

## محاسبه‌ی ضرایب انباشت چشمه‌ی گاما با طیف انرژی پیوسته برای آب، آهن و سرب به وسیله‌ی کد مونت کارلو

مصطفی محمدرفیعی\* و حسین توکلی‌عنبران

دانشکده فیزیک و مهندسی هسته‌ای، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، سمنان، ایران.  
\*سمنان، شاهرود، دانشگاه صنعتی شاهرود، دانشکده فیزیک و مهندسی هسته‌ای، کد پستی: ۳۶۱۹۹-۹۵۱۶۱  
پست الکترونیکی: mustafa.m.rafieei@gmail.com

### چکیده

ضریب انباشت عامل مهمی در تعیین ضخامت حفاظ پرتوهای گاما و ایکس می‌باشد به نحوی که بدون در نظر گرفتن این ضریب ضخامت حفاظ کم‌تر از آن چیزی که مورد انتظار است، اندازه‌گیری شده و منجر به خطرات پرتوگیری بیش از حد کارکنان و یا بیماران می‌شود. با توجه به اینکه ضریب انباشت برای چشمه‌های نقطه‌ای همگن تک انرژی محاسبه شده است اما محاسبه‌ی این ضریب برای چشمه‌هایی با طیف انرژی پیوسته از طریق کد مونت کارلو MCNPX تاکنون مورد بررسی قرار نگرفته است. در این مطالعه سعی بر این است که تفاوت ضریب انباشت ناشی از چشمه‌ای با طیف انرژی پیوسته در مقایسه با چشمه‌ای تک انرژی بررسی شود. بنابراین ضریب انباشت پرتوگیری چشمه‌ای با طیف انرژی پیوسته با انرژی بیشینه‌ی ۱ مگا الکترون‌ولت (یک طیف انرژی نمونه) با چشمه‌ای تک انرژی با انرژی ۱ مگا الکترون‌ولت برای حفاظ آب، آهن و سرب تا ۱۰ مسیر آزاد میانگین مورد محاسبه قرار گرفته و تفاوت چشمگیری در مقادیر به دست آمده مشاهده شده است. به نحوی که اختلاف نسبی بین ضریب انباشت پرتوگیری ناشی از چشمه‌ی تک انرژی و چشمه‌ای با طیف انرژی پیوسته به ازای ۱ تا ۱۰ مسیر آزاد میانگین برای آب به ترتیب از ۳۸٪ تا ۳۹٪، برای آهن به ترتیب از ۱۷٪ تا ۳۰٪ و برای سرب به ترتیب از ۸٪ تا ۵۰٪ است. بر همین اساس در راستای محاسبه‌ی ضخامت حفاظ برای چشمه‌هایی با طیف انرژی پیوسته باید تمایز اساسی با چشمه‌های تک انرژی در نظر گرفته شود.

کلید واژگان: ضریب انباشت پرتوگیری، طیف انرژی پیوسته، کد MCNPX، تکنیک کاهش واریانس، تکثیر ذرات.

### ۱. مقدمه

حفاظ‌گذاری پرتوی ایکس و گاما از مسائل بسیار مهم در نجات و حفظ بافت‌های زنده است. در مسائل حفاظ‌گذاری برای پرتوهای فوتون یون‌ساز، از جمله پرتو ایکس و گاما، تعیین ماده‌ی حفاظ مناسب و همچنین ضخامت دقیق آن ماده بسیار اهمیت دارد به نحوی که یکی از پارامترهای مهم و تأثیرگذار در تعیین حفاظ با ضخامت مناسب ضریب انباشت می‌باشد. ضریب انباشت نسبت کمیت مورد نظر ناشی از تعداد کل فوتون‌ها در یک نقطه به کمیت مورد نظر ناشی از فقط

فوتون‌های پراکنده نشده در همان نقطه تعریف می‌شود [۲۰۱]. این کمیت مورد نظر می‌تواند تعداد ذرات، انرژی ذخیره شده در محیط و یا دز تابشی باشد. بر همین اساس ضرایب انباشت متفاوتی تعریف می‌شوند از جمله ضریب انباشت تعداد ذرات، ضریب انباشت پرتوگیری و ضریب انباشت دز.

