

## استخراج ضریب انباشت تابش‌های گاما به صورت تابع چند جمله‌ای در حفاظ‌های کروی دولایه‌ای آب - سرب

محمدحسن علامت‌ساز و مریم‌السادات محسنی

دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی اصفهان

(دریافت مقاله: ۱۳۹۰/۱۲/۹؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۲/۹/۹)

### چکیده

در این پژوهش ابتدا ضریب انباشت پرتودهی تابش گاما برای حفاظ کروی دو لایه‌ای ساخته شده از آب و سرب که ضخامت کل حفاظ بین  $mfp$  تا  $10\ mfp$  تغییر می‌کند با استفاده از کد محاسباتی مونت کارلو  $N - MCNP$  ذره‌ای استخراج شد. چشمه فوتون نقطه‌ای، همسانگرد و در گستره انرژی  $0.3\ MeV$  تا  $10\ MeV$  در نظر گرفته شده است. سپس داده‌های حاصل از اجرای  $MCNP$  به عنوان تابعی از هر یک از متغیرهای مستقل ضخامت لایه آب، ضخامت لایه سرب و انرژی پرتو گاما رسم شد و نمودارها تحلیل شد. بر اساس این تحلیل‌ها، فرم‌های مختلفی از روابط ریاضی بر حسب انرژی چشمه فوتون و ضخامت لایه‌های آب و سرب با تعداد ضرایب متفاوت به برنامه فرترن  $MINUIT$  داده شد تا این برنامه ضرایب معادله را به گونه‌ای محاسبه کند که رابطه مورد نظر با کمترین خطای ممکن نسبت به نتایج  $MCNP$  ضرایب انباشت پرتودهی را به دست دهد. رابطه نهایی، رابطه‌ای با ۱۱ ضریب است که ضریب انباشت پرتودهی را با خطای زیر ۲٪ نسبت به نتایج  $MCNP$  تولید می‌کند.

**واژه‌های کلیدی:** تابش گاما، لایه آب، لایه سرب، ضریب انباشت پرتودهی، کد محاسباتی  $MCNP$ ، برنامه فرترن  $MINUIT$

### ۱. مقدمه

که هر فوتونی که با حفاظ بر هم کنش کند از باریکه جدا شده و توسط آشکارساز شمرده نمی‌شود. برای لحاظ کردن این افزایش شدت گامای آشکار شده می‌توان رابطه بالا را به شکل 
$$\frac{I}{I_0} = Be^{-\mu x}$$
 نوشت، که در آن  $B$  ( $B \geq 1$ ) ضریب انباشت نامیده می‌شود و به شکل چشمه، ضخامت، جنس جاذب و انرژی فوتون بستگی دارد و آن را می‌توان محاسبه یا اندازه‌گیری کرد. یک نوع حفاظ متقارن و متداول برای تابش گاما می‌تواند حفاظ دو لایه‌ای کروی شامل یک جاذب با  $Z$  پایین (مثلاً آب) و یک جاذب با  $Z$  بالا

شدت نسبی یک باریکه گامای تک انرژی که بدون هیچ برهم کنشی از یک حفاظ به ضخامت  $x$  عبور می‌کند تحت شرایط خوب هندسی از رابطه  $\frac{I}{I_0} = e^{-\mu x}$  به دست می‌آید که  $\mu$  ضریب تضعیف گاما است، که به جنس حفاظ و انرژی فوتون بستگی دارد. اما در شرایط هندسی ضعیف، مثلاً وقتی که باریکه گاما واگرا بر جذب کننده ضخیمی فرود آید، رابطه فوق شدت عبوری را کمتر از تعداد واقعی پیش‌بینی می‌کند، چون در این رابطه فرض بر این است

ضرایب انباشت ندارد در تمام محاسبات از آن صرف نظر می‌شد اما احتمال این‌که فوتون به طور همدوس در زوایای بزرگ پراکنده شود، در انرژی‌های زیر چند صد کیلو الکترون ولت و به ویژه برای مواد با عدد اتمی بالا افزایش می‌یابد. به این ترتیب در سال ۱۹۸۹ داده‌های جدید با در نظر گرفتن پراکندگی همدوس استخراج شده و به جدول استانداردها افزوده شد [۳].

