

alamatsa@cc.iut.ac.ir :

(دریافت مقاله: ۱۳۸۸/۸/۲۳؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۸۹/۴/۲۹)

MCNP

MCNP :

در این رابطه I_0 شدت پرتوهای فرودی، I شدت پرتوهای عبوری، B ضریب انباشت^۱، x ضخامت ماده جاذب و μ ضریب تضعیف خطی است که به انرژی فوتون فرودی و عدد اتمی محیط بستگی دارد. ضرایب انباشت برای کمیت‌هایی چون شار، دز و پرتودهی^۲ (یا پرتوگیری) به کار می‌رود. ضریب انباشت کمیتی بزرگتر یا مساوی یک است و به صورت نسبت شدت پرتوهای اولیه و پراکنده شده در هر نقطه از باریکه به شدت پرتوهای اولیه در همان نقطه، تعریف می‌شود [۱، ۲ و ۳].

امروزه تکنولوژی هسته‌ای و کاربردهای آن در صنعت، کشاورزی و پزشکی پیشرفت‌های روز افزونی یافته است. بنابراین حفاظ‌گذاری در مقابل تابش‌های هسته‌ای به خاطر اثرهای زیان‌آور این تابش‌ها بسیار اهمیت پیدا کرده است. در میان این تابش‌ها، بررسی حفاظ‌گذاری برای پرتو گاما به علت نفوذ زیاد آن در مواد مختلف اهمیت زیادی دارد.

می‌دانیم که نفوذ فوتون‌ها در ماده به صورت تابعی نمایی می‌باشد. معادله‌ای که برای شدت پرتو گاما در شرایط هندسی واقعی در نظر گرفته می‌شود، به صورت زیر است:

$$I = B(E, x)I_0 e^{-\mu x} \quad (1)$$

۱. Buildup factor

۲. Exposure

مراجع [۱۳ و ۱۴] اشاره کرد که اولی با استفاده از مدل SVR^۱، یک روش ریاضی برای محاسبه ضرایب انباشت در حفاظ‌های متوالی پیشنهاد می‌کند و مرجع دوم با استفاده از کد EGS4 و به‌کاربردن تکنیک جداسازی ویژه^۲ و روش ماتریس انتقال، در شرایط ذکر شده، ضرایب انباشت پرتودهی را محاسبه می‌کند. اخیراً نیز این ضرایب برای چشمه صفحه‌ای و حفاظ تیغه‌ای تک‌لایه با استفاده از کد محاسباتی MCNP^۳ محاسبه شده است [۱۵].

در این کار به کمک کد محاسباتی MCNP که بر اساس روش مونت کارلو نوشته شده است، ابتدا برای چشمه صفحه‌ای و حفاظ‌های دولایه آب و سرب، ضرایب انباشت پرتودهی را بدون تأثیر پراکندگی همدوس محاسبه کرده و با مراجع [۶ و ۷] مقایسه می‌کنیم و پس از آن تأثیر پراکندگی همدوس را بر ضرایب انباشت ذکر شده بررسی می‌کنیم. تاکنون تأثیر پراکندگی همدوس و تابش فلورسانس [۱۶] بر ضرایب انباشت پرتودهی در شرایط چشمه‌های نقطه‌ای و حفاظ‌های کروی تک‌لایه‌ای در مرجع [۱۲] و در حفاظ‌های کروی دولایه‌ای در مرجع [۱۱] بررسی شده‌اند. از آنجا که این ضرایب در حفاظ‌های تیغه‌ای با حفاظ‌های کروی متفاوتند و در مقدمه هم ذکر شد، ضرایب انباشت به هندسه محیط بستگی دارد و در این شرایط تحقیقات چندانی انجام نشده است، در این کار به بررسی پراکندگی همدوس در حفاظ‌های دولایه، دولایه آب - سرب و سرب-آب در شرایط چشمه صفحه‌ای و حفاظ تیغه‌ای می‌پردازیم.