از نقطه نظر تاریخی ضریب انباشت ابتدا در سال ۱۹۵۴ میلادی محاسبه شد [۳] و پس از آن تحقیقات گسترده‌ای در خصوص چگونگی و نحوه محاسبه‌ی این ضریب توسط محققان آغاز شد و نتیجه‌ی آن مطالعات، تهیه‌ی یک استاندارد بین‌المللی در کشور آمریکا به نام (ANSI/ANS-6.4.3) است [۴]. البته امروزه این استاندارد به علت نقاط ضعفی که در داده‌های سطح مقطع داشت از رده خارج شده است اما همچنان به‌عنوان یک منبع نسبتاً خوب برای مقایسه‌ی نتایج محاسبات مربوط به ضریب انباشت مورد استفاده قرار می‌گیرد. البته برای بهبود محاسبات مربوط به ضریب انباشت این استاندارد، کارهای متعددی انجام شده است [۶۰ و ۶۱]. در بسیاری از تحقیقات گذشته ضریب انباشت برای یک چشمه‌ی نقطه‌ای همگن تک انرژی پرتوی گاما مورد مطالعه قرار گرفته است [۷-۱۰]. اما تمام چشمه‌های پرتو گاما تک انرژی نیستند و ممکن است با طیف انرژی پیوسته سرکار داشته باشیم از جمله در پژوهش‌های مربوط به طراحی چشمه‌ی فوتونوترون با استفاده از الکترون‌های شتابدهنده‌ی خطی، فوتون‌هایی با طیف انرژی پیوسته احتیاج است [۱۱ و ۱۲ و ۱۳]. این فوتون‌ها در اثر برخورد الکترون‌های پرتوگیری که از شتابدهنده خارج شده و به یک هدف با عدد اتمی بالا مانند تنگستن برخورد می‌کنند، به‌وجود می‌آیند (که به این فرآیند تابش برمشتراالانگ گفته می‌شود) و در نهایت این فوتون‌ها با برخورد به هدف‌هایی به نام هدف فوتونوترون مانند برلیوم و دوتریوم منجر به تولید شار نوترون می‌شوند. در این صورت ضرایب انباشت محاسبه شده برای چشمه‌های گامای تک انرژی به منظور تعیین ضخامت مناسب

حفاظ به کار نمی‌آیند. در این پژوهش سعی شده است تا ضرایب انباشت پرتوگیری برای یک چشمه‌ی نقطه‌ای همگن با طیف انرژی پیوسته (یک طیف نمونه با بیشینه انرژی ۱ مگا الکترون‌ولت) به‌وسیله‌ی کد MCNPX 2.6 [۱۴] برای حفاظ آب، آهن و سرب تا عمق ۱۰ مسیر آزاد میانگین محاسبه شود. همچنین مقایسه‌ای بین ضرایب انباشت ناشی از چشمه‌ی پیوسته‌ی ذکر شده و چشمه‌ی تک انرژی ۱ مگا الکترون‌ولت انجام شده است که در این مقایسه تفاوت چشمگیری در ضرایب انباشت محاسبه شده، مشاهده شده است. همچنین به منظور اعتبار سنجی محاسبات ضرایب انباشت پرتوگیری برای یک چشمه‌ی گامای تک انرژی ۱ مگا الکترون‌ولتی محاسبه و نتایج آن با کار دیگران مقایسه شده است که در این مقایسه همخوانی قابل قبولی برای تمامی مواد حفاظ به کار گرفته شده در این کار مشاهده می‌شود.

## ۲. تئوری

همانطور که می‌دانید نفوذ پرتوهای گاما از رابطه‌ی نمایی ذیل پیروی می‌کند [۱۵۱].

$$\varphi = B(E, \mu x) \varphi_0 \exp(-\mu x) \quad (1)$$

که  $\varphi$  و  $\varphi_0$  به ترتیب شار کل و شار اولیه فوتون‌ها می‌باشند،  $B$  ضریب انباشت،  $E$  انرژی فوتون‌ها برحسب مگاالکترون-ولت،  $\mu$  ضریب تضعیف خطی کل برحسب  $\text{cm}^{-1}$ ،  $x$  ضخامت برحسب  $\text{cm}$  می‌باشد. در این صورت ضریب انباشت تابعی همزمان از انرژی فوتون‌ها و فاصله‌ی پیموده شده برحسب مسافت آزاد میانگین آن‌ها در ماده می‌باشد. می‌توان فاصله‌ی پیموده شده را بر حسب مسافت آزاد میانگین به‌صورت زیر نوشت:

$$\text{mfp} = \mu x \quad (2)$$

$$B_E(E_0, r) = \frac{\int_0^{E_{\max}} \varphi(r, E) E \mu_a^{air}(E) dE}{\int_0^{E_{\max}} \varphi_u(r, E) E \mu_a^{air}(E) dE} \quad (6)$$

به دلیل اینکه کد MCNPX شار گسسته‌ای از کل فوتون‌ها و همچنین فوتون‌های ناپراکنده در اختیار کاربر قرار می‌دهد رابطه‌ی ۶ باید به صورت زیر بازنویسی شود تا بتوان ضریب انباشت پرتوگیری ناشی از یک طیف پیوسته‌ی پرتوی گاما را محاسبه کرد.

$$B_E = \frac{\sum_{g=1}^G \varphi_g \times \bar{E}_g \times \mu_a^{air}(\bar{E}_g)}{\sum_{g=1}^G \varphi_{ug} \times \bar{E}_{ug} \times \mu_a^{air}(\bar{E}_{ug})} \quad (7)$$

که G تعداد گروه‌های انرژی،  $\varphi_g$  و  $\varphi_{ug}$  به ترتیب شار کل و شار فوتون‌های ناپراکنده با انرژی بین  $E_{g-1}$  و  $E_g$  می‌باشد.  $\bar{E}_g$  و  $\bar{E}_{ug}$  انرژی میانگین گروه شار فوتون‌های کل و ناپراکنده می‌باشد. در نهایت به منظور محاسبه‌ی خطای انتشار یافته‌ی ضریب انباشت پرتوگیری، رابطه‌ی گسترش خطا بر اساس رابطه‌ی ۷ به صورت زیر نوشته می‌شود.

$$\sigma_{B_E}^2 = \left( \frac{\partial B_E}{\partial \varphi_g} \right)^2 \sigma_{\varphi_g}^2 + \left( \frac{\partial B_E}{\partial \varphi_{ug}} \right)^2 \sigma_{\varphi_{ug}}^2 \quad (8)$$

که  $\sigma_{B_E}$ ،  $\sigma_{\varphi_g}$  و  $\sigma_{\varphi_{ug}}$  به ترتیب خطای ضریب انباشت، خطای  $\varphi_g$  و  $\varphi_{ug}$  می‌باشد.