با روشن شدن اهمیت ضریب انباشت در مسئله حفاظ‌گذاری در مقابل تابش‌های هسته‌ای، تلاش‌های بسیاری صورت گرفت تا عبارتی تحلیلی بر حسب انرژی اشعه گاما و ضخامت حفاظ برای محاسبه ضریب انباشت به دست آید، زیرا یک عبارت تحلیلی برای استفاده بسیار راحت‌تر از یک جدول محدود از داده‌ها است.

از میان همه روابط ارائه شده برای حفاظ‌های تک لایه‌ای، فرمول تصاعد هندسی<sup>۷</sup> بیش از بقیه توسط محققان مورد استفاده قرار گرفته است [۴]. این رابطه به وسیله هاریم<sup>۸</sup> پیشنهاد و موفق شد خطای محاسبات را به زیر ۱۰٪ برساند [۳].

محققان مختلفی از جمله کالس<sup>۹</sup> و برودر<sup>۱۰</sup> فرمول‌های خود را برای محاسبه ضرایب انباشت دو و چند لایه‌ای ارائه کردند. همه این فرمول‌ها ضرایب انباشت حفاظ‌های تک لایه‌ای را با استفاده از عملیات جمع و تفریق با هم ترکیب می‌کردند [۵]. نتایج محاسبه شده با این فرمول‌ها برای بعضی ترکیبات خاص و گستره‌های کوچکی از انرژی و ضخامت حفاظ توافق خوبی با داده‌ها داشتند با این وجود هنگام استفاده از این روابط همیشه لازم بود که جدول مقادیر ضرایب انباشت حفاظ‌های تک لایه‌ای در اختیار باشد و این ایراد کمی نبود. به تدریج روابط بهتر شدند و ضرایب انباشت حفاظ‌های تک لایه‌ای در این فرمول‌ها جای خود را به متغیرهایی از جمله انرژی چشمه گاما و ضخامت هر یک از لایه‌ها به طور مجزا دادند.

(مانند سرب) باشد که به عنوان مثال می‌تواند برای نگهداری چشمه‌های قوی گاما مورد استفاده قرار گیرد.

محاسبات تضعیف اشعه گاما حین عبور از حفاظ‌های تک یا چند لایه‌ای می‌تواند با حل معادله تریبرد فوتون و استفاده از روش‌های محاسباتی، مثل روش عرض‌های گسسته<sup>۱</sup> یا به وسیله روش‌های احتمالاتی از جمله روش مونت کارلو<sup>۲</sup> انجام شود [۱]. اولین بار شخصی به نام وایت<sup>۳</sup> در سال ۱۹۵۰ عبارت ضریب انباشت را برای توضیح میزان نفوذ اشعه گامای  $^{60}\text{Co}$  در آب معرفی کرد و نخستین بار گلدشتاین و ویلکینز<sup>۴</sup> در سال ۱۹۵۴ مجموعه جامعی از ضرایب انباشت محاسبه شده برای حفاظ‌های تک لایه‌ای را به روش ممان‌ها<sup>۵</sup> منتشر کردند. به دنبال آن ضرایب انباشت برای چشمه همسانگرد نقطه‌ای با استفاده از کدهای روش کرنل نقطه‌ای ارائه شد و به همراه داده‌های قبلی به طور گسترده‌ای در محاسبات تضعیف اشعه گاما مورد استفاده قرار گرفت. در سال ۱۹۸۰ گروه ANS-6.4.3 تشکیل و برای محاسبات جدیدتر دست به کار شد. قبل از آن مجموعه‌ای از ضرایب انباشت که به وسیله روش ممان‌ها، با در نظر گرفتن چشمه‌های ثانویه فوتون مثل تولید زوج و فلوتورسانی، به دست آمده بود در دیوان عالی استانداردها (NBS) موجود بود و نتایج مربوط به بتون در سال ۱۹۷۵ هوا، آب و آهن در سال ۱۹۸۰ منتشر شده بود. این داده‌ها به زودی دستخوش تغییر شدند و ضرایب انباشت برای عناصر دیگر و با در نظر گرفتن سهم تابش ترمزی و با استفاده از کد PALLAS [۱] که بر اساس محاسبات تریبرد نوشته شده بود در سال ۱۹۸۴ توسط تاکشی و تاناکا<sup>۶</sup> استخراج شد و شامل عناصر با عدد اتمی بالا بود که چشمه‌های ثانویه فوتون اهمیت پیدا می‌کنند [۲].