در این کار هدف محاسبه ضرایب انباشت پرتودهی تابش‌های گاما با استفاده از کد محاسباتی MCNP برای چشمه‌های صفحه‌ای گاما می‌باشد که پرتوهای گاما تک جهت و عمود بر صفحه چشمه و حفاظ تیغه‌ای شامل دو لایه سرب-آب و

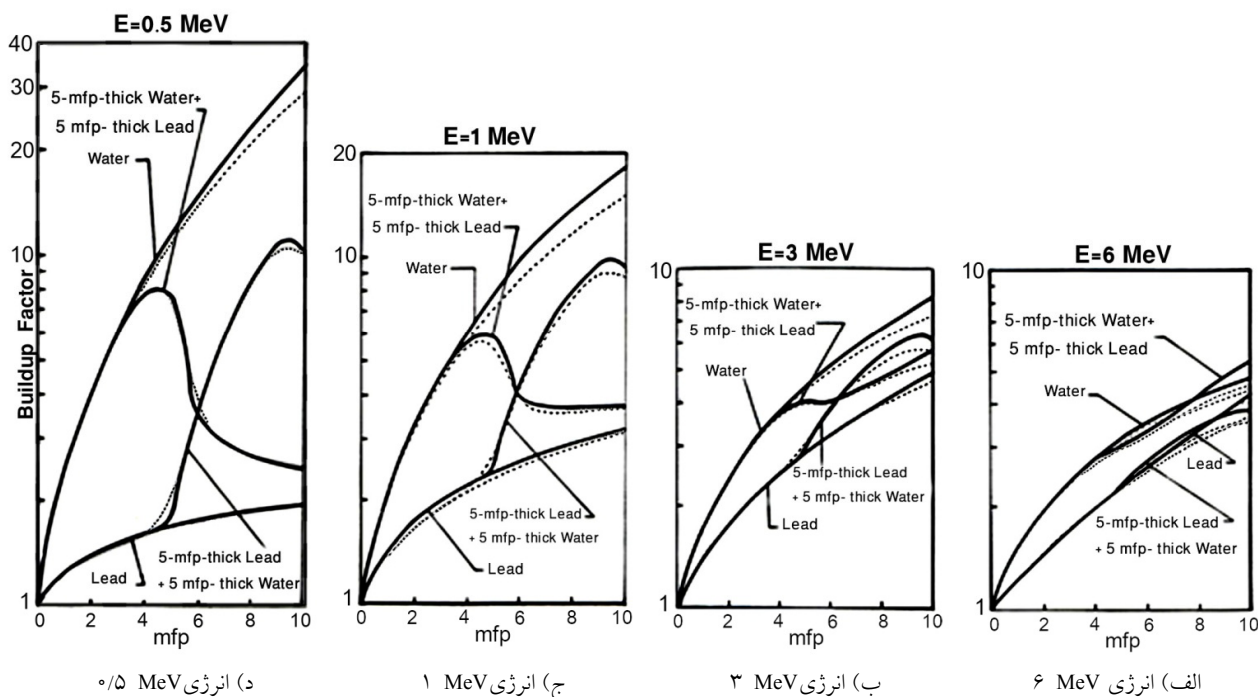
برای حالتی که بیشینه جذب داشته باشیم و سطح مقطع پراکندگی هم ناچیز باشد، ضریب انباشت برابر واحد، $B=1$ می‌باشد. ضرایب انباشت به کمیت‌هایی از قبیل: نوع ناحیه تضعیف (عدد اتمی)، سطح مقطع جذب و پراکندگی محیط، انرژی فوتون‌های چشمه، فاصله چشمه تا نقطه مورد نظر بر حسب پویش آزاد میانگین (mfp)، هندسه چشمه (نقطه‌ای، صفحه‌نرمال، صفحه همسانگرد)، کمیت مورد نظر (پرتودهی، دز...) بستگی دارد. ضریب انباشت نه فقط به خصوصیات حفاظ مورد نظر بلکه به حفاظ قبلی (در حالت دو یا چند لایه‌ای) که فوتون‌ها در آن نفوذ کرده‌اند بستگی دارد. این ضرایب در طراحی حفاظ‌های چشمه‌های پرتوزا و راکتورهای هسته‌ای و همچنین در محاسبات دز جذبی تابش‌های پرتوزا در بافت‌های بدن کاربرد زیادی دارند. ضریب انباشت نقش مهمی در محاسبات توزیع شار فوتون‌ها در هر هدف دارد [۴]. در پرتودرمانی تابش رادیواکتیو روشی برای از بین بردن غده‌های سرطانی است و از این رو توجه به ضریب انباشت در محاسبات دز تابش پرتو که به سلول‌های سرطانی می‌رسد، اجتناب‌ناپذیر است [۵].

