

بررسی نانولوله‌های کربن - پلاتین در عملکرد حفاظ‌های پرتو گاما

محمدرضا علی‌پور و مهدی عشقی*

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

چکیده

در این مطالعه به بررسی محافظ‌های پرتو گاما و نوترون نانولوله‌های کربن-پلاتین با استفاده از ابزار شبیه‌سازی Geant4، در محدوده انرژی فوتون 0/15 تا 15 مگا الکترون‌ولت پرداخته‌ایم. ما ضریب تضعیف جرمی، لایه نیم‌کننده، لایه یک‌دهم‌کننده، مسیر آزاد میانگین، نسبت ضریب تضعیف خطی پراکندگی کامپتون به ضریب تضعیف خطی کل و سطح مقطع جذب نوترون‌های سریع را محاسبه کرده‌ایم که برای بررسی عملکرد یک حفاظ این پارامترها ضروری است. برای درست‌سنجی داده‌ها از برنامه XMuDat استفاده کرده‌ایم. نتایج محاسبه‌شده به‌وسیله Geant4 با نتایج به‌دست آمده از برنامه XMuDat مطابقت خوبی داشته و آنها را بررسی کرده‌ایم. در نهایت، نتایج برای نانومواد در شکل‌های مناسب به تصویر کشیده شده است. در پایان، پیشنهادهایی برای استفاده از این مواد نانویی در مکان‌هایی که محدودیت وزن، پایداری مکانیکی و استحکام وجود دارد، داده شده است.

واژه‌های کلیدی: نانولوله‌های کربن-پلاتین، حفاظ پرتوی، پرتوهای گاما، روش مونت کارلو، ابزار Geant4.

ایمیل نویسنده مسئول: Eshghi54@gmail.com; meshghi@ihu.ac.ir

1- مقدمه

با گسترش استفاده از پرتوها و رادیوایزوتوپ‌ها در مراکز پزشکی و صنعتی، مشکل تدریجی حفاظت از منابع و تجهیزات تولید پرتو به یک جنبه مهم تبدیل شده است. برای محافظت در برابر پرتو، ارزیابی پارامترهای برهم‌کنش پرتوگاما با ماده نیاز به بررسی دقیق دارد [1]. ضریب تضعیف جرمی عناصر، به‌طور گسترده در فیزیک فضایی، دزیمتری، پزشکی و بسیاری از کاربردهای دیگر در مطالعات تابش مورد استفاده قرار گرفته است. مطالعه جذب پرتوهای گاما در مواد به‌دلیل اثرات زیستی، موضوع مهمی در زمینه فیزیک پرتوهای بوده است [2]. پرتو گاما در موادی با چگالی بالا مانند سرب، تنگستن، بتن و مصالح ساختمانی قابل جذب است. برهم‌کنش پرتوهای گاما به انرژی فوتون و عدد اتمی عناصر سازنده ترکیب بستگی دارد [3]. در سال‌های اخیر، مطالعات زیادی بر روی مواد مختلف برای بهبود عملکرد مواد محافظ رایج و توسعه مواد جدید انجام شده است [4-8]. برخی از این مطالعات، بر مواد چندسازه‌ای با استفاده از روش‌های مختلف و پرکننده‌های مختلف (فلز یا اکسید فلز) برای دستیابی به حفاظ‌های چندسازه‌ای مؤثر انجام شده است.

نانولوله‌ها یکی از این مواد چندسازه‌ای بودند که به‌عنوان مواد انعطاف‌پذیر و سبک‌وزن مورد بررسی قرار گرفتند [9]. نانوجندسازهای لاستیک استایرن بوتادین ۱ با مونت موریلونیت ۲ در حضور اکسیدهای فلزی مانند Fe_2O_3 ، ZnO ، MoO و TiO_2 به‌عنوان یک ماده محافظ در برابر پرتوهای یونیزان گزارش شده و مشخص شده است که می‌تواند یک محافظ خوب برای گاما باشد [10]. نانومواد نیز به‌عنوان پرکننده‌هایی گزارش می‌شوند که می‌توانند با ماتریس‌های بسیاری استفاده شوند. نامبیر و همکارانش، چندسازه‌های مبتنی بر پلی‌اتیلن با وزن مولکولی بالا پُر شده با پودرهای B_4C و نانوتنگستن را مورد مطالعه قرار دادند و دریافتند که تابش گاما را به‌خوبی ضعیف می‌کند. افزایش محتوای نانو ذرات تنگستن در چندسازه‌های پلی‌دی‌متیل سیلوکسان ۳ همراه با نانو ذرات اکسید بیسموت (BiO) نیز در تضعیف پرتوهای گاما مؤثر بوده است [11، 12]. در مطالعات متعددی استفاده از نانوپودرها در چندسازه‌ها را برای کاربردهای محافظت در برابر پرتو بررسی

¹ Styrene Butadiene Rubber (SBR)

² Montmorillonite

³ Polydimethylsiloxane (PDMS)

خوبی برای نوترون‌ها است؛ و نیز عنصر پلاتین که چگالی بالایی دارد که یکی از عوامل مؤثر بر ضریب تضعیف خطی است، برای بررسی ویژگی‌های حفاظت پرتویی مناسب است.