از آنجایی که تصور می‌شد پراکندگی همدوس تأثیری بر

۱. Discrete ordinates method

۲. Monte Carlo method

۳. White

۴. Goldstein and Wilkins

۵. Moments method

۶. Takeuchi and Tanaka

۷. Geometric progression formula

۸. Harima

۹. Kalos

۱۰. Broder

ضریب تضعیف جرمی کل در انرژی‌های مختلف و با در نظر گرفتن سطح مقطع همه برهم‌کنش‌های پرتوی گاما برای هر ماده به طور جداگانه استخراج شد. سپس با داشتن ضریب تضعیف جرمی، مسافت آزاد میانگین بر حسب سانتی‌متر به دست می‌آید. چشمه پرتوی گاما نقطه‌ای، تک انرژی و همسانگرد با بازه انرژی  $0.3 \text{ MeV}$  تا  $10 \text{ MeV}$  در نظر گرفته شد که در مرکز این حفاظ کروی قرار دارد. آشکارساز روی سطح ماده دوم یعنی سرب، شار فوتون‌ها را اندازه می‌گیرد. این کار توسط MCNP و با استفاده از کارت درخواست F۲ صورت می‌گیرد. سپس با استفاده از ضرایب تبدیل شار به دز، شار فوتون‌ها روی سطح حفاظ به دز جذبی فوتون‌ها در هوا تبدیل می‌شود و با انجام محاسبات ضریب انباشت پرتودهی تابش گاما با در نظر گرفتن همه برهم‌کنش‌های پرتوهای گاما با ماده از جمله اثر فوتوالکتریک، پراکندگی کامپتون، تولید زوج، تابش ترمزی و پراکندگی همدوس با استفاده از کد MCNP در ضخامت‌های مختلف حفاظ و برای انرژی‌های مختلف چشمه گاما به دست آمد.

برای اطمینان از این‌که برنامه ورودی نوشته شده ضرایب انباشت مسأله مورد نظر ما را به درستی تولید می‌کند، با اجرای کد MCNP تعدادی از ضرایب انباشت محاسبه شده و با ضرایب انباشت مرجع [۱۰] مقایسه شد، که نتایج سازگاری خوبی با هم داشتند. همچنین با اجرای برنامه و محاسبه ضریب انباشت برای هندسه‌های تا حدی نزدیک و مشابه به این کار و مقایسه خروجی‌ها از درستی و کارایی برنامه خود مطمئن شده و سپس محاسبه ضریب انباشت برای این کار را آغاز کردیم.

به این ترتیب با اجرای MCNP ضرایب انباشت در انرژی‌های مختلف اشعه گاما و ضخامت‌های مختلف آب و سرب، به دست آمد. در ادامه، نمودار ضریب انباشت بر حسب هریک از سه متغیر مورد نظر رسم شد تا با تحلیل نمودار و محاسبه فرمولی که ضریب انباشت را در این حالت محاسبه می‌کند، به رابطه اصلی که ضریب انباشت را بر حسب هر سه متغیر به دست می‌دهد، نزدیک شویم. در گام نخست، ضریب انباشت به عنوان تابعی از هریک از دو متغیر مستقل ضخامت لایه اول یعنی آب،  $x_1$  و ضخامت لایه دوم یعنی سرب،  $x_2$  در نظر گرفته شد و دو متغیر دیگر ثابت فرض

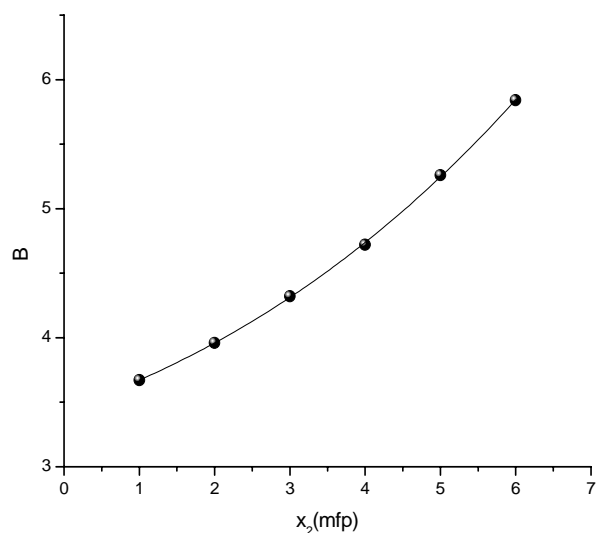
امروزه یکی از بهترین روش‌ها برای آزمایش فرایندهای مختلف و بررسی چگونگی پدیده‌ها استفاده از روش‌های مختلف شبیه سازی کامپیوتری است و پیدایش کامپیوترهای پرسرعت در سال‌های اخیر، کاربرد کدهای کامپیوتری را در پژوهش‌های علوم و فنون هسته‌ای به عنوان ابزاری کارا گسترش داده است [۱]. به عنوان مثال در سال‌های اخیر دانشمندان ژاپنی با استفاده از کد EGS۴ ضرایب انباشت پرتوی گاما را محاسبه کردند [۶].

