Archive of SID

مجلهٔ پژوهش فیزیک ایران

مجلهٔ پژوهش فیزیک ایران، جلد ۳، شمارهٔ ۱، زمستان ۱۳۸۰

محاسبهٔ ضرایب انباشت پرتوگیری تابشهای گاما برای چشمه‌های نقطه‌ای در آب و سرب

احمد شیرانی و محمد حسن علامت‌ساز

دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی اصفهان

(دریافت مقاله: ۷۹/۱۲/۲۲ دریافت نسخه نهایی: ۸۰/۵/۲۸)

چکیده

ضرایب انباشت پرتوگیری تابشهای گاما با در نظر گرفتن انواع برهم‌کنشهای فوتون با ماده، از جمله پراکندگیهای ناهمدوس و همدوس و همچنین تابشهای فلورسانس برای چشمه‌های نقطه‌ای در آب و سرب به روش مونت کارلو محاسبه شدند. این ضرایب را که با به کارگیری آخرین سطح مقطعهای موجود در اینترنت محاسبه شده‌اند می‌توان به عنوان ضرایب انباشت پرتوگیری اصلاح شده تلقی کرد و در محاسبات حفاظ گذاری از آنها استفاده کرد. اختلاف بین ضرایب محاسبه شده در این کار با ضرایب قبلی که با به کارگیری سطح مقطعهای قدیمیتر و روشهای متفاوت به دست آمده‌اند، در مواردی که برهم‌کنشهای مشابه منظور شده‌اند، بین ۲ تا ۳۰ درصد است.

واژه‌های کلیدی: مونت کارلو، ضریب انباشت، تابش گاما

۱. مقدمه

اشعهٔ گاما هنگام عبور از ماده به صورت نمایی کاهش می‌یابد به طوری که در شرایط خوب هندسی، یعنی در حالتی که باریکه‌ای موازی بر جذب کننده‌ای با ضخامت کم فرود آید، تضعیف پرتوهای گاما را می‌توان از معادلهٔ زیر به دست آورد:

$$I = I_{\circ} e^{-\mu x} \qquad (۱)$$

در این رابطه $I_{\circ}$ شدت پرتو فرودی، I شدت پرتو عبوری، x ضخامت جذب کننده و μ ضریب تضعیف خطی است که به جنس ماده جذب کننده و انرژی فوتونهای فرودی بستگی دارد. اما در شرایط هندسی ضعیف، یعنی در حالتی که باریکه‌ای واگرا بر جذب کننده‌ای ضخیم فرود می‌آید، معادلهٔ (۱) ضخامت حفاظ را کمتر از مقدار لازم برآورد می‌کند، زیرا در به دست آوردن این معادله فرض شده است که هر فوتونی که با حفاظ برهم‌کنش کند از باریکه خارج خواهد شد، در حالی که در شرایط ضعیف هندسی دیگر چنین فرضی معتبر نیست و ممکن است تعداد قابل توجهی از فوتونها پس از پراکندگیهای متعدد از جذب کننده خارج شوند. ضخامت حفاظ را در شرایط ضعیف هندسی می‌توان با تصحیح معادلهٔ (۱) از طریق استفاده از ضریب انباشت[1] B برآورد کرد:

$$I = BI_{\circ} e^{-\mu x} \qquad (۲)$$

ضریب انباشت که همواره بزرگتر از ۱ است، به صورت نسبت شدت پرتوهای اولیه و پراکنده در هر نقطه از باریکه به شدت

1. Buildup factor

www.SID.ir

Archive of SID

پرتوهای اولیه در همان نقطه تعریف می‌شود [۱]. ضریب انباشت را با توجه به نوع پاسخ دستگاه آشکارساز پرتوهای گاما می‌توان در مورد شار تابشی، پرتوگیری تابشی و دز تابشی تعریف کرد. این ضرایب علاوه بر نوع پاسخ آشکارساز به شکل چشمه پرتوزا (نقطه‌ای یا صفحه‌ای بودن)، به اندازهٔ محیط جذب کننده (بینهایت یا محدود بودن)، انرژی اشعهٔ گاما، فاصلهٔ چشمه تا آشکارساز و جنس محیط جذب کننده بستگی دارند.

ضرایب انباشت در طراحی حفاظ لازم و مناسب برای چشمه‌های پرتوزا و راکتورهای هسته‌ای دارای اهمیت زیادی هستند و در محاسبات دز جذبی تابشهای پرتوزا در بافتهای مختلف بدن کاربرد گسترده‌ای دارند. به لحاظ اهمیتی که این ضرایب دارند، کوششهای زیادی جهت اندازه‌گیری این ضرایب برای چند ماده مهم مورد استفاده در تکنولوژی هسته‌ای، صورت گرفته است که از آن جمله می‌توان به مرجع [۲] اشاره کرد. از آنجا که تعیین مقادیر دقیق ضرایب انباشت از طریق آزمایش در همهٔ موارد کار آسانی نیست، این ضرایب را اغلب با استفاده از سطح مقطعهای مربوط به جذب و پراکندگی فوتونها محاسبه می‌کنند. گروههای مختلف تحقیقاتی با استفاده از روشهای گوناگون محاسباتی و نوشتن برنامه‌های کامپیوتری بزرگ ضرایب انباشت را برای مواد مختلف در انرژیهای مختلف اشعهٔ گاما محاسبه و به صورت جدولهایی ارائه کرده‌اند که شرح مفصل این روشها و برنامه‌های کامپیوتری نوشته شده در مقالهٔ مروری مرجع [۳] آمده است و ما در اینجا تنها به چند مورد مهم به طور مختصر اشاره می‌کنیم.

یکی از روشهای مهم تعیین شار فوتونها در یک محیط استفاده از معادلهٔ ترابرد فوتونها و حل این معادله در محیط مورد نظر، با استفاده از سطح مقطعهای برهم‌کنش فوتونها با عناصر تشکیل دهندهٔ آن محیط، است. معادلهٔ ترابرد را می‌توان به روشهای مختلف حل کرد که از جمله مهمترین این روشها می‌توان به روش ممانها و روش طولهای گسسته اشاره کرد [٤]. روش ممانها اغلب برای محیطهای بینهایت به کار می‌ورد در حالی که برای محیطهای محدود و دارای مرزهای مشخص و منظم از روش طولهای گسسته استفاده می‌شود. در مسایلی که دارای مرزهای نامنظم هستند و مواد در آنها به طور نامنظم پخش شده‌اند می‌توان از روش شبیه سازی مونت-کارلو استفاده کرد [٤]. در روش مونت کارلو احتیاجی به حل معادله ترابرد نیست و تنها با دانستن روابط ریاضی حاکم بر انواع برهم‌کنشهای فوتون با محیط، می‌توان فوتونها را در محیط دنبال کرد و سرگذشت آنها را تعیین کرد. ضعف اصلی روش مونت کارلو خطای آماری اعداد به دست آمده است که با استفاده از کامپیوترهای سریع امروزی می‌توان با تولید تعداد زیادی رویداد این خطاها را به حداقل کاهش داد.

در این طرح با نوشتن یک برنامه کامپیوتری براساس روش مونت کارلو و در نظر گرفتن انواع برهم‌کنشهای فوتون با ماده و به کارگیری آخرین سطح مقطعهای موجود در اینترنت، ضرایب انباشت پرتوگیری برای چشمه‌های نقطه‌ای واقع در محیطهای بینهایت از جنس آب و سرب، محاسبه و ضمن مقایسه این ضرایب با نتایج حاصل از کارهای دیگران، اثر بستگی الکترونهای مقید (پراکندگیهای ناهمدوس) و پراکندگیهای همدوس روی ضرایب انباشت مورد تحقیق و بررسی قرار گرفته است.

