عنوان تضعیف پرتوی گاما استفاده می‌شود. در نتیجه، ضریب انباشت به عنوان یک ضریب (B) وارد رابطه تضعیف فوتون می‌شود و رابطه ۲ به صورت رابطه ۴ بازنویسی می‌شود [۲۱]. ضریب انباشت یک ضریب تصحیح است که تأثیر تابش پراکنده به اضافه ذرات ثانویه در محیط را در طول محاسبات حفاظ در نظر می‌گیرد [۲۲].

$$I = BI_0 \exp(-\mu_m \rho x) \quad (۴)$$

یکی دیگر از پارامترهای مهم در حفاظ پرتوی گاما MFP می‌باشد که یک روش جایگزین برای بیان قانون تضعیف نمایی است که در رابطه ۵ توضیح داده شده است. λ به عنوان طول تضعیف یا پویش آزاد میانگین مشخص می‌شود که به عنوان میانگین فاصله‌ای که یک فوتون قبل از جذب طی می‌کند شناخته می‌شود [۱۸، ۲۳].

$$\lambda = \frac{\int_0^{\infty} x \exp(-\mu x) dx}{\int_0^{\infty} \exp(-\mu x) dx} = \frac{1}{\mu} \quad (۵)$$

علاوه بر این پارامتر دیگری مانند HVL نیز به بررسی عملکرد حفاظت از تابش هر ماده کمک می‌کند که در رابطه ۶ نشان داده شده است [۱۵، ۱۸، ۲۴].

$$hvl = \frac{\ln 2}{\mu} \quad (۶)$$

هم‌چنین Z_{eff} عامل دیگری است که به انرژی فوتون فرودی و ساختار اتمی ماده‌ی پراکننده بستگی دارد که توضیح خوبی از اندرکنش‌های فوتون و تضعیف ارائه می‌دهد [۲۰، ۲۴، ۲۵].



MCNP و XCOM استفاده کردیم. ضریب همبستگی با MCNP (r = ۰٫۹۹۹۷) نشان می‌دهد که نتایج حاصل از کد MCNP با داده‌های مستخرج از پایگاه XCOM مقایسه شده توافق دارد.

۲.۳ ویژگی‌های حفاظت در برابر تشعشع سیستم $TiO_2 - Bi_2O_3 - ZnO - Pb_3O_4 - Al_2O_3$

بهترین معادله برازش شده برای نمونه‌های شیشه‌ای با ترکیبات مختلف در جدول ۴ نشان داده شده است. تغییر μ_m در برابر انرژی پرتو گاما یک تابع نمایی مرتبه اول می‌باشد. این معادلات می‌توانند مقادیر μ_m از کامپوزیت‌های $C_1 - C_8$ در این مطالعه را با انرژی‌های بین ۱۰۰ تا ۱۵۰۰ keV تولید کنند. به عنوان مثال، همان‌طور که در جدول ۴ نشان داده شده است، معادله محاسبه شده با مقادیر انرژی هدفمند (محدوده درمانی) آورده شده است و مقادیر μ_m از معادلات برازش شده به دست می‌آیند. برای اعتبارسنجی این معادلات، PD بین نتایج حاصل از کد MCNP و خروجی داده‌های معادله برازش یافته محاسبه شد. خروجی داده‌های معادله برازش یافته و نتایج شبیه‌سازی MCNP در همه انرژی‌ها مطابقت دارد. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که این معادلات برای تخمین سریع و بدون مشکل μ_m سیستم شیشه‌ای با ترکیب $TiO_2 - Bi_2O_3 - Pb_3O_4 - Al_2O_3 - ZnO$ در انرژی‌های بین ۱۰۰ تا ۱۵۰۰ keV مناسب هستند. همان‌طور که گفته شد، عملکرد حفاظت در برابر تشعشع را می‌توان با پارامترهای MFP، HVL و Z_{eff} بررسی کرد، بنابراین موارد فوق برای سیستم شیشه‌ای $TiO_2 - Bi_2O_3 - Pb_3O_4 - Al_2O_3 - ZnO$ مشخص شد. تغییرات پارامترهای MFP و HVL در مقابل انرژی برای نمونه‌های شیشه‌ای متنوع به ترتیب در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقادیر HVL و MFP در برابر انرژی فوتون افزایش می‌یابد. براین اساس فوتون‌هایی که انرژی بیشتری نسبت به سایر فوتون‌ها دارند در نمونه‌های مورد مطالعه از قدرت نفوذ بالاتری برخوردارند که از نظر فیزیکی با آنچه در نمودار ضریب تضعیف مشاهده می‌شود مطابقت دارد. همچنین، مقادیر MFP و HVL با افزایش چگالی نمونه‌های شیشه‌ای کاهش می‌یابد. این نتایج نشان می‌دهد که پارامترهای MFP و HVL با چگالی نمونه‌های شیشه‌ای رابطه معکوس دارند. علاوه بر این، نمونه شیشه‌ای بالاترین چگالی بهترین تأثیر حفاظت را در برابر انرژی پرتو گاما دارد. مقادیر HVL به دست آمده از شبیه‌سازی نمونه‌های شیشه‌ای به همراه مقادیر HVL برخی از مواد مرسوم (آهن و سرب) حفاظ گامای به دست آمده از پایگاه داده XCOM به

$$Z_{eff} = \frac{\sum_i f_i A_i \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_i}{\sum_j f_j \frac{A_j}{Z_j} \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_j} \quad (7)$$