یکی دیگر از جدیدترین این روابط تحت عنوان مقاله‌ای توسط محققان دانشکده مهندسی هسته‌ای دانشگاه میسوری-رولا در امریکا به چاپ رسیده [۵] که در آن از کد محاسباتی MCNP برای محاسبه ضریب انباشت استفاده شده است [۷]. در حال حاضر کد محاسباتی MCNP یکی از ابزارهای توانمند برای برآورد پارامترهای مورد نظر کاربران، از جمله محاسبه مستقیم ضریب انباشت است.

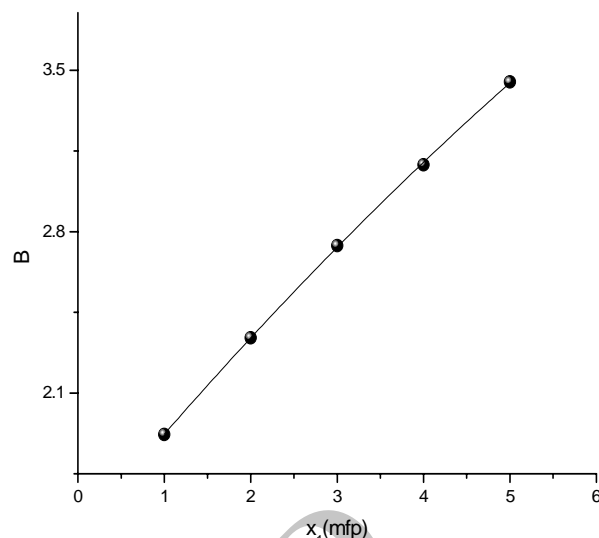
در این کار قصد بر این است که با استفاده از کد محاسباتی MCNPX ضریب انباشت پرتودهی برای حفاظ دو لایه‌ای کروی ساخته شده از آب و سرب استخراج شده و سپس با استفاده از این داده‌ها و برنامه MINUIT [۸]، فرمولی به دست آید که نتایج محاسباتش کمترین انحراف را نسبت به داده‌های MCNP داشته باشد.

## ۲. محاسبات

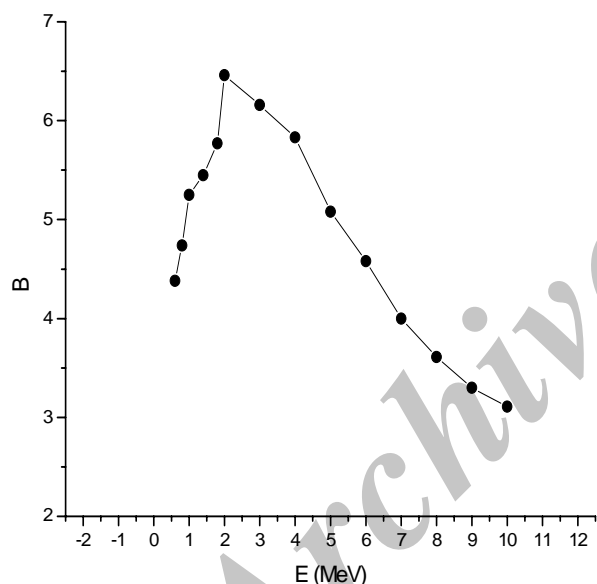
در این پژوهش، استفاده از کدهای MCNP و MINUIT رابطه‌ای برای محاسبه ضریب انباشت پرتودهی تابش گاما برای یک حفاظ دو لایه‌ای با استخراج شد. به این ترتیب که یک چشمه نقطه‌ای همسانگرد تک انرژی پرتوی گاما با گستره انرژی  $0.3 \text{ MeV}$  تا  $10 \text{ MeV}$  در مرکز حفاظی دو لایه‌ای قرار داده شد. حفاظ مورد نظر، یک حفاظ دو لایه‌ای کروی است که لایه اول از آب و لایه دوم از سرب ساخته شده است و فضای اطراف حفاظ هوا است. ضخامت کل حفاظ یعنی مجموع ضخامت لایه آب و سرب در گستره  $2 \text{ mfp}$  تا  $10 \text{ mfp}$  متغیر فرض شد. مسافت آزاد میانگین بر حسب سانتی‌متر برای هر لایه هم به این ترتیب به دست آمد که ابتدا با استفاده از برنامه xcom [۹]