به دلیل اهمیتی که ذکر شد، تلاش‌های زیادی در جهت اندازه‌گیری این ضرایب برای چند ماده مهم صورت گرفته است. از آنجا که تعیین دقیق این ضرایب از طریق آزمایش در همه مواد، کار آسانی نیست، این ضرایب را اغلب با استفاده از سطح مقطع‌های جذب و پراکندگی فوتون‌ها محاسبه می‌کنند. تاکنون تلاش‌هایی در زمینه محاسبه این ضرایب به کمک روش‌های محاسباتی و نوشتن برنامه‌های کامپیوتری انجام شده که می‌توان از آن جمله به مرجع [۶] که با استفاده از کد BIGGI-4T با روش حل معادله ترابرد فوتون‌ها و سطح مقطع برهم‌کنش‌ها در محیط‌های مورد نظر و مراجع [۷ و ۸] با استفاده از کد EGS4، مرجع [۹] با استفاده از کد PALLAS-PL به روش کرنل نقطه‌ای، مرجع [۱۰] با استفاده از روش ممان‌ها و مراجع [۱۱ و ۱۲] به روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو در شرایط واقعی برای هندسه‌های شامل چشمه‌های نقطه‌ای و صفحه‌ای و تیغه‌های تک‌لایه و دولایه، اشاره کرد. همچنین می‌توان به

۱. Support vector regression model

۲. Special splitting technique

۳. Monte Carlo N-Particles



شکل ۱. نمودارهای الف، ب، ج، د، مقایسه ضرایب انباشت پرتوگیری در شرایط چشمه صفحه‌ای و تیغه تک‌لایه و دولایه آب و سرب بدون تاثیر پراکندگی همدوس با مرجع [۶]. (خطوط پررنگ نتایج مرجع [۶] و خطوط نقطه چین نتایج کار ما با استفاده از کد محاسباتی MCNP می‌باشند).

کار از کارت کاهش واریانس imp استفاده کرده و برنامه را برای هر حالت و انرژی، برای مدت زمان ۶۰ دقیقه اجرا کردیم. همان‌طور که قبلاً گفته شد، ابتدا به مقایسه ضرایب انباشت پرتودهی گاما در تیغه‌های تک لایه آب و سرب و دولایه آب-سرب و همچنین سرب-آب (شامل ۵ mfp محیط اول و ۵ mfp محیط دوم) با مراجع [۶ و ۷] پرداختیم، که در آنها با استفاده از کدهای EGS4 و BIGGI-4T در انرژی‌های ۰/۵، ۱، ۳ و ۶ مگا الکترون ولت، بدون تأثیر پراکندگی همدوس و تابش ترمزی ضرایب انباشت محاسبه شده‌اند. نتایج این کار و نتایج مرجع [۶] در شکل ۱ به صورت نمودار ارائه شده‌اند (مقایسه نتایج مرجع [۷] با کار ما به خاطر کمی جا و شباهت شکل‌ها در این مقاله ارائه نشده است). مشاهده می‌شود که نتایج کار از سازگاری خوبی با این مرجع برخوردار است و تفاوت جزئی ضرایب انباشت در به کارگیری ضرایب تبدیل شار به دز، سطح مقطع‌های مورد استفاده و نحوه برخورد با تابش‌ها می‌باشد. البته سطح مقطع‌های به کار رفته در این کار مربوط به سطح