### ۳. روش انجام کار

در این تحقیق برای محاسبه‌ی ضریب انباشت پرتوگیری ناشی از چشمه‌ی نقطه‌ای تک انرژی و چشمه‌ی نقطه‌ای با طیف انرژی پیوسته به ترتیب از روابط ۴ و ۷ به همراه تالی F2 استفاده شده و برای یافتن شار پرتوهای فوتونی که بدون برخورد از محیط عبور می‌کنند از کارت‌های FT، FU، C و E

ضریب تضعیف خطی کل، کمیتی است که از ماده‌ای به ماده‌ی دیگر تفاوت می‌کند. این ضریب شامل ۱۲ نوع برهمکنش متفاوت است [۱۶] که در این جا به صورت حاصل جمع ۴ نوع برهمکنش غالب در نظر گرفته شده است.

$$\mu = \mu_{pe} + \mu_{coh} + \mu_{incoh} + \mu_{pair} \quad (3)$$

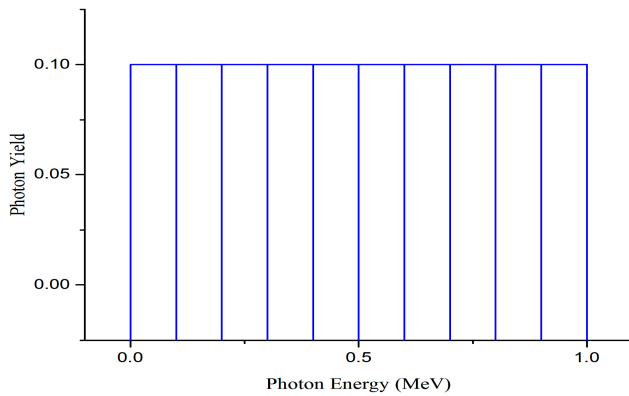
که  $\mu_{pe}$ ،  $\mu_{coh}$ ،  $\mu_{incoh}$  و  $\mu_{pair}$  به ترتیب ضریب تضعیف ناشی از پدیده‌ی فوتوالکتریک، پراکندگی همدوس (ریلی)، پراکندگی ناهمدوس (کامپتون) و تولید زوج می‌باشند. همان‌طور که در بخش قبل اشاره شد ضریب انباشت بر اساس نوع کمیت مورد نظر متفاوت است که در این مطالعه کمیت مورد نظر پرتوگیری می‌باشد و در نتیجه در این کار ضریب انباشت پرتوگیری محاسبه شده است. رابطه‌ی ریاضی ضریب انباشت پرتوگیری برای چشمه‌ای نقطه‌ای همگن و تک انرژی بصورت زیر می‌باشد [۱۷].

$$B_E(E_0, r) = \frac{\int_0^{E_0} \varphi(r, E) E \mu_a^{air}(E) dE}{\varphi_0 \exp(-\mu r) \mu_a^{air}(E_0) E_0} \quad (4)$$

که  $\mu_a^{air}$  ضریب جذب خطی هوا بر حسب  $\text{cm}^{-1}$  می‌باشد. در این صورت شار فوتون‌های پراکنده نشده ( $\varphi_u$ ) را نیز می‌توان به صورت زیر نوشت.

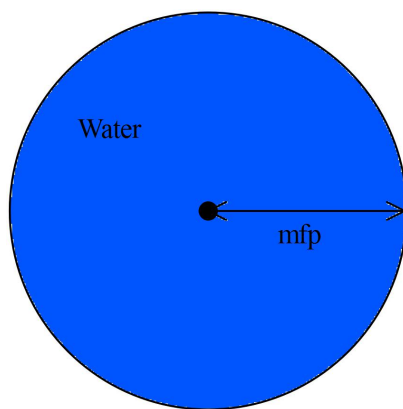
$$\varphi_u = \varphi_0 \exp(-\mu r) = \left( \frac{S}{4\pi r^2} \right) \exp(-\mu r) \quad (5)$$

که S قدرت چشمه بر حسب فوتون بر ثانیه می‌باشد. چون در این مطالعه هدف تحقیق محاسبه‌ی ضریب انباشت پرتوگیری برای چشمه‌ای با طیف انرژی پیوسته (از انرژی صفر تا انرژی بیشینه‌ی  $E_{\max} = 1\text{MeV}$  همانطور که در شکل ۱ ملاحظه می‌شود) است، پس باید رابطه‌ی ۴ را به صورت زیر بازنویسی کرد.