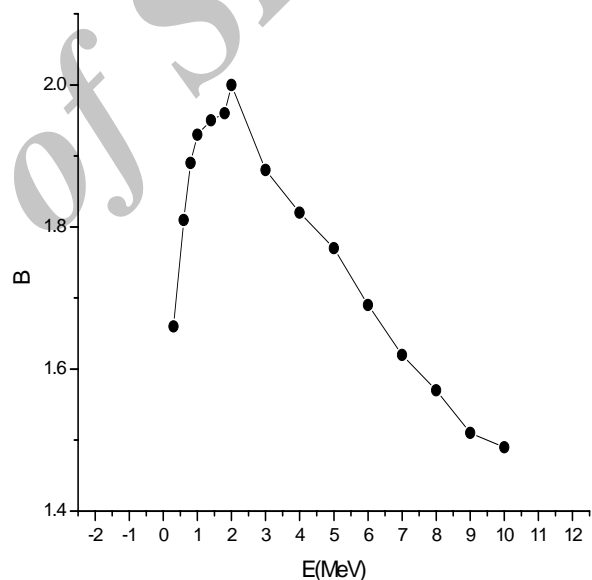
شکل ۲. نمودار ضریب انباشت با انرژی چشمه  $2\text{ MeV}$  و ضخامت  $4\text{ mfp}$  آب و ضخامت  $1\text{ mfp}$  تا  $6\text{ mfp}$  سرب.



شکل ۱. نمودار ضریب انباشت با انرژی چشمه  $6\text{ MeV}$  و ضخامت  $1\text{ mfp}$  تا  $5\text{ mfp}$  آب و ضخامت  $2\text{ mfp}$  سرب.



شکل ۴. نمودار ضریب انباشت با انرژی چشمه  $0.3\text{ MeV}$  تا  $10\text{ MeV}$  و ضخامت  $5\text{ mfp}$  آب و ضخامت  $5\text{ mfp}$  سرب.



شکل ۳. نمودار ضریب انباشت با انرژی چشمه  $0.3\text{ MeV}$  تا  $10\text{ MeV}$  و ضخامت  $1\text{ mfp}$  آب و ضخامت  $1\text{ mfp}$  سرب.

پرتوی گاما بررسی شد. دو نمونه از این تغییرات در شکل‌های ۳ و ۴ ارائه شده‌اند: رشد اولیه ضریب انباشت با افزایش انرژی، به دلیل غالب شدن پراکندگی کامپتون و کاهش اثر فوتوالکتریک تا انرژی حدود  $2\text{ MeV}$  است. سپس با افزایش بیشتر انرژی، احتمال تولید زوج (به ویژه در سرب) غالب شده و در نتیجه ضریب انباشت کاهش می‌یابد.

شدند. با رسم نمودارها، تحلیل آنها و بررسی نحوه بستگی ضریب انباشت پرتوی گاما به هر یک از سه متغیر مستقل، مشاهده شد که ضریب انباشت به صورت تابعی صعودی و تقریباً خطی به هر یک از این پارامترها بستگی پیدا می‌کند. در شکل‌های ۱ و ۲ این وابستگی‌ها نشان داده شده‌اند. سپس با ثابت نگه داشتن ضخامت لایه آب و لایه سرب، تغییرات ضریب انباشت بر حسب انرژی

جدول ۱. ضرایب برازش معادله (۱) برای حفاظ تشکیل شده از آب و سرب در گستره انرژی  $0,3 \text{ Mev} \leq E_\gamma \leq 2 \text{ Mev}$  و گستره انرژی  $2 \text{ Mev} < E_\gamma \leq 10 \text{ Mev}$ .