۲. برهم‌کنش اشعهٔ گاما با ماده و سطح مقطعها

همان گونه که در مقدمه اشاره شد، تضعیف پرتوهای گاما در ماده را می‌توان در حالت کلی از معادله (۲) به دست آورد. در این معادله μ (ضریب تضعیف خطی) توسط رابطهٔ زیر به سطح مقطع (σ) واکنش اشعه گاما با الکترونهای ماده مربوط می‌شود:

$$\mu = \sum_i N_i \sigma_i \qquad (۳)$$

در معادله فوق اندیس i مربوط به عناصر تشکیل دهنده ماده و N_i چگالی الکترونی عنصر iام در ماده است. از آنجا که تابش گاما می‌تواند به صورتهای مختلف فوتوالکتریک، پراکندگی کامپتون، پراکندگی ریلی یا همدوس و تولید زوج با الکترونهای ماده بر هم‌کنش انجام دهد، معادلهٔ (۳) معمولاً به صورت مجموعی از سطح مقطعهای مربوط به هر یک از واکنشهای فوق‌الذکر نوشته می‌شود.

$$\mu = \sum N_i \left(\sigma_{pe} + \sigma_c + \sigma_R + \sigma_{pp}\right) \qquad (٤)$$

یا

$$\mu = \mu_{pe} + \mu_c + \mu_R + \mu_{pp} \qquad (٥)$$

ضرایب فوق که همگی تابع جنس ماده جذب‌کننده و انرژی فوتون برهم‌کنش کننده می‌باشند، توسط پژوهشگران مختلف تعیین، گردآوری و در جدولهای فیزیکی ارائه شده‌اند. از جمله

www.SID.ir

Archive of SID

مهمترین این ضرایب که به طور گسترده در محاسبات حفاظ‌گذاری مورد استفاده قرار گرفته‌اند، می‌توان به مراجع [۵، ۶، ۷ و ۸] اشاره کرد. جدیدترین اطلاعات موجود در مورد این سطح مقطعها در مرجع [۹] موجود است که قابل دسترس از طریق اینترنت می‌باشد و ما در محاسبات نهایی خود از این سطح مقطعها استفاده کرده‌ایم.

۳. پراکندگیهای ناهمدوس و همدوس فوتونها

هنگامی که یک فوتون با انرژی E_γ به یک الکترون آزاد و ساکن برخورد می‌کند و پراکنده می‌شود (پراکندگی کامپتون) توزیع زاویه‌ای فوتونهای پراکنده شده از رابطهٔ کلین–نیشینا پیروی می‌کند [۱۰]. در صورتی که انرژی دریافتی توسط الکترون هدف قابل مقایسه با انرژی بستگی آن در اتم باشد، لازم است رابطه کلین–نیشینا اصلاح شود. این اصلاح برای الکترونهای مقید موجود در ماده‌ای با عدد اتمی Z، با ضرب کردن توزیع زاویه‌ای کلین–نیشینا در یک ضریب تصحیح به نام تابع پراکندگی ناهمدوس $S(x,Z)$، صورت می‌گیرد. بنابراین توزیع زاویه‌ای فوتونهای پراکنده شده توسط الکترونهای مقید موجود در ماده‌ای با عدد اتمی Z از رابطه زیر پیروی می کند [۱۱]:

$$\frac{d\sigma_{inc}}{d\Omega}(\alpha, Z, \theta) = \frac{d\sigma_{KN}}{d\Omega}(\alpha, \theta) S(x, Z) \qquad (۶)$$

در رابطه فوق α انرژی فوتون فرودی برحسب انرژی سکون الکترون و x پارامتر مربوط به تکانه انتقال یافته به الکترون هدف است و توسط رابطهٔ زیر به زاویه پراکندگی فوتون (θ) و طول موج فوتون فرودی (λ) برحسب آنگستروم مربوط می‌شود:

$$x = \frac{\sin\left(\frac{\theta}{2}\right)}{\lambda\left(A^\circ\right)} = 29.143\,\alpha\sqrt{1-\cos\theta} \qquad (۷)$$

مقادیر $S(x,Z)$ برای xهای کوچک حدود صفرند (یعنی پراکندگی ناهمدوس رخ نمی‌دهد) و برای xهای بزرگ به عدد اتمی Z ماده نزدیک می‌شوند [۱۲]. به زبان دیگر، در مقادیر x بزرگ توزیع زاویه‌ای الکترونهای مقید همان شکل توزیع زاویه‌ای الکترونهای آزاد را پیدا می‌کند.

چنانچه فوتون فرودی با الکترونهای شدیداً مقید یک اتم برهم‌کنش انجام دهد، تکانه دریافتی توسط کل اتم حمل می‌شود و پراکندگی همدوس رخ می‌دهد. در این نوع پراکندگی انرژی فوتون پراکنده شده مساوی انرژی فوتون فرودی است و توزیع زاویه‌ای فوتونهایی که توسط اتمهای ماده‌ای با عدد اتمی Z در زوایای کوچک پراکنده می‌شوند از رابطه زیر به دست می‌آید [۱۱]:

$$\frac{d\sigma_{coh}}{d\Omega}(\alpha, Z, \theta) = \frac{r_0^2}{2}\left(1+\cos^2\theta\right) F^2(x, Z) \qquad (۸)$$

در رابطه فوق $F(x,Z)$ عامل شکل و x پارامتر تکانه انتقال یافته به اتم است که توسط رابطه (۷) به زاویه پراکندگی و طول موج فوتون فرودی مربوط می شود. مقادیر $F(x,Z)$ در xهای متفاوت برای عناصر مختلف محاسبه و در مرجع [۱۲] همراه با مقادیر $S(x,Z)$ ارائه شده‌اند. مقادیر $F(x,Z)$ در xهای بزرگ به صفر و در xهای کوچک به عدد اتمی مادهٔ تضعیف کننده نزدیک می‌شوند. در محاسبات این مقاله از مقادیر $S(x,Z)$ و $F(x,Z)$ در $Z=7$ (برای آب) و $Z=82$ (برای سرب) استفاده شد. در صورتی که زاویه پراکندگی θ از زاویه بحرانی:

$$\theta_c = 2\arcsin\left(\frac{0.026\, Z^{\frac{1}{3}}}{\alpha}\right) \qquad (۹)$$

بزرگتر باشد، سطح مقطع دیفرانسیلی پراکندگی همدوس از رابطه زیر پیروی می‌کند [۱۰]:

$$\frac{d\sigma_{coh}}{d\Omega}(\alpha, Z, \theta) = 8.73\times10^{-33}\left(\frac{Z}{\alpha}\right)^3 \times \frac{\frac{1}{2}\left(1+\cos^2\theta\right)}{\sin^3\frac{\theta}{2}} \ \mathrm{cm^2 sr^{-1}/atom} \qquad (۱۰)$$

۴. تابشهای فلورسانس

در برهم کنش اشعه گاما با ماده وقتی جذب فوتوالکتریک رخ می‌دهد، اگر انرژی فوتون فرودی بزرگتر از انرژی بستگی الکترونهای لایهٔ K اتمهای هدف باشد، احتمال زیادی وجود دارد که یک الکترون از این لایه کنده شود. هنگامی که جای خالی این الکترون توسط الکترونهای مدارهای بالاتر پر می‌شود، تابشهای x ثانویه که تابشهای x فلورسانس نامیده می‌شوند به وجود می‌آیند که می‌توانند روی ضرایب انباشت تأثیر بگذارند. اثر این تابشها روی ضرایب انباشت در عناصر سنگین مانند

www.SID.ir

Archive of SID

سرب در انرژیهای زیر ۲۰۰ kev قابل ملاحظه‌اند. در سرب اگر انرژی اشعه گاما بیشتر از ۸۸ keV باشد، در ۷۸/۸ درصد از مواردی که اثر فوتوالکتریک رخ می‌دهد یک الکترون از لایه K کنده می‌شود که منجر به ایجاد اشعه x فلورسانس با انرژی متوسط ۷۶/۵۳۹ keV می‌شود که به طور همسانگرد تابش می‌شود [۱۳]. در محاسبات این طرح موارد فوق در برنامه کامپیوتری ضرایب انباشت در محیط سرب منظور شده است.