شکل (۱): طیف انرژی پیوسته فوتون‌ها (یک طیف نمونه بهنجار شده)

شبیه‌سازی شده توسط کد MCNPX.



شکل (۲): هندسه‌ی حفاظ آب و چشمه‌ی نقطه‌ای گاما (در مرکز کره)

را نشان می‌دهد که شعاع کره‌ی آب براساس مسافت آزاد میانگین

(mfp) پرتوهای گاما تعیین می‌شود.

جدول (۱): ضریب تضعیف خطی کل آب، آهن و سرب به ازای انرژی

۱ مگاالکترون‌ولت [۱۸] و فاصله‌ی پیموده شده‌ی متناظر برای ۱ مسیر

آزاد میانگین.

نوع ماده	ضریب تضعیف خطی کل (cm <sup>-1</sup> )	فاصله‌ی پیموده شده (cm)
آب	۰/۰۷۰۵۹	۱۴/۱۶۵۶۷
آهن	۰/۴۷۲۰۴۶۳	۲/۱۱۸۴۴
سرب	۰/۸۰۶۰۷۷	۱/۲۴۰۵۸

در جدول‌های ۲، ۳ و ۴ ضرایب انباشت پرتوگیری محاسبه شده براساس طیف انرژی شکل ۱، به ترتیب برای آب، آهن و سرب ملاحظه می‌شوند. در این جدول‌ها ضرایب انباشت برای

استفاده شده است. همانطور که در شکل ۲ ملاحظه می‌شود برای انجام محاسبات مربوط به ضریب انباشت مواد حفاظ (آب، آهن و سرب) به صورت کره‌هایی با شعاع‌های مشخص (فاصله‌ی پیموده شده برحسب مسافت آزاد میانگین) در نظر گرفته شده‌اند به صورتی که تالی F2 روی سطح این کره‌ها، شار کل فوتون‌ها و شار فوتون‌هایی که بدون برخورد از ماده‌ی حفاظ عبور کرده‌اند را محاسبه می‌کند. همچنین در این بررسی به منظور اعتبارسنجی محاسبات، ضریب انباشت پرتوگیری برای یک چشمه‌ی تک انرژی ۱ مگاالکترون‌ولت محاسبه شده و نتایج آن با کار دیگران [۴ و ۵] مقایسه و توافق خوبی مشاهده شده است. داده‌های سطح مقطع مورد استفاده در این محاسبات برای ضریب تضعیف خطی کل آب، آهن و سرب، و ضریب جذب خطی هوا به ترتیب از ENDF/B-VI [۱۴] و NIST-XCOM [۱۸] استخراج شده است. همچنین باید متذکر شد که استفاده از کدهای هسته‌ای که بر مبنای روش مونت کارلو بصورت آنالوگ (بدون استفاده از روش‌های کاهش واریانس) برای محاسبات مربوط به ضریب انباشت کار می‌کنند برای رسیدن به خطای مطلوب و قابل اطمینان زمان بسیار زیادی را از کاربر می‌گیرند. تنها راه نجات از این وضعیت ناگوار استفاده صحیح از روش‌های کاهش واریانس می‌باشد. روش کاهش واریانس که در اینگونه مسائل بسیار مؤثر عمل کرده است روش کاهش واریانس تکثیر ذرات (Particle Splitting) می‌باشد [۱۹ و ۲۰] که در این کار نیز از همین روش کاهش واریانس استفاده شده است. در همین راستا در شکل ۱ می‌توان طیف انرژی پیوسته چشمه‌ی مورد نظر برای محاسبه‌ی ضریب انباشت پرتوگیری را ملاحظه کرد. این طیف انرژی به‌عنوان یک طیف انرژی نمونه مورد بررسی قرار گرفته است. برای یکسان بودن شرایط مسئله طول ۱ مسیر آزاد میانگین متناظر با انرژی ۱ مگاالکترون‌ولت براساس داده‌های ضریب تضعیف خطی کل آب، آهن و سرب در جدول ۱ آورده شده‌اند.

جدول (۳): ضرایب انباشت پرتوگیری برای آهن براساس طیف انرژی شکل ۱ و مقایسه با ضرایب انباشت چشمه‌ی تک انرژی ۱ مگاالکترون-ولت [۵و۴].

مرجع [۴]	مرجع [۵]	کار حاضر، چشمه		mfp
		تک انرژی ۱ مگا الکترون ولت	با طیف پیوسته براساس شکل ۱	
۱/۸۵	۱/۸۸	۱/۸۶۰۰ ± ۰/۰۰۰۶	۲/۱۸۰ ± ۰/۰۰۲	۱
۲/۸۵	۲/۸۹	۲/۸۵۰۰ ± ۰/۰۰۰۹	۳/۵۱۰ ± ۰/۰۰۳	۲
۴/۰۰	۴/۰۵	۴/۰۱۰ ± ۰/۰۰۱	۵/۰۳۰ ± ۰/۰۰۴	۳
۵/۳۰	۵/۳۵	۵/۳۱۰ ± ۰/۰۰۲	۶/۷۴۰ ± ۰/۰۰۶	۴
۶/۷۴	۶/۸۰	۶/۷۶۰ ± ۰/۰۰۳	۸/۶۳۰ ± ۰/۰۰۸	۵
۸/۳۱	۸/۳۸	۸/۳۶۰ ± ۰/۰۰۴	۱۰/۶۶ ± ۰/۰۱	۶
۱۰/۰	۱۰/۱	۱۰/۰۶۰ ± ۰/۰۰۵	۱۲/۹۰ ± ۰/۰۱	۷
۱۱/۸	۱۱/۹	۱۱/۸۵۰ ± ۰/۰۰۷	۱۵/۲۵ ± ۰/۰۲	۸
۱۵/۸	۱۵/۹	۱۵/۷۵ ± ۰/۰۱	۲۰/۴۳ ± ۰/۰۲	۱۰

