

بررسی اثر زاویه تابش بر ضرایب انباشت نوترون در حفاظ‌های تیغه‌ای

محسن شایسته، محسن حسین نژاد سلیمی*، رضا آذرخیلی

دانشگاه جامع امام حسین(ع)، دانشکده علوم پایه، گروه فیزیک، تهران

چکیده:

در این تحقیق اثر خالص زاویه‌ای بر روی ضریب انباشت نوترون برخوردی با حفاظ تیغه‌ای تا ضخامت 10 mfp مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. حفاظ‌ها از جنس مواد مورد استفاده در حفاظ سازی نوترون از قبیل آلومینیوم، پلی اتیلن هستند که باریکه‌ی نوترون‌های تک انرژی با زاویه‌ی بین صفر تا 15° درجه به سطح آن‌ها برخورد می‌کند. محاسبات توسط کد کامپیوتری ANBMC که بر اساس روش مونت کارلو نوشته شده است، انجام شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهند که ضرایب انباشت حفاظ‌های با ضخامت کمتر از 5 mfp با کاهش زاویه‌ی برخورد افزایش می‌یابند، در حالی که در ضخامت بالای 5 mfp این روند برعکس است.

Monte Carlo Method, Angular Buildup factor, Dose equivalent

کلمات کلیدی:

مقدمه

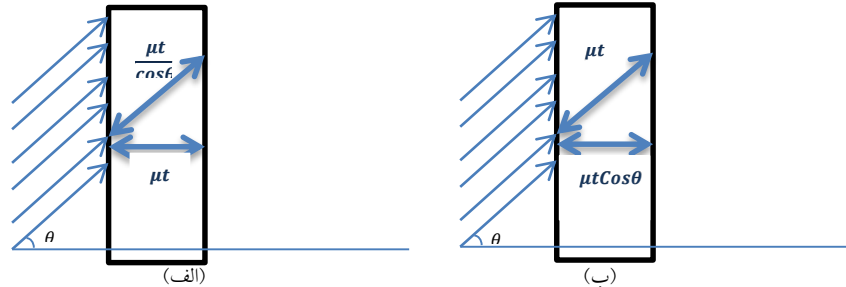
ضرایب انباشت یکی از مهم‌ترین فاکتورها در طراحی و ساخت حفاظ تابش رادیواکتیو برای چشمه‌های پرتوزا و رآکتورهای هسته‌ای و همچنین شتاب دهنده‌های ذرات می‌باشند و در محاسبات دز جذبی تابش‌های پرتوزا در بافت‌های مختلف بدن کاربردهای گسترده‌ای دارند. این ضرایب به عواملی چون ضخامت حفاظ، چگالی ماده حفاظ، انرژی نوترون‌های خروجی از چشمه، نوع پاسخ آشکارساز، نوع محیط بر حسب عدد اتمی Z ، وضعیت هندسی محیط تضعیف و منبع و موقعیت آشکارساز بستگی دارد [۱]. طبق تعریف ضریب انباشت عبارت است از نسبت شار یا دوز کل عبوری از حفاظ به مؤلفه غیر برخوردی آن کمیت و مقدار این ضریب همیشه بزرگ‌تر از یک است.

$$B = \frac{\Phi_{tot}}{\Phi_u} = 1 + \frac{\Phi_s}{\Phi_u} \geq 1 \quad (1)$$

هنگامی که باریکه‌ی موازی و تک انرژی از ذرات به صورت مایل به حفاظ تیغه‌ای برخورد می‌کند لازم است ملاحظاتی را در محاسبه‌ی ضرایب انباشت لحاظ کرد. این ملاحظات از آنجا ناشی می‌شود که ضریب انباشت برای یک ضخامت مشخص با تغییر زاویه‌ی پرتو فرودی بر سطح حفاظ تغییر می‌کند. برای اندازه‌گیری شار و دز پرتو خروجی از سطح حفاظ لازم است که از ضریب انباشت تعمیم یافته که تابعی از زاویه است، بهره برد. گروهی از محققین مطالعاتی را بر روی رابطه‌ی بین ضریب انباشت و زاویه‌ی پرتو فرودی بر سطح حفاظ انجام دادند [۲ و ۳] در این مطالعات مشاهده شد که با افزایش زاویه‌ی باریکه‌ی فرودی، ضریب انباشت نیز افزایش می‌یابد. در این مطالعات فرض بر این بود که ذرات به تیغه‌ای برخورد می‌کنند که با تغییر زاویه‌ی باریکه‌ی فرودی ضخامت آن ثابت می‌ماند (شکل ۱- الف). در این حالت سهم مربوط به ذرات غیر برخوردی با افزایش زاویه کاهش می‌یابد، چون، ذره مجبور است مسافت بیشتری را برای خروج از سطح حفاظ طی کند و این یعنی شانس کمتر در فرار بدون برخورد ذره. این تضعیف شار به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\Phi = B(E_0, \cos \theta, \Sigma t) e^{-\frac{\Sigma t}{\cos \theta}} \quad (2)$$