که در این رابطه f_i درصد مولی متناسب هر عنصر را نشان می‌دهد، $\sum_i f_i = 1$ ، A_i و Z_j به ترتیب تعداد و وزن اتم‌ها را مشخص می‌کند.

۶.۲ تحلیل داده

درصد انحراف^۱ (PD) بین نتایج حاصل از کد MCNP و داده‌های مستخرج از پایگاه XCOM بر اساس رابطه ۸ محاسبه می‌شود.

$$PD = \left| \frac{(\mu_{m,MCNP} - \mu_{m,XCOM})}{\mu_{m,XCOM}} \right| \times 100 \quad (8)$$

۳. نتایج و بحث

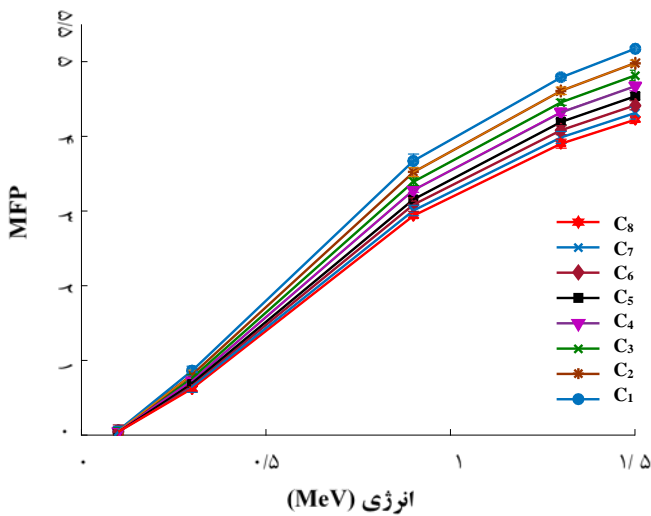
۱۰.۳ اعتبارسنجی

در این مطالعه، مقدار ضریب تضعیف جرمی در انرژی‌های مختلف برای سیستم شیشه‌ای با ترکیب $TiO_2 - Bi_2O_3 - Pb_3O_4 - Al_2O_3 - ZnO - xTiO_2$ با غلظت‌های مشخص (۳۵، ۳۰، ۲۵، ۲۰، ۱۵، ۱۰، ۵، $x=0$) در مول) در محدوده انرژی‌های بین ۱۰۰ تا ۱۵۰۰ keV با استفاده از شبیه‌سازی کد MCNP محاسبه شد. داده‌های پایگاه XCOM نیز برای اعتبارسنجی داده‌های حاصل از شبیه‌سازی استخراج شد. نتایج به دست آمده از رابطه ۹ در جدول ۳ و به صورت گرافیکی در شکل ۲ (الف-د) شرح داده شده است. درصد انحراف بین نتایج حاصل از کد MCNP و داده‌های مستخرج از پایگاه XCOM برای ترکیب‌های مورد بررسی در محدوده ۰٫۶-۰٫۶۴۲ درصد (C_1)، ۰٫۶-۰٫۲۴۷ درصد (C_2)، ۰٫۶-۰٫۲۳۱ درصد (C_3)، ۰٫۶-۰٫۲۵۷ درصد (C_4)، ۰٫۶-۰٫۲۶۴ درصد (C_5)، ۰٫۶-۰٫۲۷۸ درصد (C_6)، ۰٫۷-۰٫۲۸۰ درصد (C_7) و ۰٫۱۸-۰٫۶۹۸ درصد (C_8) بود. این نتایج نشان می‌دهد که مقادیر μ_m شبیه‌سازی شده توسط کد MCNP برای سیستم شیشه‌ای با ترکیب $TiO_2 - Bi_2O_3 - Pb_3O_4 - Al_2O_3 - ZnO$ بسیار نزدیک به داده‌های تجربی برنامه XCOM است. به عنوان نمونه در شکل (۲ د) برای ترکیب $0.2TiO_2 + 15Bi_2O_3 + 20ZnO + 10Pb_3O_4 + 35Al_2O_3$ از ضریب همبستگی برای تأیید خطی بودن نتایج شبیه‌سازی شده (μ_m)