۵. روش محاسبه ضرایب انباشت پرتوگیری

شبیه سازی ترابرد فوتونها در ماده به روش مونت کارلو به طور مفصل در مراجع [٤ و ١٤] مورد بحث قرار گرفته است و جزییات یک نمونه از کاربرد آن در مرجع [۱۵] توسط نویسندگان مقاله حاضر ارائه شده است. لذا در اینجا تنها به کلیات برنامه کامپیوتری نوشته شده برای محاسبه ضرایب انباشت به روش مونت کارلو اشاره می‌شود.

در برنامه نوشته شده فرض می‌شود جسم جذب کننده کره‌ای است از جنس آب یا سرب، با شعاع مشخص که یک چشمه گامای نقطه‌ای تک‌انرژی در مرکز آن قرار گرفته و سرتاسر محیط آن را یک آشکارساز اشعه گاما پوشانده است. فوتونهایی که به طور همسانگرد از این چشمه گسیل می‌شوند، با توجه به انواع برهم‌کنشهای فوتون با ماده و سطح مقطعهای مربوطه و روابط ریاضی حاکم بر این برهم‌کنشها (بخشهای ۲، ۳ و ٤) در محیط دنبال می‌شوند و انرژی هر فوتون که به آشکارساز می‌رسد (E_i) و زاویه‌ای که امتداد حرکت این فوتون با خط عمود بر کره، در نقطه برخورد فوتون باکره، می‌سازد (θ_i) ثبت می‌شود، و در نهایت ضریب انباشت پرتوگیری برای یک کره با شعاع و جنس معین از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$B=\frac{\sum_{i=1}^{N'} E_i\left(\frac{\mu_{en}}{\rho}\right)_{iair}\left(\frac{1}{\cos\theta_i}\right)}{E_\gamma N_\circ e^{-\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_m \rho R}\left(\frac{\mu_{en}}{\rho}\right)_{air}} \qquad (11)$$

در رابطه فوق $N_\circ$ تعداد کل فوتونهای با انرژی E_γ است که از چشمه گسیل شده‌اند، N' تعداد فوتونهایی است که به آشکارساز رسیده‌اند، $\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_m$ ضریب جذب جرمی ماده جذب کننده برای فوتونهای با انرژی E_γ، $\left(\frac{\mu_{en}}{\rho}\right)_{air}$ ضریب جذب انرژی هوا برای فوتونهای با انرژی E_γ، $\left(\frac{\mu_{en}}{\rho}\right)_{i\,air}$، ضریب جذب انرژی هوا برای فوتونهای با انرژی E_i، ρ چگالی جرمی ماده جذب کننده و R شعاع کره است. بنابراین می‌توان با ایجاد $N_\circ$ فوتون با انرژی مشخص E_γ و دنبال کردن آنها در محیط، B را مطابق رابطه (۱۱) برای کره‌های با شعاعهای متفاوت تعیین و در هر انرژی اشعه گاما B را برحسب شعاع کره جذب کننده (R) یا برحسب مسیر آزاد میانگین[1] (μR) تعیین کرد. همان گونه که در رابطه (۱۱) مشاهده می شود، B تابع ضریب جذب جرمی ماده جذب کننده $\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_m$ نیز می‌باشد که خود شامل سطح مقطعهای مربوطه و انواع برهم‌کنشهای فوتون با ماده است. بنابراین B را می‌توان با منظور کردن سطح مقطعهای مختلف و همچنین در نظر گرفتن برهم‌کنشهای مختلف تعیین و اثر هر یک از عوامل فوق را در مقدار B مورد بررسی قرار داد. در محاسبات این مقاله ضرایب انباشت پرتوگیری تابشهای گاما در گستره انرژی از ٤٠ keV تا ۱۰ MeV و در هر انرژی تا ۱۰ مسیر آزاد میانگین محاسبه شدند که نتایج به دست آمده و بحث در مورد آنها در بخش بعد ارائه شده است. چون ضرایب انباشت غالباً برای محیطهایی با ابعاد بینهایت محاسبه می‌شوند، در اینجا ضخامت بینهایت جذب در هر انرژی ۱۳ مسیر آزاد میانگین (یعنی همان گونه که مرسوم است ۳ مسیر آزاد میانگین بیشتر از حداکثر ضخامت مورد نظر) انتخاب شد. با توجه به اینکه با افزایش تعداد رویدادها ($N_\circ$)، خطای آماری نتایج به دست آمده کاهش می‌یابد، در محاسبات نهایی انجام شده برای سرب $N_\circ=10^7$ و برای آب که به دلیل رخ دادن پراکندگیهای بیشتر زمان کامپیوتری بیشتری لازم داشت $N_\circ=5\times10^6$ رویداد انتخاب شد. با این انتخابها حداکثر خطای آماری ضرایب انباشت به دست آمده که در $\mu R=10$ اتفاق می‌افتد کمتر از ۸ درصد است.

٦. نتایج و بحث

٦،١. مقایسه با ضرایب استاندارد

ضرایب انباشت پرتوگیری فوتونها با به کارگیری سطح

1. mean free path (mfp)

www.SID.ir

Archive of SID

مقطعهای مرجع [٦] با استفاده از روش ممانها و بدون در نظر گرفتن پراکندگیهای همدوس، برای هوا، آب و آهن در گستره انرژی ۰/۰۱۵ تا ۱۵ MeV محاسبه شده‌اند [١٦]. این ضرایب برای سرب نیز با استفاده از کد کامپیوتری "پالاس" به روش طولهای گسسته [١٧] و کد کامپیوتری "ای.جی.اس٤" به روش مونت کارلو [١٨]، با به کارگیری سطح مقطعهای مرجع [٨] بدون در نظر گرفتن پراکندگیهای همدوس محاسبه شده‌اند. در تمام محاسبات فوق از انرژی بستگی الکترونها در اتمهای مربوطه صرف نظر شده و پراکندگیهای کامپتون توسط الکترونهای آزاد منظور شده‌اند.