در طراحی حفاظ مؤثر در برابر پرتوهای هسته‌ای این اطلاعات بدست آمده اغلب کافی و قابل اعتماد هستند، اما لازم و سودمند است تا وابستگی زاویه‌ای ضریب انباشت به زاویه را هنگامی که ضخامت اپتیکی مسیر مایل نسبت به تغییرات زاویه ثابت بماند (شکل ۱-ب) را نیز مورد بررسی قرار دهیم.



شکل ۱: (الف) هندسه‌ی ضریب انباشت زاویه‌ای برای حالت ضخامت عمودی تیغه ثابت (ب) هندسه‌ی تعریف شده برای مشخص کردن اثر خالص زاویه بر روی ضریب انباشت

حالت دوم را «ضریب انباشت زاویه‌ای محض» می‌نامند. بدین معنی که سهم نوترون غیر برخوردی، در این نوع بررسی با تغییر زاویه‌ی برخورد ثابت باقی می‌ماند.

$$\Phi = B(E_0, \cos \theta, \Sigma t) e^{-\Sigma t} \quad (3)$$

روش کار

شار نوترون‌ها در یک محیط با استفاده از معادله ترابرد و حل این معادله با استفاده از سطح مقطع‌های برهمکنش نوترون با عناصر تشکیل دهنده آن محیط تعیین می‌گردد. معادله ترابرد را می‌توان به روش‌های مختلف حل کرد که از جمله مهم‌ترین این روش‌ها روش مونت کارلو است. در روش مونت کارلو احتیاجی به حل معادلات پیچیده ترابرد نوترون نیست و تنها با دانستن روابط ریاضی حاکم بر انواع برهمکنش‌های ذره با محیط، می‌توان ذرات را در محیط دنبال کرد و سرگذشت آن‌ها را تعیین کرد. در این روش رخدادهای محتمل منفرد متوالیا شبیه‌سازی شده و توزیع احتمال آن‌ها به طور آماری نمونه‌برداری می‌شود و به این ترتیب کل پدیده توصیف می‌گردد.

در روش مونت کارلو، ترابرد ذرات تابش شده از چشمه لحظه به لحظه در طی ۴ مرحله دنبال می‌شود: [۵و۴]

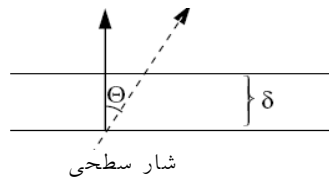
- ۱- نمونه برداری از زاویه و مکان گسیل نوترون از چشمه
- ۲- نمونه برداری از طول مسیر حرکت نوترون در داخل حفاظ تا اولین نقطه برهمکنش.
- ۳- در صورت وقوع برهمکنش، هسته هدف (در حفاظ‌هایی متشکل از ایزوتوپ‌های مختلف) و نوع برهمکنش نوترون با نمونه برداری از سطح مقطع برهمکنش نوترون تعیین می‌شوند. به این معنی که مشخص می‌شود آیا برهمکنش از نوع جذب بوده یا پراکندگی. اگر از نوع جذب بوده باشد تاریخچه ذره در همان مکان جذب پایان می‌یابد و در صورت پراکندگی، زاویه پراکندگی و انرژی نوترون پس از پراکندگی محاسبه می‌شود.
- ۴- محاسبه شار نوترون در داخل حفاظ: یکی از کمیات مهم در میدان‌های تابشی، محاسبه‌ی شار است که با استفاده از آن می‌توان میزان اندرکنش‌های مختلف ذره را محاسبه کرد. شار در واقع مجموع مسیرهای طی شده توسط کلیه نوترون‌ها در داخل حفاظ است. با محاسبه مجموع این مسیرها برای تمام تاریخچه‌ها و تقسیم بر تعداد آن‌ها، شار حجمی در هر سیکل بدست می‌آید:

$$\Phi = \frac{1}{V.H} \times \sum_{h=1}^H \left[\left(\sum_{i=1}^C W L_{h,i} \right) + W R_h \right] \quad (4)$$