1. Percentage Different



Z_{eff} برای همه نمونه‌ها با افزایش انرژی افزایش می‌یابد. این تغییرات را می‌توان به این صورت بیان کرد در انرژی‌های کم با غلبه برهم‌کنش فوتوالکتریک، در انرژی‌های میانی با غلبه برهم‌کنش کامپتون و در انرژی‌های بالا با غلبه برهم‌کنش تولید زوج، مقدار Z_{eff} افزایش می‌یابد. هم‌چنین در نمونه‌های شیشه‌ای با افزایش اثر TiO_2 (کاهش Bi_2O_3)، نرخ اندرکنش به طور قابل توجهی افزایش یافته و در نتیجه منجر به کاهش (افزایش) مقدار Z_{eff} می‌شود. PD بین داده‌های MCNP و XCOM $1/36$ الی $3/28$ درصد است.



شکل ۲. روند تغییرات MFP سیستم‌های مختلف شیشه در برابر اشعه گاما و مقایسه با یکدیگر.

صورت گرافیکی در شکل ۵ نشان داده شده است، همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود با این‌که سرب در مقایسه با سایر نمونه‌های مورد بررسی مقادیر HVL کم‌تری دارد اما با توجه به این‌که مواد سنتی مورد استفاده به عنوان حفاظ پرتوی گاما دارای مشکلات زیادی از جمله سمی بودن (سرب)، مات بودن، وزن بالا، تولید پرتوهای ثانویه در طول تابش، عدم انعطاف‌پذیری کافی در ضخامت بالا را دارند گزینه مناسبی برای حفاظ‌گذاری نیستند اما کامپوزیت‌ها به دلیل مشخصات مکانیکی عالی، سبکی، مقاومت در برابر خوردگی عالی و سهولت کار، انتخاب ایده‌آلی هستند که می‌توانند جایگزین مناسبی برای مواد معمولی باشند. هم‌چنین، ضریب انبساط را می‌توان از نسبت شار کل فوتون‌ها به شار عدم برخورد به‌دست آورد. با استفاده از کد تالی موجود در MCNPX، شار کل فوتون‌ها را می‌توان به طور پیش‌فرض محاسبه کرد. هم‌چنین برای محاسبه فوتون‌های بدون برخورد، لازم است از محدوده انرژی کمی در اطراف انرژی فوتون بدون برخورد استفاده شود. مقادیر ضریب انباشت برای برخی از نمونه‌های شیشه‌ای مورد مطالعه در این پژوهش در محدوده انرژی‌های بین ۳۰۰ تا ۱۵۰۰ keV محاسبه شد که به صورت گرافیکی در شکل ۶ (الف-د) نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، با افزایش انرژی منبع پرتو گاما، BF افزایش می‌یابد. این با این واقعیت توضیح داده می‌شود که با افزایش سطح مقطع برهم‌کنش‌های تولید زوج و کامپتون، شار پراکنده افزایش می‌یابد. پارامتر دیگر مربوط به تضعیف فوتون Z_{eff} است که در جدول ۵ برای نمونه‌های شیشه‌ای مورد مطالعه در این پژوهش ارائه شده است.