2- فعالیت‌های شبیه‌سازی

بسته نرم‌افزاری: Geant4 بستری برای شبیه‌سازی تریاتر ذرات از ماده با استفاده از روش مونت‌کارلو، که روشی اصولاً دقیق برای تأیید نتایج و بهینه‌سازی یک تحقیق است. این جانشین مجموعه ابزارهای نرم‌افزاری، GEANT است که توسط همکاری Geant4 توسعه یافته است و برای اولین مرتبه از برنامه‌نویسی شیء‌گرا استفاده می‌کند. این کد دارای کتابخانه‌های مختلفی شامل مقطع (احتمال برهم‌کنش) ذرات مختلف و در محیط‌های مختلف است. یکی از ویژگی‌های قابل‌توجه این ابزار، استحکام رایگان و بالا برای ایجاد هندسه، فیزیک برهم‌کنش ذرات و منبع تابش است. توسعه، نگهداری و پشتیبانی کاربر توسط همکاری بین‌المللی Geant4 انجام می‌شود. در حال حاضر، طرح‌های سنگین مرکز تحقیقات سرن در اروپا و بسیاری پروژه‌های دیگر شامل: فیزیک ذرات بنیادی، دزیمتری و درمان، میکروذیمتری در فضای زیرسلولی، حفاظت از سفینه‌های فضایی، طراحی و بهینه‌سازی دستگاه‌های پرتودرمانی است [34].

3- تجزیه و تحلیل نتایج

خصوصیات فیزیکی نانولوله‌های کربن-پلاتین، افزون بر کسر وزنی عناصر تشکیل‌دهنده این مواد در جدول 1 نشان داده شده است.

جدول 1: مشخصات ترکیبات شیمیایی نانومواد منتخب

نمونه‌ها	کسر وزنی عناصر					
	C	O	Pt	S	N	F
CP-20	81.83	5.66	11.18	0.52	0.81	--
CP-70	75.57	12.05	10.81	0.73	0.84	--
CIE-20	50.61	6.16	8.14	1.28	0.5	33.31
CIE-70	44.97	7.48	11.34	1.78	1.2	33.23

همچنین، سطح مقطع حذف نوترون‌های سریع نیز در جدول 2، آورده شده که نشان می‌دهد چقدر احتمال دارد یک نوترون سریع، در یک ماده از طریق واکنش هسته‌ای با هسته هدف حذف شود.

جدول 2: سطح مقطع حذف نوترون‌های نانومواد منتخب

نانومواد	چگالی	سطح مقطع حذف نوترون‌های سریع (cm ⁻¹)
CP-20	1.82	8.203
CP-70	1.76	7.841
CIE-20	1.72	7.117

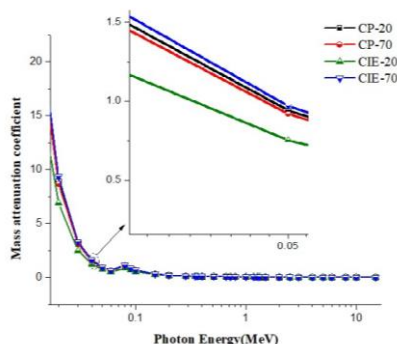
کرده‌اند. به عنوان مثال، یک مطالعه استفاده از مواد چندسازه سرامیکی مبتنی بر نانوپودر اکسید سرب را برای کاربردهای ساختاری محافظ پرتو بررسی کردند. مطالعه دیگری خواص تضعیف پرتو چندسازه‌های نانوذرات MgO / پلی‌اتیلن با چگالی بالا ۴ را ارزیابی کرد. به‌طور کلی، استفاده از نانوپودرها در ایجاد خواص تضعیف پرتوهای نویدبخش بوده است [13، 14].