ضرایب برازش	گستره انرژی $0,3 \text{ Mev} \leq E_\gamma \leq 2 \text{ Mev}$	گستره انرژی $2 \text{ Mev} < E_\gamma \leq 10 \text{ Mev}$
<i>a</i>	۰,۳۶۹۰۶	۰,۷۰۱۳۶
<i>b</i>	۰,۰۰۱۴۷۱۵	۰,۳۲۵۱۶
<i>c</i>	۲,۸۶۲۳	۰,۴۸۴۶
<i>d</i>	۰,۰۱۰۳۰۳	۰,۰۰۶۷۲۵۷
<i>g</i>	۰,۰۰۳۷۲۸۶	۰,۰۱۹۸۲۸
<i>h</i>	-۲,۶۷۳۴	-۰,۰۹۲۹۵۳
<i>k</i>	۰,۱۱۶۶۴	-۰,۰۴۶۶۸۶
<i>m</i>	۰,۲۰۹۸۱	-۰,۰۳۱۶۱۵
<i>n</i>	-۰,۰۰۴۶۳۴۴	۰,۰۱۲۰۷۷
<i>o</i>	۰,۶۸۴۳۴	۰,۰۰۵۴۶۱۱
<i>p</i>	۰,۴۴۰۴۲	۰,۳۳۳۲۸

برنامه‌های رایانه‌ای مختلفی که به همین منظور طراحی شده‌اند بهره برد. ما در این کار از برنامه MINUIT که به زبان برنامه‌نویسی فورترن نوشته شده است استفاده کردیم.

این برنامه با قابلیت فوق‌العاده، با داشتن فرمول مورد نظر، مقادیر اولیه دلخواه برای متغیرهای مستقل فرمول مورد نظر و همچنین داده‌های استخراج شده توسط MCNP، با استفاده از روش کمترین مربعات و با کمترین خطای ممکن ضرایب برازش معادله را در خروجی نمایش می‌دهد.

به این ترتیب و با امتحان کردن رابطه‌های چند جمله‌ای مختلف سرانجام به رابطه (۱) رسیدیم که ضریب انباشت را با

خطای زیر ۲٪ نسبت به نتایج MCNP تولید می‌کند

$$B = ax_1 + bx_2 + cE + dx_1^2 + gx_2^2 + hE^2 + kEx_1 + mEx_2 + nx_1x_2 + oE^3 + p. \quad (1)$$

ضرایب برازش معادله (۱) برای دو بازه انرژی  $0,3 \text{ Mev} \leq E_\gamma \leq 2 \text{ Mev}$  و  $2 \text{ Mev} < E_\gamma \leq 10 \text{ Mev}$  در جدول

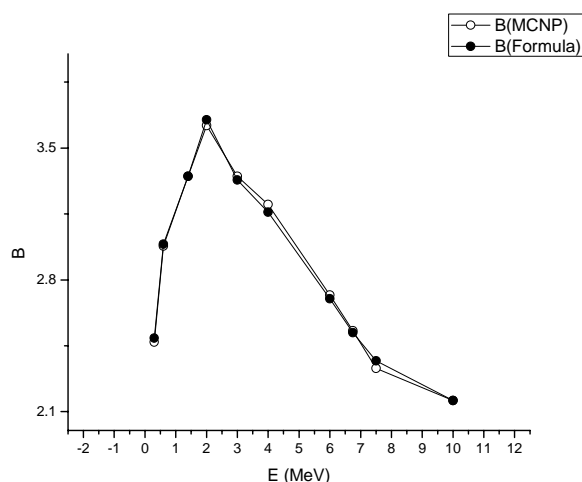
۱ قابل مشاهده است.

تعدادی از ضرایب انباشت حاصل از اجرای MCNP و خروجی رابطه (۱) بر حسب ضخامت‌های مختلف لایه آب در