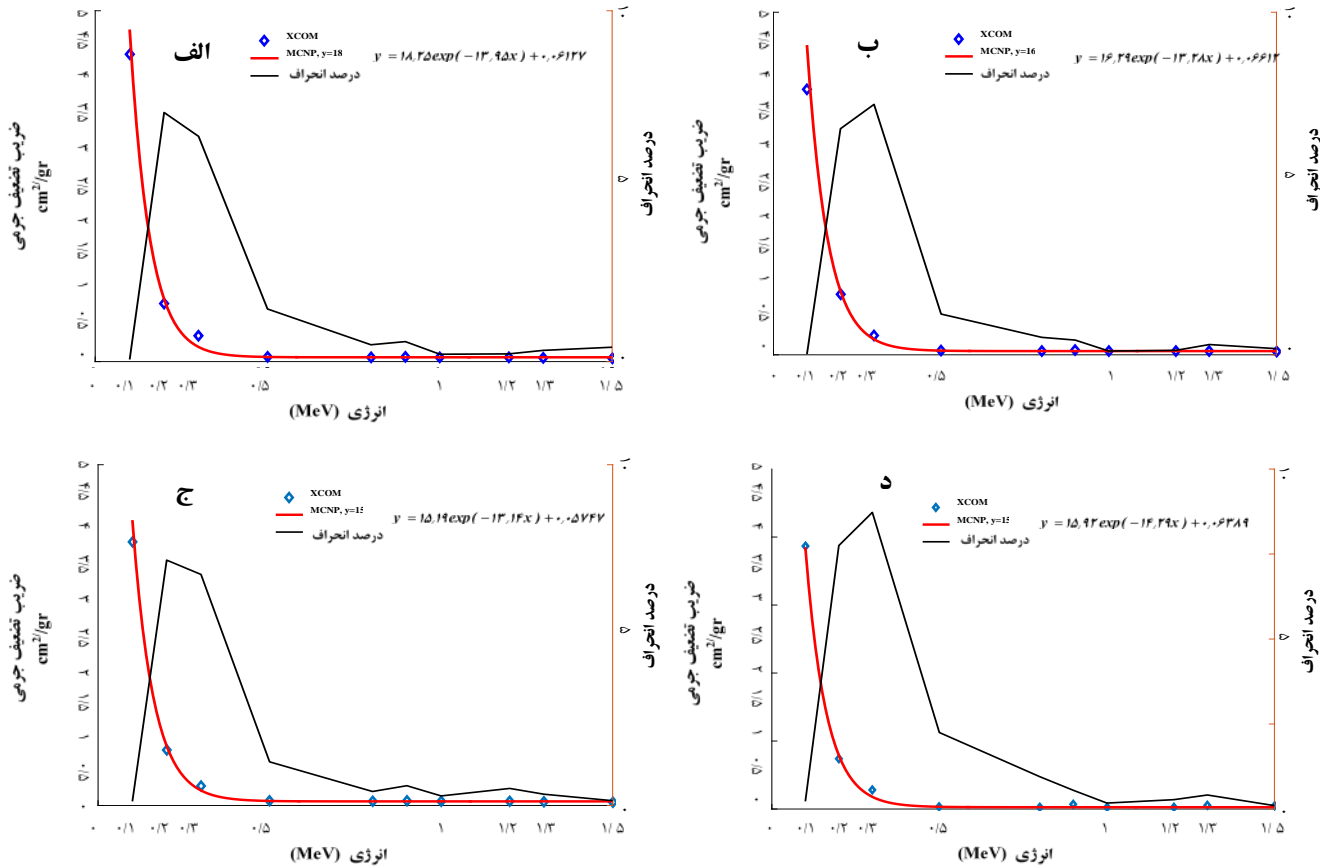
جدول ۳. μ_m (cm²/gr) و PD بین MCNP و XCOM برای نمونه‌های شیشه $TiO_2 - Bi_2O_3 - ZnO - Pb_3O_4 - Al_2O_3$

۱۵۰۰ keV			۱۳۰۰ keV			۹۰۰ keV			۳۰۰ keV			۱۰۰ keV			انرژی
PD(%)	XCOM	MCNP	PD(%)	XCOM	MCNP	PD(%)	XCOM	MCNP	PD(%)	XCOM	MCNP	PD(%)	XCOM	MCNP	نمونه شیشه
۰٫۴۱	۰٫۰۴۷۹۴	۰٫۰۴۷۷۴	۰٫۳۲	۰٫۰۵۱۸۲	۰٫۰۵۱۶۵	۰٫۵۷	۰٫۰۶۹۰	۰٫۰۶۸۶	۶٫۴۲	۰٫۱۴۱۶	۰٫۱۳۲۵	۰٫۰۶	۴٫۵۸۷	۴٫۵۸۴	C _۱
۰٫۲۵	۰٫۰۴۷۸۳	۰٫۰۴۷۷۱	۰٫۳۴	۰٫۰۵۱۷۸	۰٫۰۵۱۶۰	۰٫۵۸	۰٫۰۶۸۸	۰٫۰۶۸۴	۶٫۴۷	۰٫۱۴۰۶	۰٫۱۳۱۵	۰٫۰۲	۴٫۵۱۵	۴٫۵۱۴	C _۲
۰٫۱۸	۰٫۰۴۷۷۶	۰٫۰۴۷۶۷	۰٫۳۰	۰٫۰۵۱۷۱	۰٫۰۵۱۵۵	۰٫۴۳	۰٫۰۶۸۵	۰٫۰۶۸۲	۷٫۳۱	۰٫۱۳۹۵	۰٫۱۳۰۴	۰٫۰۲	۴٫۴۳۶	۴٫۴۳۵	C _۳
۰٫۱۸	۰٫۰۴۷۷۰	۰٫۰۴۷۶۱	۰٫۳۲	۰٫۰۵۱۶۶	۰٫۰۵۱۴۹	۰٫۵۸	۰٫۰۶۸۳	۰٫۰۶۷۹	۶٫۵۷	۰٫۱۳۸۳	۰٫۱۲۹۲	۰٫۰۲	۴٫۳۴۷	۴٫۳۴۸	C _۴
۰٫۱۰	۰٫۰۴۷۶۲	۰٫۰۴۷۵۷	۰٫۳۱	۰٫۰۵۱۵۸	۰٫۰۵۱۴۲	۰٫۵۸	۰٫۰۶۸۱	۰٫۰۶۷۷	۶٫۶۴	۰٫۱۳۷۰	۰٫۱۲۷۹	۰٫۰۲	۴٫۲۴۷	۴٫۲۵۰	C _۵
۰٫۱۴	۰٫۰۴۷۵۹	۰٫۰۴۷۵۲	۰٫۳۳	۰٫۰۵۱۵۱	۰٫۰۵۱۳۴	۰٫۵۸	۰٫۰۶۷۸	۰٫۰۶۷۴	۶٫۷۸	۰٫۱۳۵۵	۰٫۱۲۶۳	۰٫۱۲	۴٫۱۳۴	۴٫۱۳۹	C _۶
۰٫۱۴	۰٫۰۴۷۵۲	۰٫۰۴۷۴۵	۰٫۳۱	۰٫۰۵۱۴۳	۰٫۰۵۱۲۷	۰٫۵۹	۰٫۰۶۷۵	۰٫۰۶۷۱	۶٫۸۰	۰٫۱۳۳۷	۰٫۱۲۴۶	۰٫۲۲	۴٫۰۰۵	۴٫۰۱۴	C _۷
۰٫۰۸	۰٫۰۴۷۴۱	۰٫۰۴۷۳۷	۰٫۳۳	۰٫۰۵۱۳۳	۰٫۰۵۱۱۶	۰٫۴۴	۰٫۰۶۷۰	۰٫۰۶۶۷	۶٫۹۸	۰٫۱۳۱۷	۰٫۱۲۲۵	۰٫۱۸	۳٫۸۵۷	۳٫۸۶۴	C _۸