جدول (۴): ضرایب انباشت پرتوگیری برای سرب براساس طیف انرژی شکل ۱ و مقایسه با ضرایب انباشت چشمه‌ی تک انرژی ۱ مگاالکترون-ولت [۵و۴].

مرجع [۴]	مرجع [۵]	کار حاضر، چشمه		mfp
		تک انرژی ۱ مگا الکترون ولت	با طیف پیوسته براساس شکل ۱	
۱/۳۸	۱/۳۷	۱/۳۷۰۰ ± ۰/۰۰۰۴	۱/۴۸۰۰ ± ۰/۰۰۰۹	۱
۱/۶۸	۱/۶۷	۱/۶۷۰۰ ± ۰/۰۰۰۵	۱/۸۷۰ ± ۰/۰۰۱	۲
۱/۹۵	۱/۹۵	۱/۹۵۰۰ ± ۰/۰۰۰۷	۲/۲۵۰ ± ۰/۰۰۲	۳
۲/۱۹	۲/۲۰	۲/۲۰۰۰ ± ۰/۰۰۰۸	۲/۶۴۰ ± ۰/۰۰۲	۴
۲/۴۳	۲/۴۴	۲/۴۳۰ ± ۰/۰۰۱	۳/۰۳۰ ± ۰/۰۰۲	۵
۲/۶۶	۲/۶۷	۲/۶۶۰ ± ۰/۰۰۱	۳/۴۳۰ ± ۰/۰۰۳	۶
۲/۸۹	۲/۹۰	۲/۸۸۰ ± ۰/۰۰۲	۳/۸۵۰ ± ۰/۰۰۳	۷
۳/۱۰	۳/۱۱	۳/۰۸۰ ± ۰/۰۰۲	۴/۲۹۰ ± ۰/۰۰۴	۸
۳/۵۱	۳/۵۲	۳/۴۸۰ ± ۰/۰۰۳	۵/۲۱۰ ± ۰/۰۰۵	۱۰

این وابستگی را در محاسبه‌ی ضریب انباشت پرتوگیری در روابط ۴ و ۶ نشان داده شده است و ضرایب جذب جرمی هوا که در این محاسبات استفاده شده‌اند را می‌توانید در جدول ۵

حفاظ آب، آهن و سرب تا عمق ۱۰ مسیر آزاد میانگین هم برای طیف پیوسته‌ی شکل ۱ و هم برای چشمه‌ی تک انرژی ۱ مگاالکترون ولت محاسبه شده‌اند. همچنین به منظور اعتبارسنجی، محاسبات مربوط به چشمه‌ی تک انرژی با کار دیگران [۵و۴] مقایسه شده که هم‌خوانی خوبی را نشان می‌دهند. خطای ضریب انباشت پرتوگیری بر اساس رابطه‌ی انتشار خطا محاسبه شده که بیشینه خطا در این محاسبات کم‌تر از ۱ درصد می‌باشد و مقادیر خطای انتشار یافته برای ضرایب انباشت پرتوگیری در جداول ذکر شده است.

دلیل اصلی به‌وجود آمدن چنین اختلاف چشمگیری بین ضرایب انباشت پرتوگیری محاسبه شده از یک چشمه‌ی تک انرژی گاما با ضرایب انباشت پرتوگیری محاسبه شده از یک چشمه‌ی پیوسته‌ی گاما این است که ضریب تضعیف جرمی کل مواد (از جمله آب، آهن و سرب) و همچنین ضریب جذب جرمی هوا به شدت به انرژی فوتون‌ها وابسته هستند.

جدول (۲): ضرایب انباشت پرتوگیری برای آب براساس طیف انرژی شکل ۱ و مقایسه با ضرایب انباشت چشمه‌ی تک انرژی ۱ مگاالکترون-ولت [۵و۴].