آب-سرب برای بررسی تأثیر برهم‌کنش‌های همدوس در نظر گرفته شده است. در مراجع [۶ و ۷] برای هندسه ذکر شده بدون تأثیر پراکندگی همدوس ضرایب انباشت پرتودهی گاما به روش‌های متفاوت با کار ما محاسبه شده‌اند. در ابتدا برای اطمینان از درستی نتایج حاصل از کد MCNP، ضرایب انباشت را در شرایط و انرژی‌های مراجع موجود محاسبه کردیم. در مرحله دوم تأثیر پراکندگی همدوس در حالت‌های ذکر شده را در نظر گرفته و اثر آن را بررسی می‌کنیم و ضرایب انباشت را در انرژی‌های ۰/۱، ۰/۲، ۰/۵، ۱، ۳ و ۶ مگا الکترون ولت و در ضخامت‌های ۱۰ mfp تیغه دو لایه‌ای شامل ۵ mfp آب یا سرب و ۵ mfp سرب یا آب محاسبه می‌کنیم. در این کار به کمک کارت درخواست F2 (آشکارساز سطحی) شار کل روی سطح مورد نظر و شار فوتون‌های بدون برخورد را به دست آورده و پس از تبدیلات شار به دز و محاسبات بعدی ضرایب انباشت پرتودهی را در هندسه ذکر شده و حالت‌های مختلف محاسبه کردیم. همچنین برای کاهش خطای آماری و محاسباتی

جدول ۱. تأثیر پراکندگی همدوس بر ضریب انباشت پرتوگیری تیغه دو لایه سرب-آب با استفاده از کد محاسباتی MCNP.

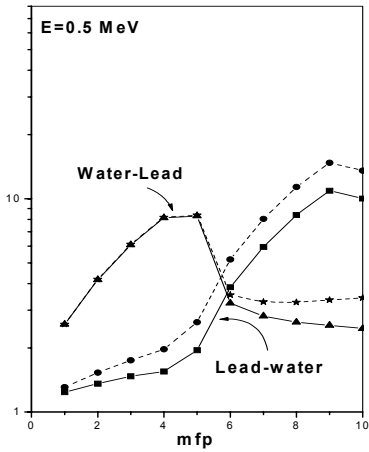
μR (mfp)	E=۰/۱ MeV		E=۰/۲ MeV		E=۰/۵ MeV		E=۱ MeV		E=۳ MeV		E=۶ MeV	
	بدون همدوس	همدوس	بدون همدوس	همدوس	بدون همدوس	همدوس	بدون همدوس	همدوس	بدون همدوس	همدوس	بدون همدوس	همدوس
۱	۲/۴۴	۲/۵۰	۱/۲۰	۱/۲۶	۱/۲۴	۱/۳۱	۱/۳۷	۱/۴۱	۱/۴۰	۱/۴۰	۱/۲۷	۱/۲۷
۲	۳/۱۳	۳/۲۷	۱/۲۲	۱/۳۷	۱/۳۶	۱/۵۳	۱/۶۵	۱/۷۵	۱/۷۳	۱/۷۵	۱/۴۹	۱/۴۹
۳	۴	۴/۲۶	۱/۲۴	۱/۴۶	۱/۴۷	۱/۷۵	۱/۸۸	۲/۰۷	۲/۰۷	۲/۱۱	۱/۷۳	۱/۷۳
۴	۵/۴۰	۵/۸۲	۱/۲۶	۱/۵۶	۱/۵۵	۱/۹۷	۲/۱۰	۲/۳۹	۲/۴۲	۲/۴۸	۱/۹۹	۱/۹۹
۵	۱۰/۰۷	۱۰/۷۸	۱/۷۷	۲/۳۱	۱/۹۵	۲/۶۴	۲/۵۵	۳/۰۱	۲/۸۷	۲/۹۶	۲/۲۹	۲/۲۹
۶	۱۸/۳۶	۱۹/۷۴	۳/۸۲	۴/۹۹	۳/۸۵	۵/۲۰	۴/۳۱	۵/۰۹	۳/۷۹	۳/۹۱	۲/۶۷	۲/۶۷
۷	۲۷/۹۰	۳۰/۶۲	۶/۴۲	۸/۴۲	۵/۹۵	۸/۰۵	۵/۹۸	۷/۱۰	۴/۴۲	۴/۵۸	۲/۹۶	۲/۹۶
۸	۳۹/۰۷	۴۳/۳۶	۹/۷۳	۱۲/۷۹	۸/۳۹	۱۱/۳۶	۷/۶۸	۹/۱۳	۴/۹۸	۵/۱۸	۳/۲۴	۳/۲۴
۹	۴۸/۷۳	۵۶/۱۱	۱۳/۳۴	۱۷/۶۱	۱۰/۹۲	۱۴/۷۴	۹/۳۲	۱۱/۱۰	۵/۴۹	۵/۷۲	۳/۵۱	۳/۵۱
۱۰	۳۷/۴۲	۴۳/۷۱	۱۱/۵۲	۱۵/۳۲	۱۰/۰۲	۱۳/۵۷	۸/۷۶	۱۰/۴۷	۵/۴۱	۵/۶۲	۳/۵۶	۳/۵۶