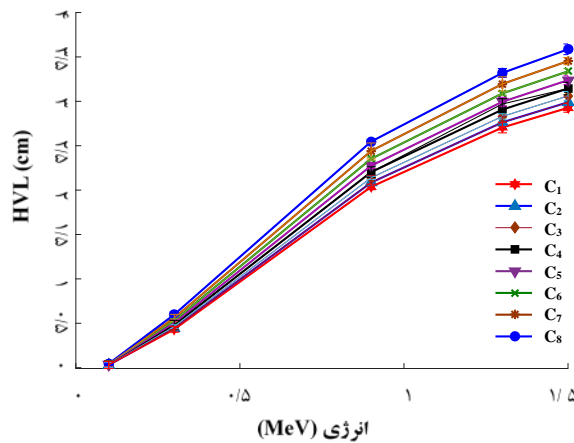


جدول ۴. معادلات برآورد ضریب تضعیف جرمی و مقایسه با نتایج MCNP

PD (%)	MCNP	رابطه برازش شده	انرژی (MeV)	بهترین رابطه برازش شده	نمونه شیشه
۲٫۴۷	۸٫۲۷۹	۸٫۰۷۴	۰٫۰۵۹ (^{241}Am)	$y = 18,25 \exp(-13,95x) + 0,6127$	C _۱
۰٫۴۴	۳٫۳۴۵	۳٫۳۳	۰٫۱۲۱ (^{152}Eu)	$y = 22,3 \exp(-15,85x) + 0,5696$	C _۲
۵٫۳۱	۱٫۴۴۹	۱٫۳۷۲	۰٫۱۹۰ (^{226}Ra)	$y = 16,29 \exp(-13,28x) + 0,6612$	C _۳
۵٫۶۱	۰٫۸۰۲	۰٫۷۵۷	۰٫۲۴۰ (^{232}Th)	$y = 15,61 \exp(-12,93x) + 0,567$	C _۴
۰٫۹۲	۰٫۰۶۵۱	۰٫۰۶۴۵	۰٫۴۲۷ (^{125}Sb)	$y = 15,47 \exp(-13,04x) + 0,055$	C _۵
۰٫۶۸	۰٫۰۵۵۹	۰٫۰۵۷۷	۰٫۸۳۴ (^{54}Mn)	$y = 15,19 \exp(-13,14x) + 0,5747$	C _۶
۰٫۳۲	۰٫۰۶۱۵	۰٫۰۶۲۲	۱٫۲۷۴ (^{22}Na)	$y = 16,82 \exp(-14,12x) + 0,6225$	C _۷
۰٫۳۱	۰٫۰۶۲۷	۰٫۰۶۳۸	۱٫۳۳ (^{137}Co)	$y = 15,92 \exp(-14,29x) + 0,6389$	C _۸

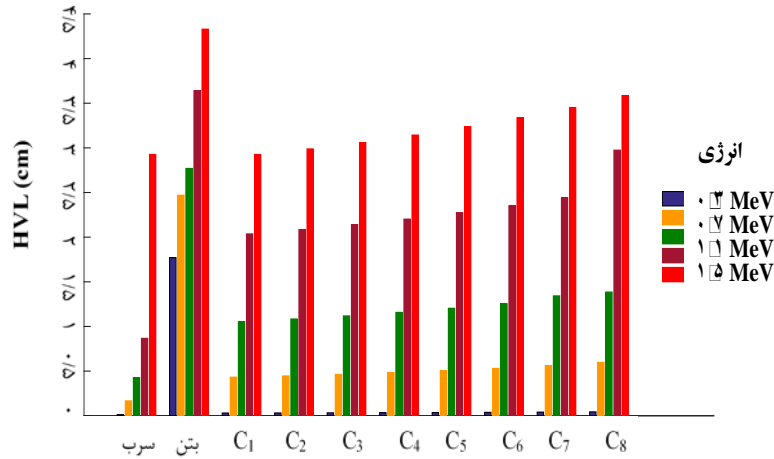


شکل ۳. تغییرات μ_m نمونه شیشه بر حسب انرژی اشعه گاما برای (الف) C_۱، (ب) C_۳، (ج) C_۶ و (د) C_۸.