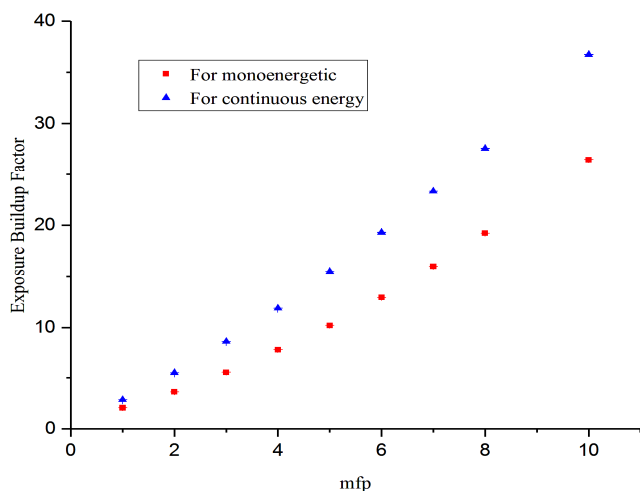
مرجع [۴]	مرجع [۵]	کار حاضر، چشمه		mfp
		تک انرژی ۱ مگا الکترون ولت	با طیف پیوسته براساس شکل ۱	
۲/۰۸	۲/۰۸	۲/۰۶۰۰ ± ۰/۰۰۰۲	۲/۸۵۰۰ ± ۰/۰۰۰۸	۱
۳/۶۲	۳/۶۳	۳/۶۲۰ ± ۰/۰۰۰۲	۵/۴۹۰ ± ۰/۰۰۲	۲
۵/۵۰	۵/۵۳	۵/۵۳۰ ± ۰/۰۰۰۳	۸/۵۵۰ ± ۰/۰۰۳	۳
۷/۶۸	۷/۷۲	۷/۷۴۰ ± ۰/۰۰۰۵	۱۱/۹۰۰ ± ۰/۰۰۴	۴
۱۰/۱	۱۰/۲	۱۰/۲۱۰۰ ± ۰/۰۰۰۷	۱۵/۴۷۰ ± ۰/۰۰۵	۵
۱۲/۸	۱۲/۹	۱۲/۹۵۰۰ ± ۰/۰۰۰۹	۱۹/۲۸۰ ± ۰/۰۰۷	۶
۱۵/۸	۱۵/۹	۱۵/۹۵۰ ± ۰/۰۰۱	۲۳/۳۱ ± ۰/۰۱	۷
۱۹/۰	۱۹/۱	۱۹/۲۱۰ ± ۰/۰۰۲	۲۷/۵۶ ± ۰/۰۱	۸
۲۶/۱	۲۶/۲	۲۶/۴۷۰ ± ۰/۰۰۲	۳۶/۷۴ ± ۰/۰۰۲	۱۰

مشاهده کنید. بر این اساس انتظار می‌رود که ضرایب انباشت محاسبه شده ناشی از چشمه‌ای با طیف انرژی پیوسته در مقایسه با ضرایب انباشت ناشی از چشمه‌ی تک انرژی متفاوت باشند.

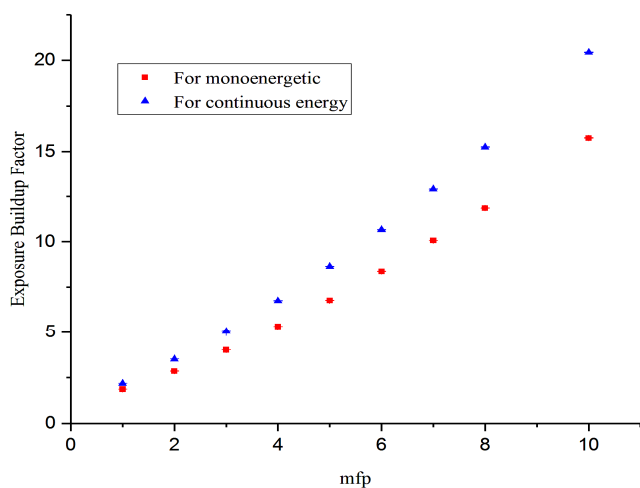
به‌منظور مقایسه‌ی بهتر بین ضرایب انباشت پرتوگیری حاصل از چشمه‌ی تک انرژی گاما ۱ مگاالکترون‌ولت و چشمه‌ی پیوسته گاما براساس طیف نشان داده شده در شکل ۱، این ضرایب در شکل‌های ۳، ۴ و ۵ به‌ترتیب برای آب، آهن و سرب نشان داده شده‌اند.

جدول (۵): ضرایب جذب جرمی هوا [۱۸].

انرژی (MeV)	ضریب جذب جرمی (cm <sup>2</sup> /g)
۰/۰۰۱	۳۵۹۹
۰/۰۱۵	۱۱۸۸
۰/۰۰۲	۵۲۶۲
۰/۰۰۳	۱۶۱/۴
۰/۰۰۴	۷۶/۳۶
۰/۰۰۵	۳۹/۳۱
۰/۰۰۶	۲۲/۷۰
۰/۰۰۸	۹/۴۴۶
۰/۰۱	۴/۷۴۲
۰/۰۱۵	۱/۳۳۴
۰/۰۲	۰/۵۳۸۹
۰/۰۳	۰/۱۵۳۷
۰/۰۴	۰/۰۶۸۳۳
۰/۰۵	۰/۰۴۰۹۸
۰/۰۶	۰/۰۳۰۴۱
۰/۰۸	۰/۰۲۴۰۷
۰/۱	۰/۰۲۳۲۵
۰/۱۵	۰/۰۲۴۹۶
۰/۲	۰/۰۲۶۷۲
۰/۳	۰/۰۲۸۷۲
۰/۴	۰/۰۲۹۴۹
۰/۵	۰/۰۲۹۶۶
۰/۶	۰/۰۲۹۵۳
۰/۸	۰/۰۲۸۸۲
۱	۰/۰۲۷۸۹



شکل (۳): ضرایب انباشت پرتوگیری محاسبه شده در کار حاضر برای آب به ازای چشمه‌ی با طیف پیوسته (مثلث توپر) و برای چشمه‌ی تک انرژی (مربع توپر).