برای بررسی عملکرد برنامهٔ نوشته شدهٔ خود، آن را برای آب، آهن و سرب در شرایطی مشابه با شرایط هر یک از محاسبات فوق اجرا کردیم که نتایج آن در جدولهای ۱، ۲ و ۳ در انرژیهای ۰/۱، ۱ و ۱۰ MeV ارائه شده‌اند. در همین جدولها ضرایب مراجع [١٦، ١٧ و ١٨] (که معمولاً ضرایب استاندارد نامیده می‌شوند) جهت مقایسه آورده شده‌اند. در مورد سرب ضرایب مرجع [١٩] (موجود در مرجع ٤) نیز برای مقایسه آورده شده‌اند. همان گونه که مشاهده می‌شود سازگاری بسیار خوبی بین نتایج این مقاله و کارهای قبلی وجود دارد و اختلافهای جزئی را می‌توان به ماهیت متفاوت روشهای مختلف مربوط دانست. تنها برای سرب در انرژی ۰/۱ MeV بین نتایج این کار و نتایج مراجع مختلف (و همچنین بین نتایج مراجع مختلف) تفاوتهای قابل ملاحظه‌ای مشاهده می‌شود که این اختلافها با بزرگتر شدن μR افزایش می‌یابند. نظر به اینکه تابشهای x فلورسانس در انرژی ۰/۱ MeV برای سرب بیشترین تأثیر را روی ضرایب انباشت دارند، این اختلافها را می‌توان ناشی از نحوهٔ برخورد متفاوت مراجع مختلف با این تابشها دانست. در این مقاله از روش مرجع [١٣] برای منظور کردن این تابشها استفاده شده است.

۲،٦. اثر پراکندگیهای ناهمدوس و همدوس

در اغلب محاسبات مربوط به ضرایب انباشت پرتوگیری فرض می شود فوتونها توسط الکترونهای آزاد پراکنده می‌شوند (پراکندگی کامپتون) و از اثر بستگی الکترونها در اتمهای مربوطه صرف نظر می‌شود (وقتی اثر بستگی الکترونها منظور شود پراکندگی ناهمدوس نامیده می‌شود). به علاوه از پراکندگیهای همدوس فوتونها (که پراکندگی بدون تغییر طول موج است) نیز صرفنظر می‌شود. ضرایب پرتوگیری در صورتی درست و دارای دقت لازم خواهند بود که هر دو برهم کنش فوق در محاسبات مربوطه منظور شوند.

در این مقاله اثر هر یک از برهم‌کنشهای فوق به تنهایی و همچنین اثر توام آنها بر روی ضرایب انباشت پرتوگیری در آب و سرب به تفصیل مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده نشان داد که پراکندگیهای ناهمدوس به تنهایی موجب کاهش ضرایب انباشت پرتوگیری می‌شوند و اثر آنها در مورد هر دو ماده تنها تا انرژیهایی حدود ۲۰۰ keV قابل ملاحظه است. پراکندگیهای همدوس که با Z^2 ماده متناسب‌اند در هر دو ماده موجب افزایش ضرایب پرتوگیری می‌شوند و اثر آنها در مورد آب تا انرژیهای حدود ۲۰۰ keV و در مورد سرب تا انرژیهای ۲۰۰۰ keV قابل ملاحظه است. اثر توام پراکندگیهای ناهمدوس و همدوس بر ضرایب انباشت پرتوگیری در شکلهای ۱ و ۲ به ترتیب برای آب و سرب نشان داده شده است. در مورد آب، همان طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، این برهم‌کنشها در ٤۰ keV بیشترین اثر را روی ضرایب انباشت دارند که این اثر با بزرگتر شدن μR افزایش می‌یابد به طوری که در ۱۰ μR (که خطای آماری حدود ۸ درصد است) افزایش ضریب انباشت در اثر این برهم‌کنشها حدود ۸۸ درصد است. اثر این برهم‌کنشها در آب تا حدود ۲۰۰ keV قابل ملاحظه و از آن به بعد بسیار ناچیز است. در مورد سرب، شکل ۲، پراکندگیهای ناهمدوس و همدوس بیشترین اثر را در ۸۰ keV نشان می‌دهند، چون برای این ماده در انرژیهای زیر ۸۰ keV اثر غالب اثر فوتوالکتریکی است و پراکندگیها به طور کلی نقش کمتری دارند. اثر پراکندگیهای ناهمدوس و همدوس در انرژی ۸۰ keV و ۱۰=μR (جایی که خطای آماری حدود ۷ درصد است) موجب تغییر ضریب انباشت تا بیش از ۲۰۰ درصد شده است. اثر برهم‌کنشهای فوق بر ضرایب انباشت در سرب تا انرژیهای حدود ۲۰۰۰ keV قابل ملاحظه و از آن به بعد ناچیز است. علت مشهود نبودن اثر پراکندگیهای ناهمدوس و همدوس در انرژی ۰/۱ MeV، تحت‌الشعاع قرار گرفتن این برهم‌کنشها توسط تابشهای فلورسانس است که در ۰/۱ MeV در سرب بیشترین اثر را دارند.

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۱. مقایسه ضرایب انباشت پرتوگیری با ضرایب استاندارد در E_γ=۰/۱ MeV

	آب		آهن		سرب			
mfp (μR)	این کار*	مرجع [۱۶]	این کار*	مرجع [۱۶]	این کار**	مرجع [۱۷]	مرجع [۱۸]	مرجع [۱۹]
۱	٤/۳٥	٤/٥۲	۱/۳۷	۱/٤۰	۲/۱٤	۲/۰٤	۲/۱۷	۲/۳٥
۲	۱۱/٤۷	۱۱/۷	۱/٥۷	۱/٦۱	۳/٤۱	۳/۳۹	۳/٥۳	۳/٦۸
۳	۲۳/۲۳	۲۳/٥	۱/۷٤	۱/۷۸	٥/۲۸	٥/٦۰	٥/٥۷	٥/۹٦
٤	٤۰/٤٦	٤۰/٦	۱/۸٦	۱/۹٤	۸/۲۱	۹/٥۹	۸/۹۹	۹/۸٤
٥	٦۳/۹۹	٦٤/۰	۱/۹۸	۲/۰۷	۱۳/۰۰	۱۷/۰	۱٤/۸	۱٦/۲
٦	۹٥/۰۸	۹٤/۸	۲/۰۹	۲/۲۰	۲۰/۹٤	۳۰/٦	۲٥/۰	۲٤/٤
۷	۱۳٥/۰۱	۱۳٤	۲/۱۷	۲/۳۱	۳٤/۲۰	٥٤/۹	٤۳/۲	٤۳/۲
۸	۱۸٤/٥۰	۱۸۳	۲/۲٦	۲/٤۱	٥٦/۲٥	۹٤/۷	۷٥/۹	۷۱/۱
۱۰	۳۱٤	۳۱٤	۲/٤۹	۲/٦۱	۱٥٦	۲۹٤	۲٤۳	۱۹۸