در این رابطه V حجم حفاظ، H تعداد تاریخچه‌ها، C تعداد برخوردها، L_{hi} فاصله طی شده بین برخوردهای $i-1$ و i از تاریخچه h ام، R_h طول مسیر بین آخرین برخورد و مرز سیستم، و W تابع وزن ذره است، می‌توان شار سطحی را از حالت حدی شار حجمی با به سمت صفر میل دادن ضخامت حجمی که شار در آن محاسبه می‌شود، بدست آورد. بنابراین با توجه به شکل ۲، شار سطحی از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\lim_{\delta \rightarrow 0} WL_i / V = (W\delta / \cos \theta) / (A\delta) = W / (A|\cos \theta|) \quad (5)$$

که در آن θ زاویه بین بردار عمود بر سطح و مسیر ذره است که در سیستم مختصات مرکز جرم به صورت همسانگرد نمونه برداری می‌شود



بر سطح و مسیر ذره برای محاسبه

شکل ۲: زاویه بین بردار عمود

شار سطحی

در شبیه‌سازی انجام شده از سطوح مقاطع ۱۶ گروهی هندسن جهت نمونه برداری از نوع برهمکنش، نوع ایزوتوپ هدف، تعیین مسافت‌های آزاد میانگین و تعیین شار غیر برخوردی بهره برده شده است. [۶] نتایج

در این تحقیق، اثر خالص زاویه‌ای بر روی ضریب انباشت نوترون برخوردی با حفاظ تیغه‌ای تا ضخامت 10 mfp که باریکه‌ی موازی نوترون‌های تک انرژی با زاویه‌ی بین صفر تا 85° درجه به سطح آن برخورد می‌کرد مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. برای ثابت نگه داشتن ضخامت اپتیکی مسیر مایل، با افزایش زاویه‌ی برخوردی، ضخامت فیزیکی حفاظ کاهش می‌یابد. حفاظ‌های مورد مطالعه از جنس مواد مورد استفاده در حفاظ سازی نوترون از قبیل آلومینیوم، پلی اتیلن هستند. ضخامت حفاظ از 1 mfp تا 10 mfp در نظر گرفته شده است. برای هر مسافت آزاد میانگین محاسبات برای 10° زاویه‌ی برخوردی و انرژی‌های 1 MeV و 5 MeV انجام شده‌اند. این نتایج به ترتیب در جداول ۱ تا ۴ برای آلومینیوم، پلی اتیلن و همچنین در نمودارهای ۳ و ۴ برای درک بهتر این رفتار آورده شده‌اند. خطای استاندارد برای آلومینیوم بین 0.08% (در 1 mfp ، زاویه‌ی صفر) و 0.22% (در 10.85 mfp درجه) و برای پلی اتیلن این خطا بین 0.02% (در 1 mfp ، زاویه‌ی صفر) و 0.09% (در 10 mfp ، زاویه‌ی صفر) و 0.09% (درجه) بدست آمده است.

جدول ۱: ضریب انباشت دز معادل نوترون با انرژی 1 MeV عبوری از حفاظ از جنس آلومینیوم

| زاویه‌ی فرودی $(\cos \theta)$ | | | | | | | | | | ضخامت حفاظ (mfp) |
|-------------------------------|-------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------------------|
| ۱/۰ | ۰/۹ | ۰/۸ | ۰/۷ | ۰/۶ | ۰/۵ | ۰/۴ | ۰/۳ | ۰/۲ | ۰/۱ | ۱/۰ |
| ۲/۴۲ | ۲/۳۱ | ۲/۲ | ۲/۰۱ | ۱/۹۷ | ۱/۸۴ | ۱/۷۱ | ۱/۵۷ | ۱/۴۲ | ۱/۲۴ | ۶/۰ |
| ۴۱/۵۰ | ۵۳/۵۸ | ۵۴/۴۳ | ۵۶/۶۹ | ۵۸/۳۶ | ۵۶/۵۷ | ۵۴/۰۱ | ۴۸/۸۳ | ۴۰/۱۴ | ۲۷/۴ | ۱۰/۰ |
| ۷۶۱/۷۱ | ۷۱/۲۹ | ۶۹۲/۰۶ | ۸۳۷/۰۴ | ۱۳۴۳/۳۳ | ۱۲۳۴/۲۷ | ۱۵۵۱/۰۵ | ۱۵۴۹/۹۹ | ۱۶۹۵/۹۲ | ۱۰۸۷/۳۷ | |