در زمینه‌ی دگرشکل‌های کربن، مطالعات زیادی در گذشته انجام شده است [14-18]. ابتدا به‌طور مختصر در مورد دگرشکل‌های کربن-پلاتین توضیح داده و سپس محاسبات تکمیلی خود را بیان می‌کنیم. با توجه به خواص فیزیکی و شیمیایی منحصر به‌فرد نانولوله‌های کربنی، توجه زیادی را در بیشتر زمینه‌های علوم و مهندسی به خود جلب کرده‌اند. در سال‌های اخیر، چندین رویکرد برای بهبود ویژگی‌های انتشار میدانی نانولوله‌های کربنی و متناسب کردن آن‌ها با نیازهای فعلی گزارش شده است. [19]. اصلاح سطح نانولوله‌های کربنی با پرکننده‌هایی مانند ذرات فلزی (NPs) یکی از موثرترین روش‌ها برای افزایش عملکرد انتشار میدانی است. به‌ویژه، گزارش شده است که اصلاح ساختار الکترونیکی نانولوله‌های کربنی با پوشش-دهی سطح آن با نانوذرات Ru، W، Pd، Ti، Co منجر به افزایش چگالی حالت‌های نزدیک به سطح فرمی شده که ناشی از انتقال بار و هیبرید شدن مداری است. در نتیجه، خواص انتشار میدانی چنین ساختارهای چندسازه‌ای در مقایسه با نانولوله‌های کربنی بکر به‌طور قابل توجهی بهبود یافته است.

پلاتین به‌عنوان یک فلز مناسب برای رسوب بر روی سطح نانولوله‌های کربنی و روش ساده و مقیاس‌پذیر برای پوشش‌دهی نانولوله‌های کربنی هست [20، 23]. مطالعات زیادی بر نانولوله‌های کربن-پلاتین به‌دلیل توانایی جذب هیدروژن بالا به‌عنوان الکتروکاتالیست مناسب برای استفاده در پیل‌های سوختی انجام شده است [24، 32]. همچنین، بررسی‌های دیگر پژوهشگران نشان می‌دهد که نانوحندسازه‌های تهیه‌شده می‌تواند به‌عنوان الکتروود مناسب در سلول خورشیدی نیز استفاده شود [33].

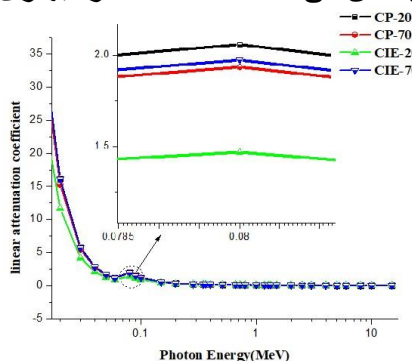
بنابراین، با توجه به مزایای نانولوله‌های کربن-پلاتین مانند توانایی جذب هیدروژن بالا که کندکننده

⁴ High Density Polyethylene(HDPE)



شکل 2. ضریب تضعیف جرمی برحسب انرژی نانومواد منتخب

شکل 2 تغییر مقادیر ضریب تضعیف جرمی را به عنوان تابعی از انرژی فوتون نشان می‌دهد. در قسمت بزرگ‌نمایی شده نمودار به وضوح مشخص است که CIE-70 تضعیف بهتری نسبت به سایرین در انرژی‌های کمتر از 100 کیلو الکترون‌ولت دارد و در انرژی‌های بالاتر از 100 کیلو الکترون‌ولت که اثرات عناصر سنگین‌تر خودش را به خوبی نشان می‌دهد، CP-20 عملکرد بهتری دارد.



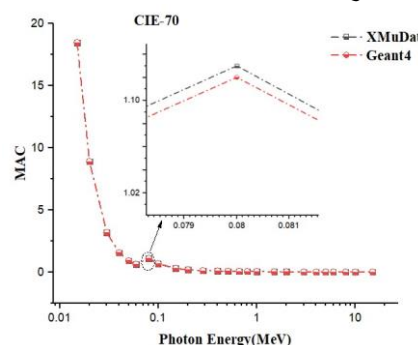
شکل 3. ضریب تضعیف خطی برحسب انرژی نانومواد منتخب

ضریب تضعیف خطی، نشان‌دهنده احتمال برهم‌کنش یک پرتو با ماده در واحد طول است. ضریب تضعیف خطی بستگی به انرژی تابش و ساختار اتمی و مولکولی ماده، از جمله عواملی مانند چگالی ماده، عدد اتمی، اتم‌های موجود در آن و چگالی الکترونی مواد دارد. شکل 3 میزان تضعیف خطی را نشان می‌دهد و همان‌طور که در بزرگ‌نمایی شکل مشخص است، CP-20 که دارای چگالی بالاتری است، عملکرد بهتری در مقابل پرتو دارد و به‌طور پیوسته پرتو را بهتر تضعیف می‌کند.

مسافت آزاد میانگین، اندازه‌گیری میانگین فاصله‌ای است که یک ذره، مانند فوتون، می‌تواند پیش از برهم‌کنش با ذره‌ای دیگر در یک ماده طی کند.