جدول ۲. مقایسه ضرایب انباشت پرتوگیری با ضرایب استاندارد در E_γ= ۱ MeV

	آب		آهن		سرب			
mfp (μR)	این کار*	مرجع [۱۶]	این کار*	مرجع [۱۶]	این کار**	مرجع [۱۷]	مرجع [۱۸]	مرجع [۱۹]
۱	۲/۰٦	۲/۰۸	۱/۸٥	۱/۸٥	۱/۳۷	۱/۳۱	۱/۳۸	۱/۳۸
۲	۳/٥۸	۳/٦۲	۲/۸۸	۲/۸٥	۱/٦٦	۱/٦۱	۱/۹۷	۱/٦٦
۳	٥/٤٦	٥/٥۰	٤/۰۹	٤/۰۰	۱/۹۳	۱/۸۷	۱/۹۷	۱/۹۳
٤	۷/٦۳	۷/٦۸	٥/٤۷	٥/۳۰	۲/۱٦	۲/۱۰	۲/۲۳	۲/۱۸
٥	۱۰/۰٤	۱۰/۱	۷/۰۲	٦/۷٤	۲/٤۰	۲/۳۲	۲/٤۹	۲/٤۲
٦	۱۲/٦۷	۱۲/۸	۸/۷۱	۸/۳۱	۲/٦۱	۲/٥٤	۲/۷۲	۲/٦٥
۷	۱٥/٥٦	۱٥/۸	۱۰/٥۹	۱۰/۰	۲/۸۲	۲/۷٥	۲/۹٥	۲/۸٦
۸	۱۸/۸۱	۱۹/۰	۱۲/٤۹	۱۱/۸	۳/۰۱	۲/۹٦	۳/۱٦	۳/۰۷
۱۰	۲٤/۸۷	۲٦/۱	۱٦/۷۸	۱٥/۸	۳/۳۸	۳/۳۷	۳/٦۲	۳/٤۷

* این نتایج با به کارگیری سطح مقطعهای NSRDS-NBS-29 [٦] به دست آمده‌اند.

** این نتایج با به کارگیری سطح مقطعهای PHOTX [۸] به دست آمده‌اند.

۳،٦. نتایج نهایی

ضرایب انباشت پرتوگیری برای چشمه‌های نقطه‌ای در آب (به عنوان یک ماده سبک) و در سرب (به عنوان یک ماده با Z بزرگ) در گستره انرژی از ٤۰ keV تا ۱۰ MeV و در هر انرژی تا ۱۰ مسیر آزاد میانگین، به روش مونت-کارلو محاسبه شدند. این ضرایب که با در نظر گرفتن انواع برهم‌کنشهای فوتون با ماده و در نظر گرفتن پراکندگیهای ناهمدوس و همدوس فوتونها و همچنین منظور کردن تابشهای فلورسانس و به کارگیری آخرین سطح مقطعهای موجود [۹] محاسبه شدند در جدولهای ٤ و ٥ به ترتیب برای آب و سرب ارائه شده‌اند. در

www.SID.ir

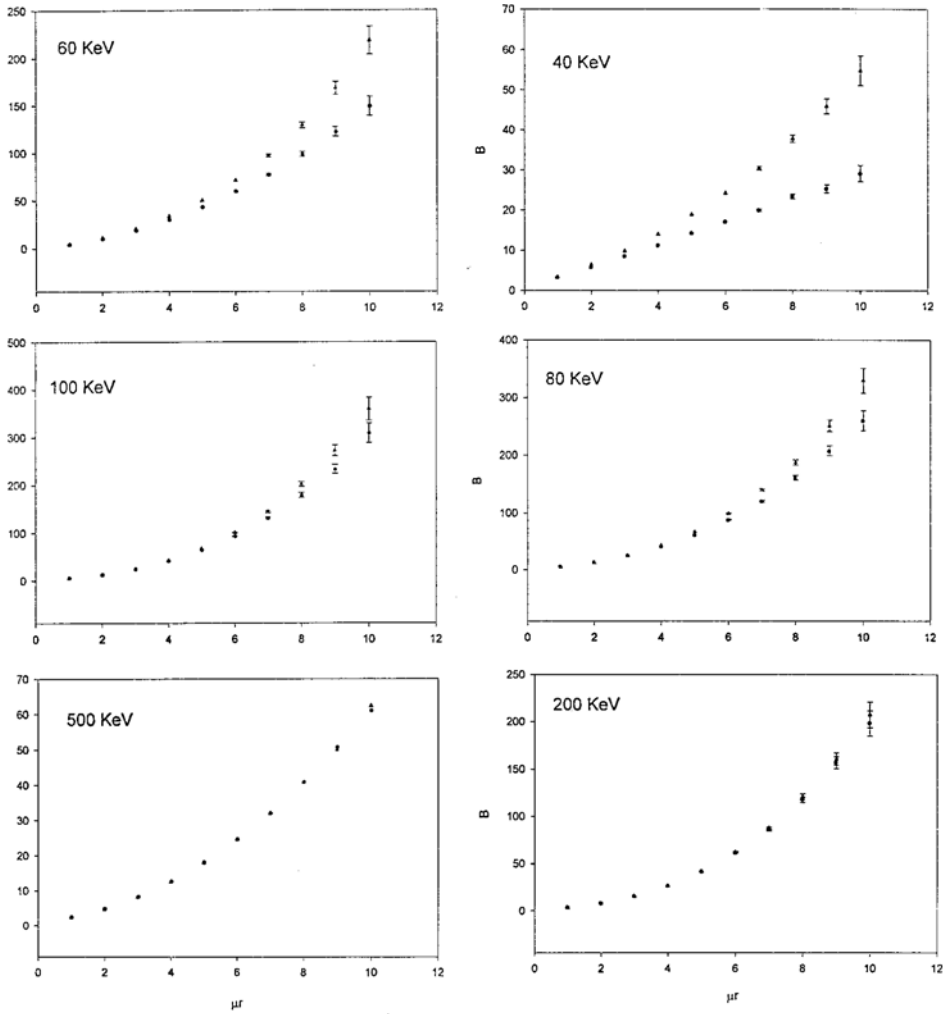
Archive of SID

جدول ۳. مقایسه ضرایب انباشت پرتوگیری با ضرایب استاندارد در E_γ= ۱۰ MeV

	آب		آهن		سرب		
Mfp (μR)	این کار*	مرجع [۱۶]	این کار*	مرجع [۱۶]	این کار**	مرجع [۱۸]	مرجع [۱۹]
۱	۱/۳۸	۱/۳۷	۱/۳٤	۱/۳۳	۱/۱۹	۱/۲۰	۱/۱۸
۲	۱/٦۹	۱/٦۸	۱/٦۱	۱/۵۹	۱/۳۳	۱/۳۳	۱/۳۱
۳	۲/۰۰	۱/۹۷	۱/۸۹	۱/۸٦	۱/۵۱	۱/۵۰	۱/٤۸
٤	۲/۲۸	۲/۲۵	۲/۲۱	۲/۱٦	۱/۷۵	۱/۷۱	۱/٦۸
۵	۲/۵۵	۲/۵۳	۲/۵٦	۲/۵۰	۲/۰٦	۱/۹۸	۱/۹۳
٦	۲/۸۵	۲/۸۰	۲/۹۲	۲/۸۷	۲/٤۹	۲/۳۲	۲/۲٤
۷	۳/۱۸	۳/۰۷	۳/۳٦	۳/۲۷	۲/۹۷	۲/۷٤	۲/٦۳
۸	۳/٤۲	۳/۳٤	۳/۷۸	۳/۷۱	۳/۷۲	۳/۲۸	۳/۱۱
۱۰	٤/۳۹	۳/۸٦	٤/٦۵	٤/٦۹	۵/۹٦	٤/۸۳	٤/٤۳

* این نتایج با به کارگیری سطح مقطعهای NSRDS-NBS-29 [٦] به دست آمده‌اند.