شکل ۴. روند تغییرات HVL سیستم‌های مختلف شیشه در برابر اشعه گاما و مقایسه با یکدیگر.





شکل ۵. مقدار HVL نمونه‌های شیشه‌ای مورد بررسی و برخی از مواد حفاظ.

جدول ۵. Z_{eff} و PD بین MCNP و XCOM برای نمونه‌های شیشه $TiO_2 - Bi_2O_3 - ZnO - PbO - Al_2O_3$

۱۵۰۰ keV			۱۳۰۰ keV			۹۰۰ keV			۳۰۰ keV			۱۰۰ keV			انرژی
PD(%)	XCOM	MCNP	PD(%)	XCOM	MCNP	PD(%)	XCOM	MCNP	PD(%)	XCOM	MCNP	PD(%)	XCOM	MCNP	نمونه شیشه
۱٫۹۲	۷۳٫۱۹	۷۱٫۷۸	۱٫۵۳	۷۴٫۱۹	۷۳٫۰۵	۱٫۴۰	۷۹٫۴۴	۷۸٫۳۲	۱٫۳۶	۷۸٫۳۲	۷۸٫۳۲	۱٫۴۰	۸۱٫۳۹	۸۰٫۲۵	C _۱
۱٫۸۶	۷۲٫۵۸	۷۱٫۲۳	۱٫۵۱	۷۳٫۸۶	۷۲٫۷۴	۱٫۵۳	۷۹٫۲۳	۷۸٫۰۱	۱٫۴۸	۷۸٫۰۱	۷۸٫۰۱	۱٫۵۲	۸۱٫۱۰	۷۹٫۸۶	C _۲
۲٫۴۸	۷۲٫۰۴	۷۰٫۲۵	۲٫۲۸	۷۳٫۴۸	۷۱٫۸۰	۱٫۷۰	۷۸٫۸۲	۷۷٫۴۸	۱٫۳۸	۷۷٫۴۸	۷۷٫۴۸	۲٫۰۶	۸۰٫۹۰	۷۹٫۲۳	C _۳
۲٫۰۵	۷۱٫۰۴	۶۹٫۵۸	۲٫۱۵	۷۲٫۸۱	۷۱٫۲۴	۱٫۶۲	۷۸٫۵۳	۷۷٫۲۵	۱٫۵۴	۷۷٫۲۵	۷۷٫۲۵	۲٫۱۸	۸۰٫۶۳	۷۸٫۸۷	C _۴
۱٫۲۹	۶۹٫۶۸	۶۸٫۷۸	۲٫۰۶	۷۲٫۲۴	۷۰٫۷۵	۱٫۶۲	۷۸٫۲۴	۷۶٫۹۷	۱٫۵۲	۷۶٫۹۷	۷۶٫۹۷	۲٫۸۱	۸۰٫۳۸	۷۸٫۱۲	C _۵
۱٫۴۸	۶۹٫۱۵	۶۸٫۱۲	۲٫۲۲	۷۱٫۸۴	۷۰٫۲۴	۱٫۴۷	۷۸٫۰۱	۷۶٫۸۶	۱٫۴۵	۷۶٫۸۶	۷۶٫۸۶	۲٫۹۷	۸۰٫۱۳	۷۷٫۷۵	C _۶
۱٫۴۶	۶۸٫۷۵	۶۷٫۷۴	۲٫۲۷	۷۱٫۳۰	۶۹٫۶۸	۱٫۵۰	۷۷٫۸۰	۷۶٫۶۳	۱٫۵۳	۷۶٫۶۳	۷۶٫۶۳	۳٫۳۱	۷۹٫۹۰	۷۷٫۲۵	C _۷
۲٫۵۵	۶۸٫۲۱	۶۶٫۴۷	۲٫۹۵	۷۰٫۸۴	۶۸٫۷۵	۱٫۴۱	۳٫۸۵۷	۷۶٫۴۶	۱٫۵۹	۷۶٫۴۶	۷۶٫۴۶	۳٫۲۸	۷۹٫۶۷	۷۷٫۰۵	C _۸