جدول ۲. تأثیر پراکندگی همدوس بر ضریب انباشت پرتوگیری تیغه دو لایه آب-سرب با استفاده از کد محاسباتی MCNP.

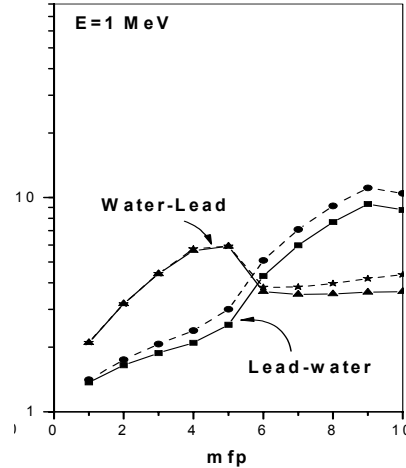
μR (mfp)	E=۰/۱ MeV		E=۰/۲ MeV		E=۰/۵ MeV		E=۱ MeV		E=۳ MeV		E=۶ MeV	
	بدون همدوس	همدوس	بدون همدوس	همدوس	بدون همدوس	همدوس	بدون همدوس	همدوس	بدون همدوس	همدوس	بدون همدوس	همدوس
۱	۴/۴۹	۴/۵۳	۳/۳۴	۳/۳۶	۲/۵۸	۲/۵۸	۲/۱	۲/۱۱	۱/۷۰	۱/۷۰	۱/۵۱	۱/۵۱
۲	۸	۸/۲۴	۵/۷۷	۷/۱۸	۴/۱۷	۴/۱۹	۳/۱۹	۳/۱۹	۲/۳۳	۲/۳۳	۱/۹۴	۱/۹۴
۳	۱۲/۵۳	۱۳/۱۶	۸/۹۴	۹/۱۲	۶/۰۸	۶/۱۱	۴/۴	۴/۴۱	۲/۹۵	۲/۹۶	۲/۳۴	۲/۳۴
۴	۱۷/۵۵	۱۸/۸۰	۱۲/۴۴	۱۲/۸۵	۸/۱۳	۸/۱۹	۵/۶۶	۵/۷۶	۳/۵۶	۳/۵۶	۲/۷۱	۲/۷۱
۵	۱۸/۵۴	۲۰/۴۳	۱۲/۸۴	۱۳/۳۷	۸/۳۰	۸/۳۸	۵/۹۱	۵/۹۳	۳/۸۷	۳/۸۸	۲/۹۷	۲/۹۷
۶	۱۳/۶۷	۱۵/۶۷	۳/۴۶	۳/۹۲	۳/۲۴	۳/۵۴	۳/۶۴	۳/۸۱	۳/۷۷	۳/۸۰	۳/۲۴	۳/۲۴
۷	۱۵/۱۴	۱۷/۵۶	۲/۵۸	۳/۰۸	۲/۸۲	۳/۲۸	۳/۵۳	۳/۸۲	۴/۱۰	۴/۱۶	۳/۶۱	۳/۶۱
۸	۱۹/۱۷	۲۲/۳۶	۲/۲۲	۲/۸۰	۲/۶۴	۳/۲۷	۳/۵۵	۳/۹۷	۴/۴۴	۴/۵۳	۳/۹۷	۳/۹۷
۹	۲۶/۴۳	۳۰/۷۱	۲/۰۳	۲/۶۸	۲/۵۵	۳/۳۵	۳/۶۱	۴/۱۸	۴/۷۷	۴/۸۹	۴/۳۴	۴/۳۴
۱۰	۳۵/۸۲	۴۱/۰۸	۱/۷۹	۲/۴۸	۲/۴۶	۳/۴۳	۳/۶۴	۴/۳۶	۴/۹۶	۵/۱۴	۴/۵۸	۴/۵۸