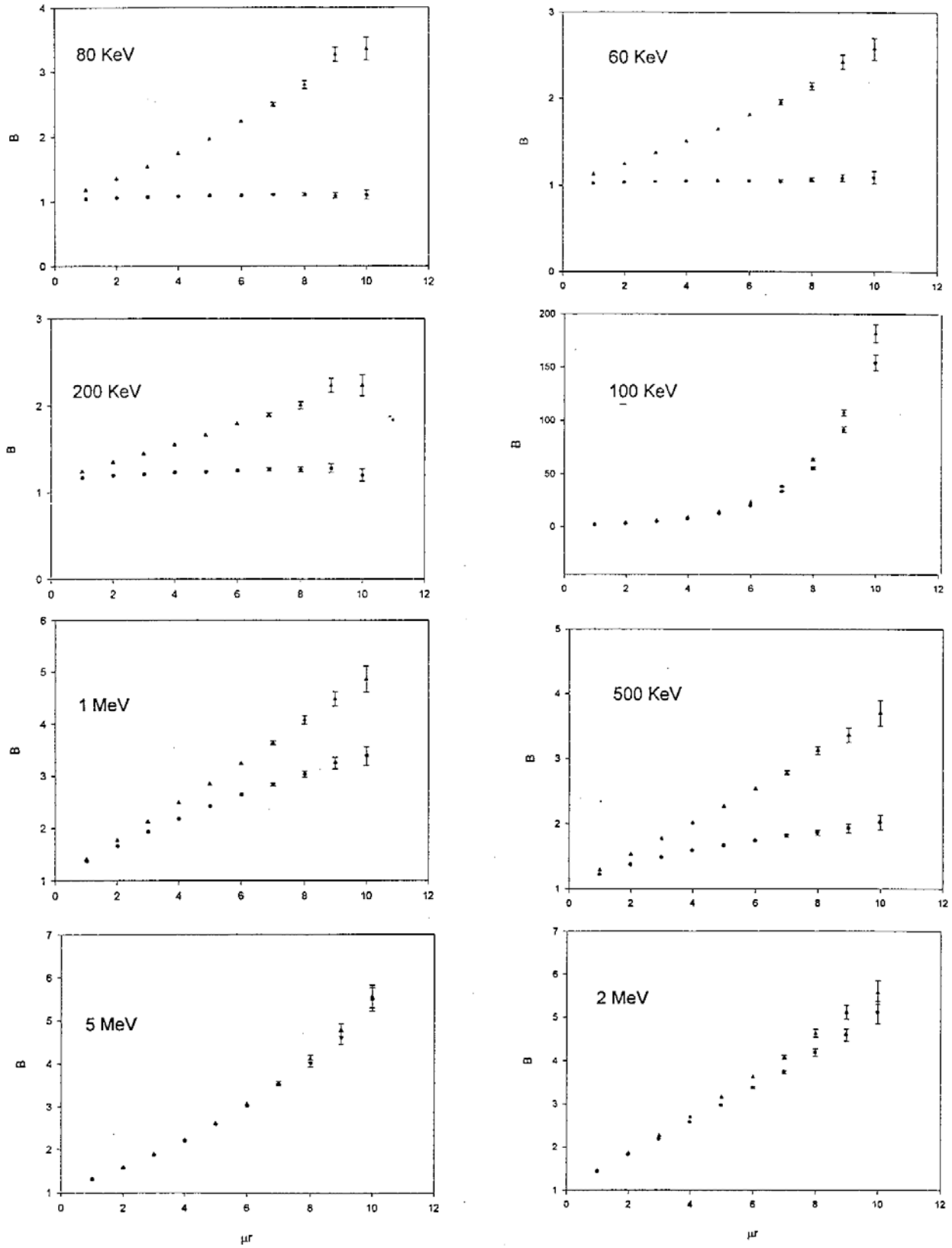
** این نتایج با به کارگیری سطح مقطعهای PHOTX [۸] به دست آمده‌اند.



شکل ۱. ضریب انباشت پرتوگیری برحسب تعداد مسیر آزاد میانگین برای انرژیهای مختلف گاما در آب (● الکترون آزاد و بدون در نظر گرفتن پراکندگی همدوس، ▲ الکترون مقید و با در نظر گرفتن پراکندگی همدوس).

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۲. ضریب انباشت پرتوگیری برحسب تعداد مسیر آزاد میانگین برای انرژیهای مختلف گاما در سرب (● الکترون آزاد و بدون در نظر گرفتن پراکندگی همدوس، ▲ الکترون مقید و با در نظر گرفتن پراکندگی همدوس).

www.SID.ir

جدول ٤. ضرایب انباشت برای آب

انرژی اشعهٔ گاما (MeV)										
μR (mfp)	۰/۰٤	۰/۰٦	۰/۰۸	۰/۱	۰/۲	۰/۵	۱	۲	۵	۱۰
۱	۳/٤۰۱±۰/۰۰۳	٤/٦٦٥±۰/۰۰٤	٤/٦۸٦±۰/۰۰٤	٤/۳۲۸±۰/۰۰٤	۳/۱۷۵±۰/۰۰۳	۲/۳۹۹±۰/۰۰۲	۲/۰۵۷±۰/۰۰۲	۱/۸۲۲±۰/۰۰۲	۱/۵۷۰±۰/۰۰۱	۱/۳۸۵±۰/۰۰۱
۲	٦/۳۸۹±۰/۰۰۹	۱۱/۲۳۵±۰/۰۱۵	۱۲/۲٤۸±۰/۰۱٦	۱۱/٤۹۵±۰/۰۱۵	۷/٦٦۱±۰/۰۱۰	٤/۷۹۷±۰/۰۰٦	۳/۵۸۹±۰/۰۰۵	۲/۸۰۳±۰/۰۰٤	۲/۰۹۹±۰/۰۰۳	۱/٦۹۹±۰/۰۰۲
۳	۹/۸۷۹±۰/۰۲۱	۲۰/۸٤٤±۰/۰٤٤	۲٤/٤٦٦±۰/۰۵۱	۲۳/۵۲٦±۰/۰٤۹	۱۵/۱۱۳±۰/۰۳۱	۸/۲۰۹±۰/۰۱۷	۵/٤٦٦±۰/۰۱۱	۳/۸٤۹±۰/۰۰۸	۲/٦۰٦±۰/۰۰٦	۱/۹۹٦±۰/۰۰٤
٤	۱۳/۹٤٦±۰/۰٤۹	۳۳/۸٤٦±۰/۱۱۵	٤۱/۹۹٤±۰/۱٤۲	٤۱/٦۳۳±۰/۱٤۰	۲٦/۱۵۲±۰/۰۸۷	۱۲/٦۲۲±۰/۰٤۲	۷/٦۲٤±۰/۰۲٦	٤/۹٤۸±۰/۰۱۷	۳/۱۰۸±۰/۰۱۱	۲/۲۷٦±۰/۰۰۸
۵	۱۸/۸٦۲±۰/۱۰۸	۵۰/٤۹۷±۰/۲۸	٦٦/۱۸۰±۰/۳۷	٦۷/۰۸۳±۰/۳۷	٤۱/۵۲۳±۰/۲۳	۱۸/۱۰۷±۰/۱۰	۱۰/۱۰٤±۰/۰۵٦	٦/۱۲۵±۰/۰۳٤	۳/٦۱۲±۰/۰۲۰	۲/۵٦۹±۰/۰۱۵
٦	۲٤/۱٦٤±۰/۲۳	۷۱/٤٤٦±۰/۷	۹۸/٤۹۵±۰/۹	۱۰۰/۸۷۹±۰/۹	٦۱/۸۷۱±۰/٦	۲٤/۵۲۹±۰/۲۲	۱۲/۷٦٦±۰/۱۲	۷/۲۹۰±۰/۰۷	٤/۰۹۲±۰/۰۳۸	۲/۸۲۷±۰/۰۲۷
۷	۳۰/۳٦٤±۰/۵	۹۷/٤٦۲±۱/۵	۱۳۹/۰٤۰±۲/۱	۱٤۵/۳۱۹±۲/۲	۸۷/٦۰۷±۱/۳	۳۱/۹٤۵±۰/۵	۱۵/۸۲٤±۰/۲٤	۸/٤۸۹±۰/۱۳	٤/٦۲٤±۰/۰۷	۳/۰٤۳±۰/۰۵
۸	۳۷/۷۳۳±۰/۹	۱۲۹/۷۲۵±۳/۲	۱۸۷/۰۷۷±٤/٦	۲۰۲/۵۷٦±۵	۱۲۰/٦۲۸±۳	٤۰/۷۲۳±۱	۱۸/۸۸٦±۰/۵	۹/۸۵۰±۰/۲۵	۵/۰٤۸±۰/۱۳	۳/۳۸۹±۰/۰۹
۹	٤۵/۷۸۵±۱/۹	۱٦۸/٤۵۸±٦/۸	۲۵۰/٤۸۳±۱۰/۱	۲۷۲/٦٦۸±۱۱	۱٦۰/۵۹۹±٦/۵	٤۹/۹۰۱±۲	۲۲/۵۳۸±۱	۱۱/۱۱٦±۰/٤۵	۵/۵۰۸±۰/۲۳	۳/٦۱۱±۰/۱۵
۱۰	۵٤/۷۱۵±۳/۷	۲۱۸/٤۰۷±۱٤/٦	۳۲۹/۱۸۷±۲۱/۹	۳۵۹/٦۵۹±۲٤	۲۰٦/۹۷۲±۱۳/۷	٦۲/۳۰۹±٤/۱	۲۵/۸۸۸±۱/۷	۱۲/۰۵۱±۰/۸	۵/٦۲۹±۰/۳۸	۳/۷۳۹±۰/۰۷