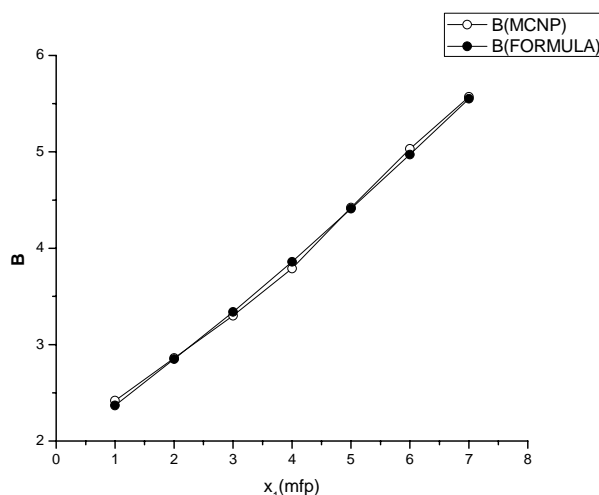
به نظر می‌رسد که با توجه به چگونگی تغییر ضریب انباشت بر حسب انرژی در یک ضخامت خاص برای کل حفاظ، لازم است تغییرات ضریب انباشت در دو بازه انرژی بررسی شود. بنابراین بهترین انتخاب برای مرز دو بازه مورد نظر، نقطه بیشینه منحنی‌های تغییرات ضریب انباشت بر حسب تغییرات انرژی پرتوی گاما یعنی انرژی ۲ MeV است. روابط مختلفی از جمله توابع نمایی، بولتزمان، گاوسی و ... برای محاسبه ضریب انباشت در حالتی که دو متغیر از سه متغیر ثابت هستند، امتحان شد، و سرانجام به رابطه چند جمله‌ای به عنوان مناسب‌ترین رابطه برای محاسبه ضریب انباشت رسیدیم.

به این ترتیب و با تحلیل و بررسی نمودارها در هر کدام از بازه‌های  $0,3 \text{ Mev} \leq E_\gamma \leq 2 \text{ Mev}$  و  $2 \text{ Mev} < E_\gamma \leq 10 \text{ Mev}$  و با پیش‌بینی این که ضریب انباشت با رابطه‌های چند جمله‌ای به هر سه متغیر انرژی پرتوی گاما، ضخامت لایه آب و ضخامت لایه سرب بستگی خواهد داشت، اکنون زمان یافتن معادله اصلی و محاسبه ضرایب برازش آن فرا رسیده است.

برای دست‌یابی به رابطه نهایی هم می‌توان از علم آمار کمک گرفت و با انجام محاسبات نسبتاً پیچیده ضرایب برازش معادله را محاسبه کرد و هم می‌توان از نرم‌افزارها و



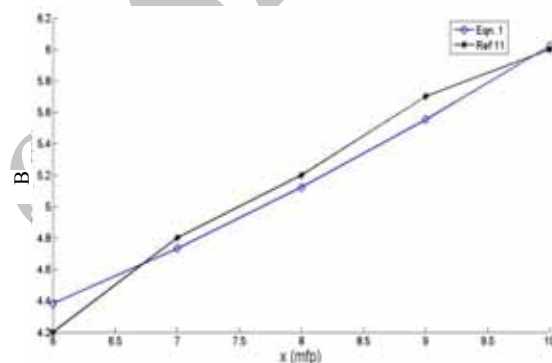
شکل ۶. نمودار ضریب انباشت حاصل از اجرای MCNP و خروجی رابطه (۱) با انرژی چشمه  $0.3 \text{ MeV}$  تا  $10 \text{ MeV}$  و ضخامت  $3 \text{ mfp}$  آب و  $2 \text{ mfp}$  سرب.



شکل ۵. نمودار ضریب انباشت حاصل از اجرای MCNP و خروجی رابطه (۱) با انرژی چشمه  $0.8 \text{ MeV}$  و ضخامت  $1$  تا  $7 \text{ mfp}$  آب و  $3 \text{ mfp}$  سرب.

سازگاری کلی مشاهده شد. شکل ۷ این سازگاری را در انرژی چشمه  $3 \text{ MeV}$  در ضخامت  $5 \text{ mfp}$  آب و  $1-5 \text{ mfp}$  سرب نشان می‌دهد.

خروجی رابطه (۱) و مرجع ۱۱ با انرژی چشمه  $3 \text{ MeV}$  در ضخامت  $5 \text{ mfp}$  آب و  $1$  تا  $5 \text{ mfp}$  سرب ضرایب انباشت پرتودهی برای یک حفاظ ساخته شده از آب و سرب که ضخامت کل حفاظ از  $2 \text{ mfp}$  تا  $10 \text{ mfp}$  تغییر می‌کند و انرژی چشمه گاما نیز در گستره  $0.3 \text{ MeV}$  تا  $10 \text{ MeV}$  قابل تغییر است با خطای زیر  $2\%$  محاسبه شد. این محاسبه با استفاده از رابطه‌ای با ۱۱ ضریب انجام می‌شود و برای محاسبه بر خلاف اغلب فرمول‌های موجود، مثلاً فرمول‌های کالس و برودر [۱۲]، به ضریب انباشت حفاظ‌های تک لایه‌ای احتیاجی نیست. همچنین این رابطه نسبت به رابطه‌های مشابه، به عنوان مثال فرمول‌های مرجع [۵] که ۱۳ ضریب دارند، دقیق‌تر، ساده‌تر و دارای ضرایب برازش کمتری است، علاوه بر آن که در مقایسه با بازه انرژی  $0.5 \text{ MeV} < E_\gamma < 6 \text{ MeV}$ ، گستره بزرگ‌تری از انرژی را شامل می‌شود. بنابراین رابطه بالا می‌تواند با ضریب اطمینان بالایی در محاسبات مورد استفاده قرار گیرد.