به عنوان حفاظ پرتو گاما را به ترتیب برابر با 4.08 g/cm^3 و در بیشتر موارد کم‌تر از 0.59 درصد گزارش شد که در مقایسه با ترکیبات پیشنهادی در منابع [۱۱، ۱۸، ۲۵] مطلوب‌تر است. در این مطالعه از کد کامپیوتری MCNP برای بررسی پارامترهای اصلی تضعیف فوتون در برابر تابش گاما استفاده کردیم. فاکتورهای حفاظت در برابر تشعشع گاما مانند MFP، HVL، μ_m ، Z_{eff} و BF هشت نوع ترکیب برای منابع تابش گاما در محدوده انرژی $100 - 1500 \text{ keV}$ محاسبه شد. اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی بر اساس پایگاه داده XCOM تأیید شد. PD بین مقادیر μ_m و Z_{eff} کد کامپیوتری MCNP و پایگاه داده XCOM برای سیستم شیشه‌ای $TiO_2 - Bi_2O_3 - ZnO - PbO - Al_2O_3$ گزارش شد. نتایج به گونه‌ای بود که با افزایش محتوای TiO_2 ، μ_m و Z_{eff} به ترتیب افزایش و کاهش می‌یابند. همچنین، عملکرد تضعیف کامپوزیت‌ها با کاهش انرژی گاما بهبود یافت. علاوه بر این مقادیر MFP، HVL و Z_{eff} نشان می‌دهد که مورد C_۸ علاوه بر تضعیف مؤثر فوتون و همچنین به دلیل بالا بودن غلظت TiO_2 در این ترکیب (بهبود بخشیدن به خواص پایداری گرمایی و شیمیایی ترکیب) می‌تواند به عنوان بهترین ترکیب حفاظ پرتوی گاما در نظر گرفته شود.

۴. بحث و نتیجه‌گیری

مجموعه حفاظ مکعبی با ترکیب حاوی مواد $TiO_2 - Bi_2O_3 - PbO - Al_2O_3 - ZnO$ با استفاده از کد کامپیوتری MCNP مدل‌سازی و شبیه‌سازی شد. دقت و صحت شبیه‌سازی‌ها با استفاده از داده‌های تجربی موجود در برنامه XCOM تأیید شد. نتایج نشان داد که تطابق خوبی بین شبیه‌سازی‌ها و اندازه‌گیری‌های تجربی وجود دارد. آگار و همکارانش [۱۱]، درصد انحراف برای حفاظ با مواد $0.72Nb_2O_5 + 1.0ZnO + 0.5Li_2O + 0.7TeO_2$ چگالی 4.83 g/cm^3 با درصد انحراف کم‌تر از 6.06% بین شبیه‌سازی‌ها و داده‌های XCOM گزارش کردند. علاوه بر این، اسدی و همکارش [۱۸]، برای حفاظ با محتوای $0.15Bi_2O_3 - 0.5Bi_2O_3 - 15Li_2O$ چگالی 5.45 g/cm^3 و در بیشتر موارد درصد انحراف کم‌تر از 2% را در شبیه‌سازی محاسبات مربوط به ضریب تضعیف جرمی گزارش کردند و شارما و همکارانش [۲۵]، از کد FLUKA برای مدل‌سازی حفاظ با مواد $20ZnO - 95TeO_2 - 5WO_3$ استفاده کردند و چگالی 4.56 g/cm^3 با درصد انحراف کم‌تر از 0.7% را گزارش کردند. در حالی که در مطالعه حاضر چگالی و PD بین پایگاه داده XCOM و برنامه MCNP در این مطالعه برای نمونه با ترکیب $20Bi_2O_3 + 15PbO + 20Al_2O_3 + 10ZnO + 25TiO_2$