Archive of SID
www.SID.ir

Archive of SID

www.SID.ir

جدول ۵. ضرایب انباشت برای سرب

μR (mfp)	انرژی اشعهٔ گاما (MeV)									
	۰/۰٤	۰/۰٦	۰/۰۸	۰/۱	۰/۲	۰/۵	۱	۲	۵	۱۰
۱	۱/۰۷۸±۰/۰۰۰۷	۱/۱۲۵±۰/۰۰۰۷	۱/۱۷٦±۰/۰۰۰۸	۲/۱۵۵±۰/۰۰۱	۱/۲٤٤±۰/۰۰۱	۱/۲۹۱±۰/۰۰۱	۱/٤۰۵±۰/۰۰۱	۱/٤٤۳±۰/۰۰۱	۱/۳۱۰±۰/۰۰۱	۱/۱۸۷±۰/۰۰۱
۲	۱/۱٤۷±۰/۰۰۱	۱/۲٤۳±۰/۰۰۱	۱/۳٤۸±۰/۰۰۲	۳/۵۰۲±۰/۰۰۳	۱/۳۵۱±۰/۰۰۲	۱/۵۳۱±۰/۰۰۲	۱/۷٦۸±۰/۰۰۲	۱/۸٤٦±۰/۰۰۲	۱/۵۷٦±۰/۰۰۱	۱/۳۲٤±۰/۰۰۱
۳	۱/۲۱۵±۰/۰۰۲	۱/۳۷۰±۰/۰۰٦	۱/۵۳۵±۰/۰۰۳	۵/٦۵۷±۰/۰۰۹	۱/٤٤۷±۰/۰۰۳	۱/۷٦۹±۰/۰۰۳	۲/۱۲۵±۰/۰۰٤	۲/۲٦۰±۰/۰۰٤	۱/۸۷۹±۰/۰۰۳	۱/٤۹۵±۰/۰۰۳
٤	۱/۲۹۵±۰/۰۰۳	۱/۵۰۳±۰/۰۰٤	۱/۷۳۸±۰/۰۰۵	۸/۷٦۰±۰/۰۲۲	۱/۵۵۲±۰/۰۰۵	۲/۰۱۰±۰/۰۰٦	۲/٤۷۸±۰/۰۰۷	۲/٦۹٦±۰/۰۰۷	۲/۲۲۵±۰/۰۰٦	۱/۷۰۵±۰/۰۰۵
۵	۱/۳۷٤±۰/۰۰۵	۱/٦۳۹±۰/۰۰۸	۱/۹٦۱±۰/۰۰۹	۱٤/۱۲۷±۰/۰۵٦	۱/٦٦۲±۰/۰۰۸	۲/۲٦۲±۰/۰۱	۲/۸٤۱±۰/۰۱۲	۳/۱٤۷±۰/۰۱٤	۲/٦۲۸±۰/۰۱۱	۱/۹٦۵±۰/۰۰۸
٦	۱/٤٤۵±۰/۰۰۹	۱/۸۰۵±۰/۰۱٤	۲/۲۳۵±۰/۰۱۷	۲۳/۰۳۸±۰/۱۵	۱/۷۹۰±۰/۰۱٤	۲/۵۲۷±۰/۰۱۹	۳/۲۳۵±۰/۰۲۳	۳/٦۰۹±۰/۰۲۵	۳/۰۷۵±۰/۰۲۱	۲/۳۰۳±۰/۰۱٦
۷	۱/٤۹۷±۰/۰۱۵	۱/۹۵۵±۰/۰۳	۲/٤۹۷±۰/۰۳	۳۸/۰۹۸±۰/٤	۱/۸۹۱±۰/۰۲	۲/۷۸۲±۰/۰۳	۳/٦۳٦±۰/۰٤	٤/۰۷۵±۰/۰٤	۳/۵٤۷±۰/۰٤	۲/٦۸٤±۰/۰۳
۸	۱/۵٤۹±۰/۰۲٤	۲/۱٤۳±۰/۰٤	۲/۸۰۰±۰/۰٦	٦۳/۷۲۹±۱/۱	۲/۰۰۵±۰/۰٤	۳/۱۲٤±۰/۰٦	٤/۰۷۳±۰/۰۸	٤/٦۲۹±۰/۰۹	٤/۱۱٦±۰/۰۸	۳/۲۷۳±۰/۰٦
۹	۱/۷۰۷±۰/۰٤	۲/٤۲۰±۰/۰۸	۳/۲٦٦±۰/۱۱	۱۰۷/۳۱۲±۳	۲/۲۳۳±۰/۰۸	۳/۳۵٦±۰/۱۱	٤/٤۷۸±۰/۱٤	۵/۱۱۷±۰/۱٦	٤/۷۷۹±۰/۱٤	۳/۹۵۷±۰/۱۲
۱۰	۱/۷۹۸±۰/۰۷۱	۲/۵۷۱±۰/۱۳	۳/۳۵۲±۰/۱۸	۱۸۱/۷۲٦±۸/۵	۲/۲۳۳±۰/۱۲	۳/٦۹۷±۰/۲	٤/۸۵۸±۰/۲۵	۵/۵۷۳±۰/۲۸	۵/۵۵۲±۰/۲۷	٤/۷۰۸±۰/۲۳