شکل ۷. نمودار ضریب انباشت حاصل از خروجی رابطه (۱) و مرجع [۱۱] با انرژی چشمه  $3 \text{ MeV}$  در ضخامت  $5 \text{ mfp}$  آب و  $1$  تا  $5 \text{ mfp}$  سرب.

انرژی ثابت و ضخامت لایه سرب ثابت، ضخامت‌های مختلف لایه سرب در انرژی ثابت و ضخامت لایه آب ثابت، و انرژی‌های مختلف پرتوی گاما در ضخامت لایه آب ثابت و ضخامت لایه سرب ثابت، به ترتیب در نمودارهای ۵ و ۶ رسم شده و قابل مقایسه هستند. همخوانی میان دو دسته ضریب انباشت به خوبی قابل مشاهده است.

جهت اعتبار سنجی بیشتر فرمول، ضریب انباشت مرجع [۱۱] که تا حدودی شرایط مشابه به کار ما را داشت ولی با استفاده از کد EGS4 استخراج شده بود، با نتایج رابطه مقایسه و

## مراجع

- Report (1993).
8. F James, "MINUIT, *Function Minimization and Error Analysis, reference Manual*", CERN, Geneva, Switzerland (1994).
  9. <http://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/html/xcom1>.
  10. M H Alamatsaz and A Shirani, *Journal of Sciences* **13** (2002) 271.
  11. Y Harima and H Hirayama, *Nuclear Science and Engineering* **113** (1993) 367.
  12. D Bunemann and G Richter, "Multilayered shields *Engineering Compendium on Radiation Shielding*", JAEGER, Springer-Verlag, New York **1** (1968) 230.
  1. J K Shultis and R E Faw, *Health Physics* **88** (2005) 297.
  2. Y Harima, *Radiat. Phys. Chem.* **41** (1993) 631.
  3. A Assad, M Chiron, J C Nimal, and C M Diop, *Nuclear Science and Engineering* **123** (1999) 203.
  4. Y Harima, Y Sakamoto, N Kurosawa, and A Shimizu, *Nuclear Technology* **168** (2009) 866.
  5. M Guvendik and N Tsoulfanidis, *Nuclear Technology* **131** (2000).
  6. K Shin and H Hirayama, *Radiation Physics and Chemistry* **61** (2001) 583.
  7. MCNP-A, "General Monte Carlo N-Particle Transport Code Version4A" LA-12625-M. JBRIESMEISTER, Los Alamos National Laboratory

Archive of SID



Iranian Journal of Physics Research, Vol. 13, No. 4, 2014

## **A polynomial–based function approach to point isotropic gamma-ray buildup factor data in double layered spherical shield of water and lead**

**M H Alamatsaz and M Mohseni**

Department of Physics, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

(Received 28 February 2012 ; in final form 30 November 2013)

### **Abstract**

As the input of MCNP code (Monte Carlo N - Particle code system), a monoenergetic and isotropic point source with the energy ranged from 0.3 to 10 MeV was placed at the center of a spherical material surrounded by another one. The first shielding material was water and the second one was lead. The total thickness of the shield varied between 2 to 10 mfp. Then, using the output of MCNCP, exposure build up factor was calculated. The MCNP computed data were analyzed by plotting the buildup factor as a function of each independent variable (energy, first material thickness and second material thickness) and observing the trends. Based on the trends, we examined many different expressions with different number of constants. By MINUIT the FORTRAN program, the constants were calculated, which gave the best agreement between the MCNP-computed exposure buildup factors and those obtained by the formula. At last, we developed a polynomial formula with 11 constants that reproduced exposure buildup factor with a relative error below 2% (in comparison with the MCNP result).

**Keywords:** gamma ray, layer of water, layer of lead, exposure buildup factor, MCNP code

For full article, refer to the Persian section