CIE-70	1.69	6.734
--------	------	-------

مقدار سطح مقطع حذف سریع نوترون، به ماده‌ای هدف و انرژی نوترون‌های فرویدی بستگی دارد. در CP-20 به دلیل افزایش درصد پلاتین با هسته بزرگتر نسبت به سایر عناصر احتمال برخورد و کاهش انرژی نوترون‌ها افزایش می‌یابد و عملکرد بهتری نسبت به سه ماده‌ی دیگر در برابر نوترون‌ها دارد.



شکل 1. مقایسه ضریب تضعیف جرمی برحسب انرژی دو برنامه برای CIE-70

ضریب تضعیف جرمی هر یک از نمونه‌ها، با شبیه‌سازی Geant4 انجام شده و با نتایج محاسبه‌شده با کد XMuDat در محدوده انرژی فوتون 15 کیلو الکترون‌ولت تا 10 مگا الکترون‌ولت برای CIE-70 مقایسه می‌شود. ما این مقایسه نتایج هر دو برنامه را در شکل 1 نشان داده‌ایم. همان‌طور که در این شکل قابل مشاهده است، نتایج محاسبه شده دو برنامه برای این نمونه مطابقت خوبی را نشان می‌دهد.

کمیت دیگر ضریب تضعیف جرمی است. این ضریب، معیاری است که نشان می‌دهد یک ماده به ازای هر واحد جرم ماده، پرتوی الکترومغناطیسی مانند پرتو ایکس یا پرتوهای گاما را به چه میزان تضعیف می‌کند، با رابطه زیر محاسبه می‌شود [35]:

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

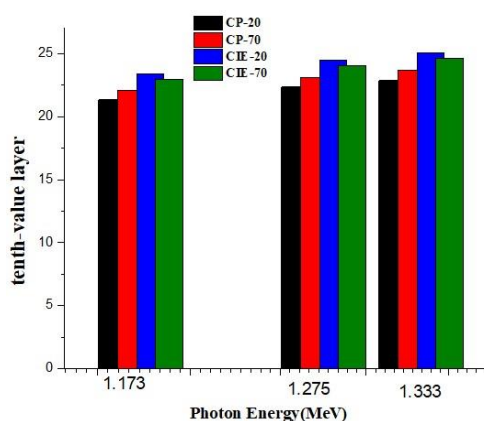
که I_0 شدت ورودی، I شدت خروجی و x ضخامت ماده است.

CP-20 به دلیل داشتن عناصر با عدد اتمی بالاتر و چگالی بالاتر دارای ضخامت لایه نیم‌کننده کمتری نسبت به دیگر مواد می‌تواند بهتر باشد. برای درک بهتر ضخامت با نمای ورقه‌ای در شکل 5 نشان داده شده است.

لایه یک‌دهم‌کننده، اندازمگیری ضخامت ماده‌ای است که برای کاهش شدت پرتو به یک‌دهم مقدار اولیه آن لازم است. این لایه مشابه لایه نیم‌کننده است. لایه یک‌دهم‌کننده در برنامه‌های حفاظت در برابر پرتو برای تعیین ضخامت ماده مورد نیاز برای ایجاد سطح خاصی از محافظ در برابر پرتوهای یونیزان استفاده می‌شود. به‌ویژه در هنگام برخورد با پرتوهای پراورزی، مانند پرتو گاما که می‌تواند به مواد ضخیم نفوذ کند و آسیب‌های زیستی ایجاد کند، مفید است، با رابطه زیر محاسبه می‌شود [36]:

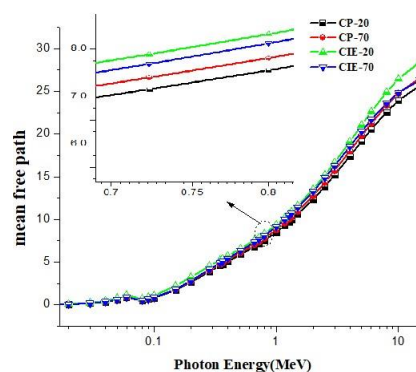
$$TVL = \frac{\ln 10}{\mu} \quad (3)$$

در شکل 6، بررسی میزان ضخامت لایه یک‌دهم‌کننده برای انرژی چشمه‌های رادیواکتیو مورد استفاده در پزشکی مانند سدیم و کبالت انجام شده، که به‌وضوح نشان می‌دهد CP-20 ضخامت کمتری را در این انرژی‌ها نسبت به سایر مواد دارد و ماده مطلوب‌تری برای استفاده در مقابل پرتوهای با انرژی 1/173، 1/333، 1/275 مگا الکترون‌ولت است.