19 th Iranian's Nuclear Conference

جدول ۲: ضریب انباشت دز معادل نوترون با انرژی ۵MeV عبوری از حفاظ از جنس آلومینیوم

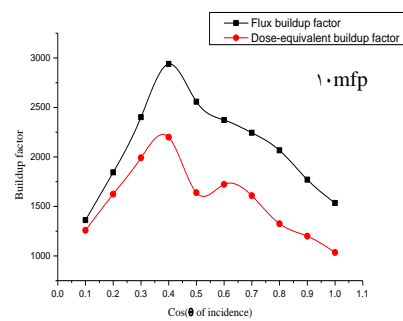
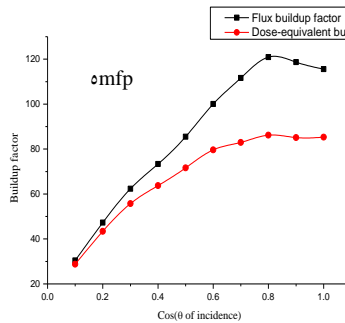
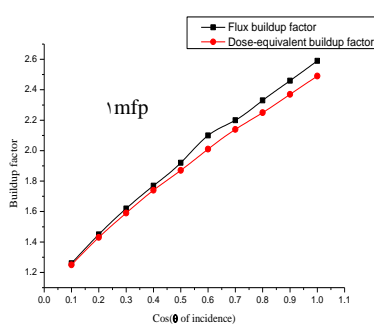
| زاویهی فرودی ($\cos\theta$) | | | | | | | | | | ضخامت حفاظ (mfp) |
|-------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|---------------------|
| ۱/۰ | ۰/۹ | ۰/۸ | ۰/۷ | ۰/۶ | ۰/۵ | ۰/۴ | ۰/۳ | ۰/۲ | ۰/۱ | |
| ۲/۴۹ | ۲/۳۷ | ۲/۲۵ | ۲/۱۴ | ۲/۰۱ | ۱/۸۷ | ۱/۷۴ | ۱/۵۹ | ۱/۴۳ | ۱/۲۵ | ۱/۰ |
| ۸۵/۲۹ | ۸۵/۰۹ | ۸۶/۲ | ۸۲/۹۵ | ۷۹/۶۲ | ۷۱/۶۱ | ۶۳/۷۳ | ۵۵/۷۳ | ۴۳/۴۳ | ۲۸/۷۹ | ۶/۰ |
| ۱۰۳۵/۳۴ | ۱۲۰۰/۰۵ | ۱۳۲۵/۱۳ | ۱۶۰۸/۵۳ | ۱۷۲۲/۹۸ | ۱۶۳۹/۴۵ | ۲۱۹۹/۵۹ | ۱۹۹۱/۱۴ | ۱۶۲۴/۴۸ | ۱۲۵۸/۱ | ۱۰/۰ |