مقطع‌های ۲،۴ MCNPX است، که طبق آخرین جداول جهانی سطح مقطع می‌باشند و از دقت بالایی برخوردارند. پس از مقایسه با مراجع، به تأثیر پراکندگی همدوس فوتون‌ها(پراکندگی بدون تغییر طول موج) بر ضرایب انباشت پرتودهی در تیغه‌های دو لایه آب و سرب می‌پردازیم. نتایج ناشی از تأثیرات پراکندگی همدوس بر ضرایب انباشت پرتودهی در جداول ۱ و ۲ و نیز شکل ۲ ارائه شده‌اند.

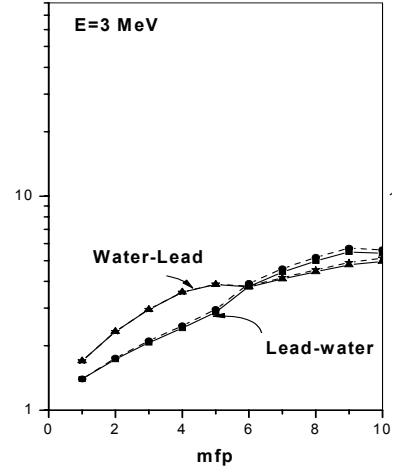
همان گونه که در جداول ۱ و ۲ و شکل ۲ دیده می‌شود، در حفاظ آب-سرب به دلیل پراکندگی بیشتر فوتون‌ها در آب، ضرایب انباشت در تیغه آب افزایش می‌یابد. با وارد شدن فوتون‌های پراکنده کم انرژی به لایه سرب، ضرایب انباشت کاهش می‌یابد زیرا سطح مقطع جذب فوتوالکتریک برای این فوتون‌ها در سرب زیاد است. در حفاظ سرب-آب به دلیل عدد