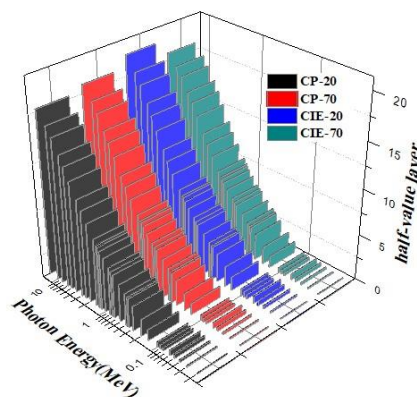


شکل 6. لایه یک‌دهم‌کننده برحسب انرژی نانو مواد منتخب نسبت ضریب تضعیف پراکندگی کامپتون به ضریب تضعیف کل معیاری از سهم نسبی پراکندگی کامپتون در تضعیف یک پرتو در هنگام عبور از یک ماده است. پراکندگی کامپتون یکی از فرایندهای اولیه‌ای است که با آن پرتوهای ایکس و گاما با ماده برهم‌کنش می‌کنند. در این فرایند، یک

مسافت آزاد میانگین با چگالی ذرات و احتمال برهم‌کنش نسبت معکوس دارد. بنابراین، مواد با چگالی بالا یا برهم‌کنش‌های قوی، مسافت آزاد میانگین کوتاه‌تری نسبت به مواد با چگالی کمتر خواهند داشت. در شکل 4 همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش انرژی مقدار مسافت آزاد میانگین برای CIE-20 افزایش می‌یابد به این معنی است که پرتو مسافت بیشتری را طی می‌کند تا به احتمال برهم‌کنش کند.



شکل 4. مسافت آزاد میانگین برحسب انرژی نانو مواد منتخب



شکل 5. لایه نیم‌کننده برحسب انرژی نانو مواد منتخب لایه نیم‌کننده اندازمگیری ضخامت ماده مورد نیاز برای کاهش شدت پرتو تابشی به نصف مقدار اولیه آن است. لایه نیم‌کننده به عوامل مختلفی از جمله انرژی تابش، ترکیب اتمی و مولکولی ماده و چگالی مواد بستگی دارد. مواد با عدد اتمی بالا یا چگالی الکترونی بالا معمولاً ضخامت لایه نیم‌کننده کمتری نسبت به مواد با عدد اتمی کم یا چگالی الکترونی پایین دارند، این مقدار توسط رابطه زیر محاسبه می‌شود [36]:

$$HVL = \frac{\ln 2}{\mu} = \frac{0.693}{\mu} \quad (2)$$

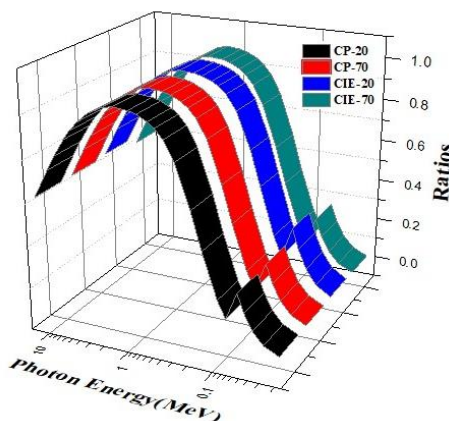
است. درحالی‌که، مقادیر این کمیت برای CIE-70 بیشتر از سایر نمونه‌ها است. این کمیت یک دید کلی از توانایی برهم‌کنش مواد می‌دهد. هر چقدر مسافت برهم‌کنش کمتر باشد، ضخامت حفاظ نیز کمتر خواهد بود.

با توجه به تفاسیر کمی بالا، نانولوله‌های کربن-پلاتین می‌توانند انتخاب مناسبی برای حفاظت در برابر کاربردهای پرتو گاما باشند. چرا که بسیار ارزان‌تر و سبک‌تر از سرب هستند و پایداری هیدرودینامیکی بالایی داشته و دارای استحکام فیزیکی و شیمیایی بالایی هستند. این نانولوله‌ها، علاوه بر انعطاف‌پذیری بالا، ذرات ثانویه تولید نمی‌کنند. همچنین، این نانولوله‌ها را در سیستم‌های ذخیره‌ساز مواد هیدروژنی استفاده می‌کنند، زیرا هیدروژن جاذب خوبی برای نوترون است.