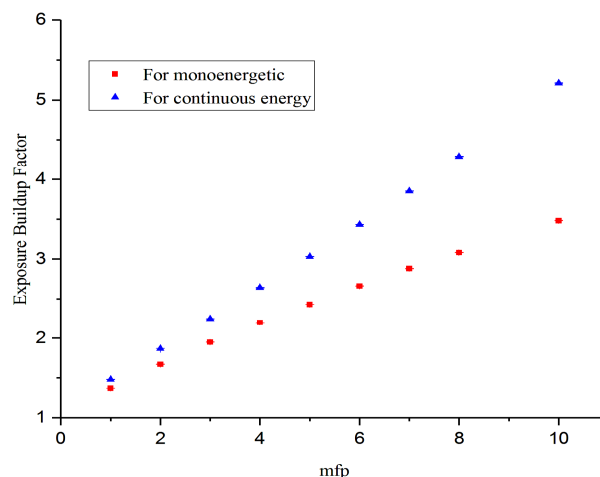


شکل (۴): ضرایب انباشت پرتوگیری محاسبه شده در کار حاضر برای آهن به ازای چشمه‌ی با طیف پیوسته (مثلث توپر) و برای چشمه‌ی تک انرژی (مربع توپر).

هستند پس بنابراین، اینکه از چه سطح مقطعی از لحاظ به روز بودن و دقیق بودن استفاده شود، تأثیر چشمگیری بر محاسبه‌ی دقیق ضریب انباشت خواهد داشت که خود این مسئله منجر به تفاوت در مقادیر محاسبه شده توسط محققان مختلف می‌شود. دلیل دوم: امروزه ضریب انباشت به روش‌های متفاوتی محاسبه می‌شود، بطور مثال: Invariant embedding [۹ و ۸ و ۵]، G-P fitting [۲۱]، مونت کارلو [۱۹ و ۲۰] و غیره.

بنابراین تفاوت در این روش‌ها نیز می‌تواند منجر به تفاوت در محاسبه‌ی ضرایب انباشت شود بنابراین براساس نتایج به دست آمده در جداول ۲، ۳ و ۴ نتیجه می‌شود که ضرایب انباشت پرتوگیری برای یک چشمه با طیف انرژی پیوسته در مقایسه با یک چشمه تک انرژی با شرایط یکسان از نظر نوع ماده حفاظ و همین‌طور ضخامت حفاظ، تفاوت چشمگیری با یکدیگر دارند. بر اساس آنچه که در بخش قبل گفته شد، دلیل اصلی به وجود آمدن چنین اختلاف چشمگیری تنها وابستگی ضرایب تضعیف و جذب فوتون‌ها در مواد به انرژی فوتون‌ها می‌باشد و زمانی که ضرایب انباشت برای یک طیف پیوسته محاسبه می‌شود هر کدام از فوتون‌ها انرژی متفاوتی دارند بنابراین نحوه‌ی تضعیف و یا جذبشان در مواد مختلف، متفاوت خواهد بود. بنابراین، این تفاوت معنادار باید در محاسبه‌ی ضخامت حفاظ به منظور حفظ سلامت کارکنان و یا بیماران در نظر گرفته شود. همچنین این پژوهش نشان می‌دهد که کد مونت کارلو MCNPX به‌خوبی توانایی محاسبه‌ی ضرایب انباشت پرتوگیری، هم ناشی از چشمه‌های گامای تک انرژی و هم چشمه‌های گاما با طیف انرژی پیوسته را دارا می‌باشد.

در اینجا خوب است که ذکر شود در یک کار پژوهشی دیگر، توانایی کد MCNPX در محاسبه‌ی ضرایب انباشت پرتوگیری برای فوتون‌هایی با انرژی ۵ و ۱۰ مگاالکترون‌ولت مورد بررسی قرار گرفته است که طی این بررسی‌ها نتایج مطلوبی حاصل شده است. [۲۲].



شکل (۵): ضرایب انباشت پرتوگیری محاسبه شده در کار حاضر برای سرب به ازای چشمه‌ی با طیف پیوسته (مثلث توپر) و برای چشمه‌ی تک انرژی (مربع توپر).