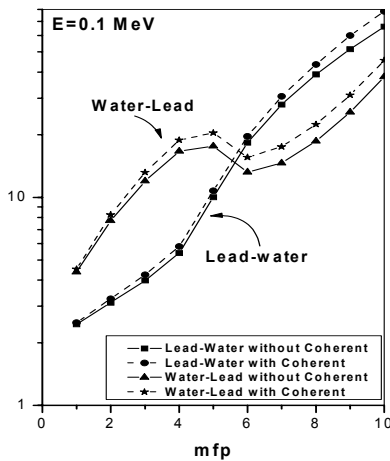
ج) انرژی ۰/۵ MeV



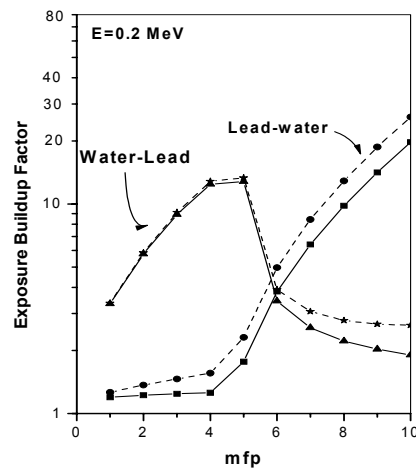
ب) انرژی ۱ MeV



الف) انرژی ۳ MeV



ه) انرژی ۰/۱ MeV



د) انرژی ۰/۲ MeV

شکل ۲. نمودارهای الف، ب، ج، د، ه، شامل مقادیر ضرایب انباشت پرتو دهی برای تابش های گاما، محاسبه شده توسط کد محاسباتی MCNP برحسب پویش آزاد میانگین در انرژی مربوطه است. تاثیر پراکندگی هم دوس بر ضرایب انباشت پرتوگیری گاما در تیغه های دو لایه آب و سرب که شامل هندسه ای به صورت ۵mfp محیط اول و ۵mfp محیط دوم (خطوط پررنگ ضرایب انباشت پرتو دهی بدون در نظر گرفتن پراکندگی های هم دوس می باشد. خطوط نقطه چین ضرایب انباشت با در نظر گرفتن سهم پراکندگی های هم دوس می باشد).

اضافه شدن سهم پراکندگی هم دوس و از طرفی کاهش پرتوهای بدون برخورد در اثر افزایش ضریب تضعیف می باشد. به این ترتیب کسر ضریب انباشت با افزایش صورت و کاهش مخرج کسر نسبت به ضریب انباشت پرتو دهی بدون تأثیر پراکندگی هم دوس افزایش می یابد.

- در انرژی ۶ MeV و بالاتر پراکندگی هم دوس بر ضرایب انباشت، تقریباً بی تأثیر است.
- افزایش ضریب انباشت در انرژی ۳ MeV و فاصله ۱۰mfp

اتمی (Z) بالای سرب، اغلب فوتون های کم انرژی در این لایه جذب می شوند و فوتون هایی که به لایه آب می رسند احتمال بیشتری برای پراکندگی کامپتون دارند، در نتیجه در تیغه آب نیز ضرایب انباشت همچنان افزایش می یابد.

همچنین شکل و جدول های فوق الذکر نشان می دهند که پراکندگی هم دوس باعث افزایش ضرایب انباشت می شود. این تأثیر در انرژی های زیر ۱ MeV بیشتر و در انرژی های بالاتر کم است. علت افزایش ضرایب انباشت، افزایش پراکندگی ها در اثر

انرژی‌های ۰/۱ MeV و ۰/۲ در سرب، تابش‌های فلورسانس نقش پراکندگی همدوس را کم‌رنگ می‌کند و ضرایب به نسبت کمتری افزایش می‌یابند. تابش فلورسانس در انرژی‌های بالاتر از ۸۸ keV خود را نشان می‌دهد، ولی در انرژی‌های بالای ۰/۲ MeV اثر پراکندگی همدوس غالبتر است. در انرژی‌های زیر ۰/۲ MeV در سرب اثر تابش فلورسانس خود را بیشتر نشان می‌دهد.

به علاوه، اثر پراکندگی‌های همدوس روی ضریب انباشت در ترکیب سرب-آب، در همان فواصل اولیه آشکارساز از چشمه خود را به خوبی نشان می‌دهد؛ در حالی که در ترکیب آب-سرب اثر پراکندگی‌های همدوس در تیغه آب کمتر محسوس است و این به دلیل بزرگتر بودن سطح مقطع پراکندگی همدوس در سرب نسبت به آب در انرژی‌های مورد بحث می‌باشد.

با توجه به سازگاری خوب ضرایب انباشت محاسباتی به کمک کد محاسباتی MCNP با مراجع، بدون تأثیر پراکندگی همدوس، نتایج به دست آمده با تأثیر پراکندگی همدوس، دقت بیشتری نسبت به مراجع ذکر شده در مقدمه برای هندسه مورد نظر دارند و می‌توان این ضرایب را در محاسبات حفاظ‌های تیغه‌ای با چشمه صفحه‌ای به کار برد.