5. منابع

- [1]. Teli MT, Mahajan CS, Nathuram R. Measurement of mass and linear attenuation coefficients of gamma-rays for various elements through aqueous solution of salts. 2001; 39(12): 816-824.
- [2]. Teli MT, Mahajan CS, Malode SS, Nathuram R. Measurement of mass attenuation coefficients of gamma-rays for various elements through aqueous solution of salts in the energy range 0.511-1.33 MeV. 2003; 41(7):570-574.
- [3]. Jackson DF, Hawkes D. X-ray attenuation coefficients of elements and mixtures. Physics Reports [Internet]. 1981; 70(3): 169-233. Available from: [https://doi.org/10.1016/0370-1573\(81\)90014-4](https://doi.org/10.1016/0370-1573(81)90014-4).
- [4]. Hine, G.J. (1952) The Effective Atomic Number of Materials for Various Gamma Ray Interactions. Phys. Rev., 85, 725. - References - Scientific Research Publishing [Internet]. Available from: [https://www.scirp.org/\(S\(lz5mqp453edsnp55rrgjt55.\)\)/reference/referencespapers.aspx?referenceid=1937222](https://www.scirp.org/(S(lz5mqp453edsnp55rrgjt55.))/reference/referencespapers.aspx?referenceid=1937222).
- [5]. Eshghi M. Investigation of radiation protection features of the $\text{TeO}_2\text{-B}_2\text{O}_3\text{-Bi}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O-NdCl}_3$ glass systems. Journal of Materials Science: Materials in Electronics [Internet]. 2020; 31(19):

فوتون با یک الکترون در ماده برهم‌کنش می‌کند و مقداری از انرژی خود را از دست می‌دهد و باعث می‌شود فوتون در جهت دیگری پراکنده شود. چون پراکندگی کامپتون در انرژی 0/1 تا 1/5 مگا الکترون‌ولت پدیده غالب است. به‌وضوح در شکل 7 مشاهده می‌شود که با افزایش انرژی، نمودار با شیب تندی افزایش می‌یابد و در انرژی 1 مگا الکترون‌ولت به حداکثر میزان خود می‌رسد و پس از آن با کاهش پراکندگی کامپتون با شیب زیادی به صفر میل می‌کند. به‌دلیل اثر فتوالکتریک در اطراف لبه‌ی جذب K پلاتین با انرژی 78/3948 کیلو الکترون‌ولت، یک قله قبل از قله اصلی مشاهده می‌شود. این به‌دلیل برابری انرژی فوتون فرودی با انرژی بستگی لایه‌ی K پلاتین بوده که موجب آزاد شدن الکترون لایه‌ی K می‌شود.



شکل 7. کسر برهم‌کنش‌های کامپتون به کل برهم‌کنش‌ها برای نانومواد منتخب

4. نتیجه‌گیری

این پژوهش، به‌منظور بررسی قابلیت محافظ نانولوله‌های کربن-پلاتین با استفاده از ابزار شبیه‌سازی Geant4 و کد XmuDat انجام شده است. مقادیر ارزیابی‌شده‌ی نتایج این دو برنامه مطابقت خوبی دارند. بنابراین، ابزار شبیه‌سازی Geant4 ابزار مناسب و قابل اعتمادی برای بررسی کمیت‌های برهم‌کنش پرتو گاما در سیستم‌های در حال توسعه است.

نتایج به‌دست آمده، نشان داد که تعداد نفوذ فوتون‌ها از نمونه‌ی CP-20 با ضخامت کمتر در انرژی‌های 1/333، 1/275 و 1/117 میلیون الکترون‌ولت رخ می‌دهد و توانایی فوتون‌ها برای نفوذ در نمونه‌ها با افزایش انرژی افزایش می‌یابد. مقادیر مسیر آزاد میانگین برای CP-20 کمتر از مقادیر سایر نمونه‌ها