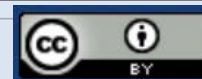


مراجع

1. A. Kumar, et al., *Effect of PbO on the shielding behavior of ZnO–P2O5 glass system using Monte Carlo simulation*, *Journal of Non-Crystalline Solids*, **481**, 604-607 (2018).
2. T. Shams, M. Eftekhari, A. Shirani, *Investigation of gamma radiation attenuation in heavy concrete shields containing hematite and barite aggregates in multi-layered and mixed forms*, *Construction and Building Materials*, **182**, 35-42 (2018).
3. M. Sayyed, et al., *Radiation shielding properties of pentatertiary borate glasses using MCNPX code*, *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, **121**, 17-21 (2018).
4. M. Sayyed, et al., *Comparative investigations of gamma and neutron radiation shielding parameters for different borate and tellurite glass systems using WinXCom program and MCNPX code*, *Materials Chemistry and Physics*, **215**, 183-202 (2018).
5. H.O. Tekin, et al., *Photon shielding characterizations of bismuth modified borate-silicate-tellurite glasses using MCNPX Monte Carlo code*, *Materials Chemistry and Physics*, **211**, 9-16 (2018).
6. M. Sayyed, et al., *Structural, optical, and shielding investigations of TeO₂–GeO₂–ZnO–Li₂O–Bi₂O₃ glass system for radiation protection applications*, *Applied Physics A*, **125**(6), 1-8 (2019).
7. F. Akman, et al., *Investigation of photon shielding performances of some selected alloys by experimental data, theoretical and MCNPX code in the energy range of 81 keV–1333 keV*, *Journal of Alloys and Compounds*, **772**, 516-524 (2019).
8. N. Sabry, et al., *Gamma-ray attenuation, fast neutron removal cross-section and build up factor of Cu₂MnGe [S, Se, Te] 4 semiconductor compounds: Novel approach*, *Radiation Physics and Chemistry*, **179**, 109248 (2021).
9. M. Dong, et al., *A comparative study on gamma photon shielding features of various germanate glass systems*, *Composites Part B: Engineering*, **165**, 636-647 (2019).
10. D. Gaikwad, et al., *Physical, structural, optical investigation and shielding features of tungsten bismuth tellurite based glasses*, *Journal of Non-Crystalline Solids*, **503**, 158-168 (2019).
11. O. Agar, et al., *Er₂O₃ effects on photon and neutron shielding properties of TeO₂–Li₂O–ZnO–Nb₂O₅ glass system*, *Results in Physics*, **13**, 102277 (2019).
12. M. Kamislioglu, E. Altunsoy Guclu, H. Tekin, *Comparative evaluation of nuclear radiation shielding properties of xTeO₂+(100-x) Li₂O glass system*, *Applied Physics A*, **126**(2), 1-16 (2020).
13. M. Berger, *NIST XCOM: photon cross sections database*, <http://www.nist.gov/pml/data/xcom/index.cfm>, (2010).
14. A. Abouhaswa, et al., *Examinations the optical, mechanical, and shielding properties of Ag₂O doped B₂O₃–Bi₂O₃–SrF₂–Na₂O glasses for gamma ray shield applications*, *Scientific Reports*, **12**(1), 1-13 (2022).
15. Y. Rammah, A. Ali, F. El-Agawany, *γ-ray shielding features and crystallization of TiO₂ borotellurite glasses*, *Journal of Non-Crystalline Solids*, **526**, 119720 (2019).
16. Y. Al-Hadeethi, M. Sayyed, *BaO–Li₂O–B₂O₃ glass systems: potential utilization in gamma radiation protection*, *Progress in Nuclear Energy*, **129**, 103511 (2020).
17. Y. Alajerami, et al., *Radiation shielding properties of bismuth borate glasses doped with different concentrations of cadmium oxides*, *Ceramics International*, **46**(8), 12718-12726 (2020).
18. A. Asadi, S.A. Hosseini, *Investigation of the gamma-ray shielding performance of the B₂O₃–Bi₂O₃–ZnO–Li₂O glasses based on the Monte Carlo approach*, *Radiation Physics and Chemistry*, **189**, 109784 (2021).
19. J.P. Kleijnen, A. Ridder, R. Rubinstein, *Variance reduction techniques in Monte Carlo methods*, (2010).
20. Y. Rammah, et al., *Responsibility of Bi₂O₃ content in photon, alpha, proton, fast and thermal neutron shielding capacity and elastic moduli of ZnO/B₂O₃/Bi₂O₃ glasses*, *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, **31**(8), 3505-3524 (2021).
21. A. Rabi'ee, S. Hosseini, *Extraction of theoretical equation for the gamma ray buildup factor of the three-layered spherical shield*, *Journal of Instrumentation*, **14**(04), P04011 (2019).
22. K. Mahmoud, M. Sayyed, O. Tashlykov, *Gamma ray shielding characteristics and exposure buildup factor for some natural rocks using MCNP-5 code*, *Nuclear Engineering and Technology*, **51**(7), 1835-1841 (2019).
23. F. Akman, et al., *A comparative study on the nuclear shielding properties of BiBr₃ and PbSO₄ incorporated composites*, *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, **152**, 109978 (2021).
24. Y. Rammah, et al., *Investigation of mechanical features and gamma-ray shielding efficiency of ternary TeO₂-based glass systems containing Li₂O, Na₂O, K₂O, or ZnO*, *Ceramics International*, **46**(17), 27561-27569 (2020).
25. A. Sharma, et al., *Simulation of shielding parameters for TeO₂–WO₃–GeO₂ glasses using FLUKA code*, *Results in Physics*, **13**, 102199 (2019).

COPYRIGHTS

©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.



استناد به این مقاله

علی اروانه، علی اسدی، سید ابوالفضل حسینی (۱۴۰۲)، بررسی مشخصات حفاظ پرتوی گاما با افزایش غلظت TiO_2 در نمونه شیشه‌ای $Bi_2O_3-ZnO-Pb_2O_3-Al_2O_3$ با ابزارهای شبیه‌سازی و محاسباتی، ۱۰۶، ۸۴-۷۶

DOI: 10.24200/nst.2022.1184.1771

Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1529.html