برای تیغه دولایه آب-سرب ۳/۶٪ و تیغه دولایه سرب-آب ۳/۹٪ بوده و دیده شد پراکندگی همدوس بر تیغه ۵ mfp آب تقریباً بی‌تأثیر است (شکل ۲-الف).

- افزایش ضریب انباشت انرژی ۱ MeV و فاصله ۱۰ mfp برای تیغه دو لایه آب-سرب ۱۹/۸٪ و تیغه دولایه سرب-آب ۱۹/۵٪ می‌باشد (شکل ۲-ب).

- افزایش ضریب انباشت در انرژی ۰/۵ MeV و مسافت ۱۰ mfp برای تیغه دو لایه آب-سرب (۵ mfp آب و ۵ mfp سرب) ۳۹/۴٪، در تیغه دو لایه سرب-آب (۵ mfp سرب و ۵ mfp آب) ۳۵/۴٪ می‌باشد (شکل ۲-ج).

- افزایش ضریب انباشت در انرژی ۰/۲ MeV و مسافت ۱۰ mfp برای تیغه دو لایه آب-سرب ۳۸/۴٪، تیغه دولایه سرب-آب ۳۱/۹٪ می‌باشد (شکل ۲-د).

- افزایش ضریب انباشت در انرژی ۰/۱ MeV و فاصله ۱۰ mfp برای تیغه دولایه آب-سرب ۲۰/۲٪ و تیغه دولایه سرب-آب ۱۸/۳٪ می‌باشد (شکل ۲-ه).

همان‌طور که دیده می‌شود در اثر پراکندگی همدوس ضریب انباشت در همه انرژی‌ها افزایش می‌یابد و اثر آن در هر دو لایه به‌ویژه در انرژی‌های پایین و مقادیر بزرگتر پویش آزاد میانگین، بیشتر است. به‌عبارت دیگر با کاهش انرژی پرتوهای گاما، اختلاف نسبی ضریب انباشت افزایش می‌یابد، ولی در

penetration of gamma rays", Nuclear Development Associates, NYO-3057 (1954).

11. M H Alamatsaz, and A Shirani, *Journal of Sciences, Islamic Republic of Iran*, **13** (3) (2002) 271.

۱۲. احمد شیرانی، محمدحسن علامت‌ساز، مجله پژوهش فیزیک ایران، ۳، ۱، زمستان (۱۳۸۰).

13. K Trontl, T Šmuc, and D Pevec, *Annals of Nuclear Energy*, **34** (12), December (2007) 939.

14. K Shin, and H Hirayama, *Radiation Physics and Chemistry*, **61** (3-6) June (2001) 583.

۱۵. ع. عابدی کوپایی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه قم، (۱۳۸۶).

16. S Tanaka, and K Takeuchi, *Nucl. Sci. Eng.* **93** (1986) 376.

1. H Cember, "Introduction to health Physics", Pergamon press (1988) 299.

2. U Harima. *Radiat. Phys. Chem.* **41** (4/5) (1993) 631.

۳. مجتبی مکاری بهبهان، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی اصفهان. (۱۳۸۷).

4. A B Chilton, J K Shultis, and R Faw, "Principle of radiation shielding". Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey (1984).

5. M F Tsiakalos, S Stathakis, G Plataniotis, C Kappas, and K Theodorou, *Radiother. Oncol.* **79** (2006) 131.

6. Sh H Jiang, *Nucl. Sci. Eng.*, **75** (1980) 16.

7. Y Harima, *Nucl. Sci. Eng.*, **113** (1993) 367.

8. H Hirayama, and A Shimizu, *J. Nuclear Sci. Technol.* **32**, 12 (1995) 1201.

9. K Takeuchi, *Japan Atomic Energy Research Institute*, **87** (1984) 478.

10. H Goldstein, J E Wilkings, "Calculations of the