- <https://doi.org/10.1080/03602559.2011.578297>.
- [12]. Abbas MI, El-Khatib AM, Elsafi M, El-Shimy SN, Dib MF, Abdellatif HM, et al. Investigation of Gamma-Ray Shielding Properties of Bismuth Oxide Nanoparticles with a Bentonite–Gypsum Matrix. *Materials* [Internet]. 2023; 16(5): 2056. Available from: <https://doi.org/10.3390/ma16052056>.
- [13]. Shahzad K, Kausar A, Manzoor S, Rakha SA, Uzair A, Sajid M, et al. Views on radiation shielding Efficiency of Polymeric Composites/Nanocomposites and Multi-Layered Materials: Current state and Advancements. *Radiation* [Internet]. 2022; 3(1): 1–20. Available from: <https://doi.org/10.3390/radiation3010001>.
- [14]. Hallad SA, Banapurmath NR, Bhadrakali AS, Patil AY, Hunashyal AM, Ganachari SV, et al. Nanoceramic composites for nuclear radiation attenuation. *Materials* [Internet]. 2021; 15(1): 262. Available from: <https://doi.org/10.3390/ma15010262>.
- [15]. Huang X, Wang J, Eres G, Wang X. Thermophysical properties of multi-wall carbon nanotube bundles at elevated temperatures up to 830K. *Carbon* [Internet]. 2011; 49(5): 1680–91. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2010.12.053>.
- [16]. Gościańska J, Ejsmont A, Kubiak A, Ludowicz D, Stasiłowicz A, Cielecka-Piontek J. Amine-Grafted mesoporous carbons as Benzocaine-Delivery platforms. *Materials* [Internet]. 2021; 14(9): 2188. Available from: <https://doi.org/10.3390/ma14092188>.
- [17]. Wang H, Li Z, Hong K, Chen M, Qiao Z, Yuan Z, et al. Property improvement of multi-walled carbon nanotubes/polypropylene composites with high filler loading via interfacial modification. *RSC Advances* [Internet]. 2019; 9(50): 29087–96. Available from: <https://doi.org/10.1039/c9ra05493f>.
- 16479–97. Available from: <https://doi.org/10.1007/s10854-020-04202-z>.
- [6]. Li J, Huang M, Hou R, Ouyang X. Photon attenuation coefficients of oxide dispersion strengthened steels by Geant4, XCOM and experimental data. *Radiation Physics and Chemistry* [Internet]. 2019; 161: 23–8. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2019.03.042>.
- [7]. Mahmoud KM, Rammah YS. Investigation of gamma-ray shielding capability of glasses doped with Y, Gd, Nd, Pr and Dy rare earth using MCNP-5 code. *Physica B: Condensed Matter* [Internet]. 2020; 577: 411756. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.physb.2019.411756>.
- [8]. Ahmed B, Shah GB, Malik AI, Aurangzeb, Rizwan M. Gamma-ray shielding characteristics of flexible silicone tungsten composites. *Applied Radiation and Isotopes* [Internet]. 2020; 155: 108901. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2019.108901>.
- [9]. Sayyed MI, Al-Ghamdi H, Almuqrin AH, Yasmin S, Elsafi M. A study on the gamma radiation protection effectiveness of Nano/Micro-MGO-Reinforced novel silicon rubber for medical applications. *Polymers* [Internet]. 2022; 14(14): 2867. Available from: <https://doi.org/10.3390/polym14142867>.
- [10]. Talley SJ, Robison T, Long A, Lee SY, Brounstein Z, Lee KS, et al. Flexible 3D printed silicones for gamma and neutron radiation shielding. *Radiation Physics and Chemistry* [Internet]. 2021; 188: 109616. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2021.109616>.
- [11]. Torres AHU, D’Almeida JRM, Habas J. Aging of HDPE pipes exposed to diesel lubricant. *Polymer-plastics Technology and Engineering* [Internet]. 2011; 50(15): 1594–9. Available from:

from:

<https://doi.org/10.3390/nano11040975>.

[25]. Huang L, Wei M, Qi R, Dong C, Dang D, Yang CC, et al. An integrated platinum-nanocarbon electrocatalyst for efficient oxygen reduction. *Nature Communications* [Internet]. 2022; 13(1). Available from: <https://doi.org/10.1038/s41467-022-34444-w>.

[26]. Lobo RFM, Alvarez NT, Shanov V. Hydrogen nanometrology in advanced carbon nanomaterial electrodes. *Nanomaterials* [Internet]. 2021; 11(5): 1079. Available from: <https://doi.org/10.3390/nano11051079>.

[27]. Akbari E, Buntat Z. Benefits of using carbon nanotubes in fuel cells: a review. *International Journal of Energy Research* [Internet]. 2016; 41(1): 92–102. Available from: <https://doi.org/10.1002/er.3600>.

[28]. Baruah B, Deb P. Performance and application of carbon-based electrocatalysts in direct methanol fuel cell. *Materials Advances* [Internet]. 2021; 2(16): 5344–64. Available from: <https://doi.org/10.1039/d1ma00503k>.

[29]. Luo C, Xie H, Wang Q, Geng L, Liu C. A review of the application and performance of carbon nanotubes in fuel cells. *Journal of Nanomaterials* [Internet]. 2015; 2015: 1–10. Available from: <https://doi.org/10.1155/2015/560392>.

[30]. Jalili S, Jaber A, Mahjani MG, Jafarian M. Study of hydrogen self-diffusion in Platinum/Palladium decorated Single-Walled carbon nanotubes using molecular dynamics simulations. *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience* [Internet]. 2009; Available from: <https://doi.org/10.1166/jctn.2009.1158>.

[31]. Suzuki T, Miyauchi T, Hayase M, Tsushima S. Composition and evaluation of single-layer electrode proton exchange membrane fuel cells for mass transfer analysis. *Journal of Thermal Science and Technology* [Internet]. 2016; 11(3):

[18]. Wang J, Stupp SI, Hersam MC. Enrichment of Single-Walled carbon nanotubes by diameter in density gradients. *Nano Letters* [Internet]. 2005; 5(4): 713–8. Available from: <https://doi.org/10.1021/nl050133o>.