#### ۴. بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش محاسبه‌ی ضریب انباشت پرتوگیری برای یک چشمه با طیف انرژی پیوسته (یک طیف انرژی نمونه بر اساس شکل ۱) مورد بررسی قرار گرفت. در این بررسی به منظور اعتبار سنجی محاسبات، ضریب انباشت پرتوگیری برای یک چشمه‌ی تک انرژی محاسبه شده و نتایج آن با کار دیگران [۵ و ۴] مقایسه و توافق خوبی مشاهده شد. البته در کار حاضر نتایج محاسبات برای چشمه‌ی تک انرژی ۱ مگاالکترون‌ولت تطبیق بسیار بهتری نسبت به کار انجام شده در مرجع ۱۰ دارد و برای انجام محاسبات از روش مونت کارلو براساس کد مونت کارلو MCNPX بهره گرفته شده است. البته باید به این نکته اشاره کرد که در مواردی ممکن است ضرایب انباشت برای چشمه‌های تک انرژی که توسط دیگران محاسبه شده تفاوت‌های اندکی با یکدیگر داشته باشند این تفاوت‌ها به دو دلیل رخ می‌دهند، دلیل اول: تفاوت در سطح مقاطع فوتونی مورد استفاده می‌باشد چون هرچه زمان می‌گذرد آزمایش‌ها و روش‌های محاسبه‌ی سطح مقاطع بهتر، کامل‌تر و دقیق‌تر می‌شوند. سطح مقطعی که در این کار استفاده شده است همانطور که در متن مقاله به آن‌ها اشاره شده است، سطح مقاطع به‌روزی

## ۵. مراجع

- [1] N. Tsoufanidis, S. Landsberger. Measurement & Detection of Radiation. CRC Press, New York, (2015).
- [2] H. Cember, T.E. Johnson. Introduction to Health Physics. McGraw-Hill, New York, (2009).
- [3] H. Goldstien, J.E. Wilkins. Calculations of the Penetration of Gamma Rays: Final Report. Nuclear Development Associates, Tenn, (1954).
- [4] ANSI/ANS-6.4.3. American National Standard gamma-ray attenuation. (1991).
- [5] A. Shimizu, T. Onda, Y. Sakamoto. Calculation of Gamma-Ray Buildup Factors up to Depths of 100 mfp by the Method of Invariant Embedding, (III). J.Nucl. Sci. Technol. 4 (2004) 413–424.
- [6] C.E. Sanders. Development of Buildup Factors for Updating the ANSI/ANS-6.4.3 Standard. Proceedings of the 18th International Conference on Nuclear Engineering, (2010).
- [7] A.B. Chilton, C.M. Eisenhauer and G.L. Simmons. Photon Point Source Buildup Factors for Air, Water, and Iron. Nucl. Sci. Eng. 1 (1980) 97–107.
- [8] A. Shimizu, T. Onda, Y. Sakamoto. Calculation of Gamma-Ray Buildup Factors up to Depths of 100 mfp by the Method of Invariant Embedding, (I). J.Nucl. Sci. Technol. 4 (2004) 413–424.
- [9] A. Shimizu, T. Onda, Y. Sakamoto. Calculation of Gamma-Ray Buildup Factors up to Depths of 100 mfp by the Method of Invariant Embedding, (II). J.Nucl. Sci. Technol. 4 (2004) 413–424.
- [10] ا. شیرانی، م.ح. علامت ساز. محاسبه ضرایب انباشت پرتوگیری تابش های گاما برای چشمه های نقطه ای در آب و سرب، مجله پژوهش فیزیک ایران. ۱ (۱۳۸۰).
- [11] L. Auditore, R.C. Barna, D.De Pasquale, A. Italiano, A. Trifiro, M. Trimarchi. Study of a 5 MeV electron linac based neutron source. Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B. 229 (2005) 137–143.
- [12] Y.S. Kim, Z. Khazaei, J. Ko, H. Afarideh, M. Ghergherechi. Estimation of photoneutron yield in linear accelerator with different collimation systems by Geant4 and MCNPX simulation codes, Phys. Med. Biol. 61 (2016) 2762–2779.
- [13] B. Askri. Optimization of a photoneutron source based on 10 MeV electron beam using Geant4 Monte Carlo code. Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B. 360 (2015) 1–8.
- [14] D.B. Pelowitz. MCNPX User's Manual. LA-CP-07-1473, ORNL/RSICC, (2008).
- [15] A.B. Chilton, J.K. Shultis, R.E. Faw. Principles of Radiation Shielding. Prentice Hall, London, (1984).
- [16] R.D. Evans. The Atomic Nucleus. McGraw-Hill Publishing Company, New Delhi, (1955).
- [17] H. Cember, T.E. Johnson. Introduction to Health Physics, McGraw-Hill, New York, (2009).
- [18] XCOM. National Institute of Standards and Technology.
- [19] H. Hirayama. Calculation of gamma-ray exposure buildup factors up to 40mfp using the EGS4 Monte Carlo code with a particle splitting. J.Nucl. Sci. Technol. 12 (1995) 1201–1207.
- [20] H. Atak, O. Şahin Çelikten, M. Tombakoğlu. Finite and infinite system gamma ray buildup factor calculations with detailed physics. Appl. Radiat. Isot. 105 (2015) 11–14.
- [21] Y. Harima, Y. Sakamoto, S. Tanaka and M. Kawai. Validity of the geometric-progression formula in approximating gamma-ray buildup factors. Nucl. Sci. Eng. 94 (1986) 24–35.
- [22] M.M. Rafiei and H. Tavakoli-Anbaran. Calculation of the exposure buildup factors for x-ray photons with continuous energy spectrum using Monte Carlo code. J. Radiol. Prot. 38 (2018) 207–217.