Archive of SID

جدول ٦. ضرایب انباشت مرجع [۲۰] در چند انرژی برای آب و سرب

انرژی اشعهٔ گاما (MeV)						
μR (mfp)	۰/۱		۱		۱۰	
	آب	سرب	آب	سرب	آب	سرب
۱	۵/۰۸	۱/۰۹٦	۲/۱۵٤	۱/٤۳۸	۱/٤۱٦	۱/۲۱٦
۲	۱۳/۹۹	۱/۱٦۹	۳/۸۳۱	۱/۸۲۳	۱/۷٤۱	۱/۳٦٤
۳	۲۹/۲۲	۱/۲۵۵	۵/۹۰۵	۲/۲۰۰	۲/۰۵۰	۱/۵۳۹
٤	۵۲/۳٤	۱/۳٦۰	۸/۳۰	۲/۵۷۵	۲/۳۵٤	۱/۷۵۸
۵	۸۵/۰۹	۱/۵۰۸	۱۰/۹۹	۲/۹۵۲	۲/٦۵۳	۲/۰۳۲
٦	۱۲۹/٤	۱/۷۳۹	۱۳/۹٦	۳/۳۳٦	۲/۹٤۷	۲/۳۷۵
۷	۱۸۷/۵	۲/۱۲۸	۱۷/۲۱	۳/۷۳۰	۳/۲۳۷	۲/۸۰٦
۸	۲٦۱/۹	۲/۸۱۸	۲۰/۷۲	٤/۱۳٤	۳/۵۲۱	۳/۳٤۷
۱۰	٤۷۱/۰	٦/٤۱۸	۲۸/٤۹	٤/۹۷۹	٤/۰۷۸	٤/۸۹٤

جدول ۷. ضرایب انباشت پرتوگیری (B) بدون در نظر گرفتن تابشهای فلورسانس در انرژی ۰/۱ MeV برای سرب

μR (mfp)	۱	۲	۳	٤	۵	٦	۷	۸	۹	۱۰
B	۱/۰٦۵	۱/۱۲۹	۱/۲۰٦	۱/۳۰۲	۱/٤٤۲	۱/٦٤۳	۱/۹۷۵	۲/۵٦۱	۳/۷۷۲	۵/۷۹۷

جدول ٦ ضرایب محاسبه شده قبلی [۲۰] که در شرایطی مشابه شرایط این مقاله، لیکن به روش طولهای گسسته، بدون در نظر گرفتن تابشهای فلورسانس و به کارگیری سطح مقطعهای قدیمیتر [۲۱]، محاسبه شده‌اند، در چند انرژی برای مقایسه آورده شده‌اند. اختلاف بین نتایج به دست آمده در این مقاله را با نتایج مرجع [۲۰] می‌توان عمدتاً به علت متفاوت بودن سطح مقطعها دانست. این اختلافها در مورد آب بین ۲ تا حداکثر ۳۰ درصد و در مورد سرب عموماً کمتر از ۵ درصد هستند. اختلاف بسیار زیاد نتایج این مقاله با نتایج مرجع [۲۰] در انرژی ۰/۱ MeV برای سرب، به دلیل منظور نکردن تابشهای فلورسانس در محاسبات مرجع [۲۰] است. جدول ۷ که در آن ضرایب انباشت پرتوگیری در ۰/۱ MeV، بدون در نظر گرفتن تابشهای فلورسانس آورده شده‌اند، این واقعیت را نشان می‌دهد.

نتیجه گیری

با توجه به اینکه ضرایب انباشت پرتوگیری محاسبه شده در این مقاله با استفاده از آخرین سطح مقطعهای موجود در اینترنت به دست آمده‌اند و شامل انواع برهم‌کنشهای فوتون با ماده می‌باشند، می‌توان آنها را ضرایب انباشت پرتوگیری اصلاح شده در نظر گرفت و در محاسبات حفاظگذاری برای چشمه‌های پرتوزا و رآکتورهای هسته‌ای از آنها استفاده کرد.

سپاسگزاری

این کار به عنوان بخشی از طرح تحقیقاتی 1PHB771 از حوزه معاونت پژوهشی دانشگاه صنعتی اصفهان انجام شده است که به خاطر فراهم آوردن تسهیلات لازم جهت انجام این پژوهش تشکر و قدردانی می‌شود.

www.SID.ir

Archive of SID

مراجع

1. H Cember, "Introduction to health Physics", Pergamon press, 299 (1988).
2. U T Lin, C C Tseng and S H Jiang, *Nucl. Sci. Eng*. **122**, (1996) 121.
3. Y Harima, *Radiat. Phys. Chem*. **41**, (1993), 631.
4. A B Chilton, J K Shultis and R E Faw, "Principles of radiation shielding," Prentice-Hall, (1984), 337.
5. E Storm and H I Israel, "Photon cross sections from 0.001 to 100 MeV for elements 1 through 100," report LA-3753, Los Alamos scientific laboratory, Los Alamos, N. Mex. (1967).
6. J H Hubbell, "Photon cross sections, attenuation coefficients and energy absorption coefficients from 10 keV to 100 GeV," NSRDS-NBS-29, National Bureau of Standards (1969).
7. E Storm and H I Israel, "Photon cross sections from 1 keV to 100 MeV for elements Z=1 to Z=100," Nucl. Data Tables A7, (1970) 565 (also designed as radiation shielding informantion center tape DLC-15).
8. "Photon interaction cross section library," radiation shielding information center data package DLC-136/PHOTX, National Institute of Standards and Technology.
9. XCOM: Partial interaction coefficients and total attenuation coefficients, http:/physics. nist. gov/cgi-bin/Xcom/xcom3-3. (Last update: July 1998).
10. P Marmier and E Sheldon, "Physics of nuclei and particles," Volume 1, Academic Press, (1971) 106.
11. J F Williamson, F C Deibel and R L Morin, *Phys. Med. Biol.* **29**, (1984) 1063.
12. J H Hubbell, W J Veigele, E A Briggs, R T Brown, D T Cromer and R J Howerton, *J. Phys. Chem*. Ref Data 4 No. 3, (1975) 471.
13. S Tanaka and K Takeuchi, *Nucl. Sci. Eng*. **93**, (1986) 376.
14. C D Zerby, Methods in Computational Physics **1**, (1963) 89.

۱۵. ا شیرانی و م ح علامت‌ساز "شبیه‌سازی جذب تابشهای گاما در بافتهای نرم،" گزارش طرح تحقیقاتی، دانشگاه صنعتی اصفهان، (۱۳۷۱).

16. A B Chilton, C M Eisenhauer and G L Simons, *Nucl. Sci. Eng.* **73**, (1980) 97.
17. D K Trubey, "New gamma-ray buildup factor data for point kernel calculations, ANS-6.4.3 Standard Reference Data," NUREG/CR-5740, U. S. Nuclear Regulatory Commission (1991).
18. H Hirayama, *J. Nucl. Sci. Technol*. **32**, (1995) 1201.
19. G L Simmons and C M Eisenhauer, unpublished data.
20. S Kitsos, A Assad, C M Diop, J C Nimal and P Ridoux, *Nucl. Sci. Eng.* **117**, (1994) 47.
21. D E Cullen, M H Chen, J H Hubbell, S T Perkins, E F Plechaty, J A Rathkopf and J H Scofield, "Tables and graphs of photon interaction cross sections from 10 eV to 100 GeV derived from the LLNL Evaluated Photon Data Library (EPDL)," UCRL-50400, Vol. 6, Lawrence Livermore National Laboratory (1989).

www.SID.ir