[19]. Peng J, He Y, Zhou C, Su S, Lai B. The carbon nanotubes-based materials and their applications for organic pollutant removal: A critical review. *Chinese Chemical Letters* [Internet]. 2021; 32(5): 1626–36. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.cclet.2020.10.026>.

[20]. Sharma A. Investigation on platinum loaded multi-walled carbon nanotubes for hydrogen storage applications. *International Journal of Hydrogen Energy* [Internet]. 2020; 45(4): 2967–74. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.11.093>.

[21]. Pajootan E, Omanovic S, Coulombe S. Controllable dry synthesis of binder-free nanostructured platinum electrocatalysts supported on multi-walled carbon nanotubes and their performance in the oxygen reduction reaction. *Chemical Engineering Journal* [Internet]. 2021; 426: 131706. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.131706>.

[22]. Gurylev V, Chin TS, Tsai H. Carbon Nanotubes Decorated with Platinum Nanoparticles for Field-Emission Application. *ACS Omega* [Internet]. 2019; 4(13): 15428–34. Available from: <https://doi.org/10.1021/acsomega.9b01478>.

[23]. Nagelli EA, Burpo FJ, Marbach DA, Romero AN, Rabbia DJ, Mahr HW, et al. Scalable Carbon Nanotube/Platinum Nanoparticle Composite Inks from Salt Templates for Oxygen Reduction Reaction Electrocatalysis for PEM Fuel Cells. *Journal of Composites Science* [Internet]. 2020; 4(4): 160. Available from: <https://doi.org/10.3390/jcs4040160>.

[24]. Lobo RFM, Ribeiro JHF, Inok F. Hydrogen uptake and release in carbon nanotube electrocatalysts. *Nanomaterials* [Internet]. 2021; 11(4): 975. Available

- JTST0043. Available from: <https://doi.org/10.1299/jtst.2016jtst0043>.
- [32]. Groves MN, Chan ASW, Malardier-Jugroot C, Jugroot M. Optimising the platinum-carbon bond in nitrogen-doped single-walled carbon nanotubes. *Molecular Simulation* [Internet]. 2011; 37(8): 663–9. Available from: <https://doi.org/10.1080/08927020903483304>.
- [33]. Tang C, Bando Y, Huang Y, Yue S, Gu C, Xu F, et al. Fluorination and electrical conductivity of BN nanotubes. *Journal of the American Chemical Society* [Internet]. 2005; 127(18): 6552–3. Available from: <https://doi.org/10.1021/ja042388u>.
- [34]. Allison J, Amako K, Apostolakis J, Araújo HM, Dubois PA, Asai M, et al. Geant4 developments and applications. *IEEE Transactions on Nuclear Science* [Internet]. 2006; 53(1): 270–8. Available from: <https://doi.org/10.1109/tns.2006.869826>.
- [35]. Arvaneh A, Asadi AA, Hosseini SA. Sensitivity analysis of gamma-ray shielding characteristics to the TiO_2 concentration in the $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-ZnO-Pb}_3\text{O}_4\text{-Al}_2\text{O}_3$ glass sample based on the Monte Carlo method. *Progress in Nuclear Energy* [Internet]. 2023; 156: 104539. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2022.104539>.
- [36]. Hassanpour M, Hassanpour M, Khandaker MU, Faruque MRI, Alshahrani B, Osman H. An alternative method for calculation of half-value layers without the knowledge of attenuation coefficient. *Applied Radiation and Isotopes* [Internet]. 2023; 199: 110910. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2023.110910>.

Evaluation of carbon-platinum nanotubes in the performance of gamma-ray shields

M.R. Alipoor and M. Eshghi *

Department of Physics, Imam Hossein Comprehensive University, Tehran, Iran

Abstract: In this study, we have evaluated gamma ray and neutron shielding of platinum carbon nanotubes using Geant4 Monte Carlo simulator in the photon energy range of 0.015 to 15 MeV.

We have calculated the mass attenuation coefficient, the half value layer, the tenth value layer, the mean free path and the ratio of the linear attenuation coefficient of Compton scattering to the total linear attenuation coefficient and the remove cross section of fast neutrons, which is necessary to check the performance of a shield for these parameters. XMuDat program was used to validate the data. The Geant4 results are in good agreement with the values obtained from the XMuDat program. We have also analyzed them. Finally, the results obtained for nanomaterials have been depicted in suitable forms. At the end, suggestions for using these nanomaterials in places where there are restrictions on weight, mechanical stability and strength are given.

Corresponding Author email: eshgi54@gmail.com; meshghi@ihu.ac.ir