جدول ۳: ضریب انباشت دز معادل نوترون با انرژی ۱MeV عبوری از حفاظ از جنس پلی اتیلن

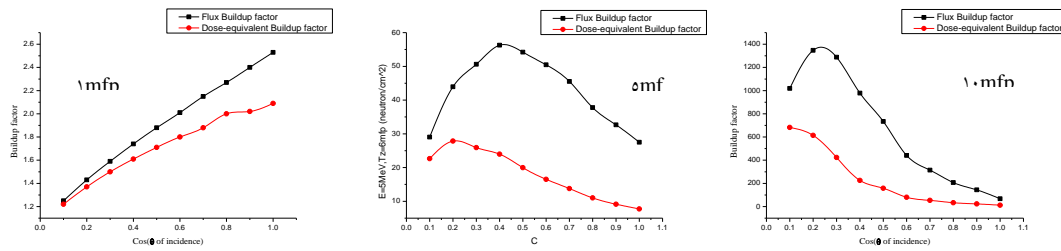
| زاویهی فرودی ($\cos\theta$) | | | | | | | | | | ضخامت حفاظ (mfp) |
|-------------------------------|-------|-------|-------|------|-------|--------|--------|--------|--------|---------------------|
| ۱/۰ | ۰/۹ | ۰/۸ | ۰/۷ | ۰/۶ | ۰/۵ | ۰/۴ | ۰/۳ | ۰/۲ | ۰/۱ | |
| ۱/۷۵ | ۱/۷۲ | ۱/۶۹ | ۱/۶۵ | ۱/۶ | ۱/۵۴ | ۱/۴۷ | ۱/۴ | ۱/۳ | ۱/۱۸ | ۱/۰ |
| ۴/۷ | ۵/۲۶ | ۶/۰۸ | ۷/۱۲ | ۸/۴ | ۱۰/۶۱ | ۱۲/۷۶ | ۱۵/۲۳ | ۱۶/۶۱ | ۱۵/۵۶ | ۶/۰ |
| ۱۴/۱۲ | ۲۰/۵۸ | ۲۸/۸۸ | ۲۶/۷۱ | ۵۰/۲ | ۸۳/۲ | ۱۱۳/۵۴ | ۱۳۶/۶۵ | ۳۷۳/۱۳ | ۶۰۶/۸۸ | ۱۰/۰ |

جدول ۴: ضریب انباشت دز معادل نوترون با انرژی ۵MeV عبوری از حفاظ از جنس پلی اتیلن

| زاویهی فرودی ($\cos\theta$) | | | | | | | | | | ضخامت حفاظ (mfp) |
|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|---------------------|
| ۱/۰ | ۰/۹ | ۰/۸ | ۰/۷ | ۰/۶ | ۰/۵ | ۰/۴ | ۰/۳ | ۰/۲ | ۰/۱ | |
| ۲/۰۹ | ۲/۰۲ | ۲ | ۱/۸۸ | ۱/۸ | ۱/۷۱ | ۱/۶۱ | ۱/۵ | ۱/۳۷ | ۱/۲۲ | ۱/۰ |
| ۷/۷۲ | ۹/۱۴ | ۱۱ | ۱۳/۷۶ | ۱۶/۵۲ | ۱۹/۹۸ | ۲۳/۹۸ | ۲۵/۹۲ | ۲۷/۸۶ | ۲۲/۶۶ | ۶/۰ |
| ۱۱/۸۵ | ۲۲/۶۶ | ۳۳/۶۳ | ۵۳/۸۴ | ۸۰/۷۷ | ۱۵۷/۶۵ | ۲۲۵/۶۷ | ۴۲۳/۱۷ | ۶۱۴/۴۳ | ۶۸۲/۸۶ | ۱۰/۰ |



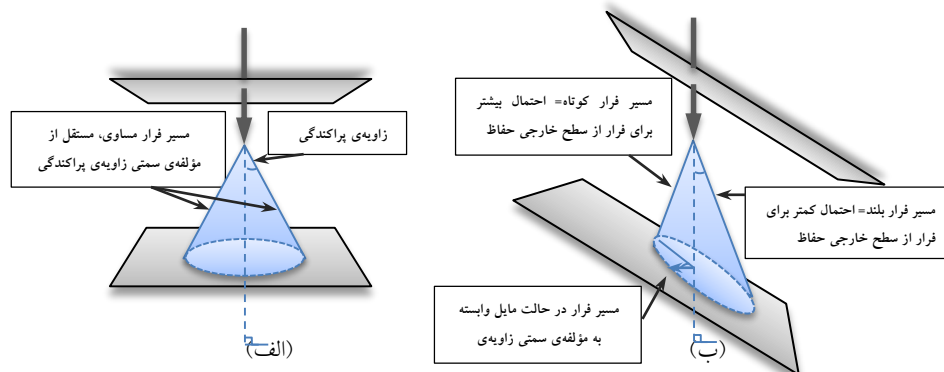
شکل ۳: ضرایب انباشت زاویهای محض برای نوترون‌های با انرژی ۵MeV و حفاظ از جنس آلومینیوم



شکل ۴: ضرایب انباشت زاویه‌ای محض برای نوترون‌های با انرژی ۵MeV و حفاظ از جنس پلی‌اتیلن

بحث و نتیجه‌گیری

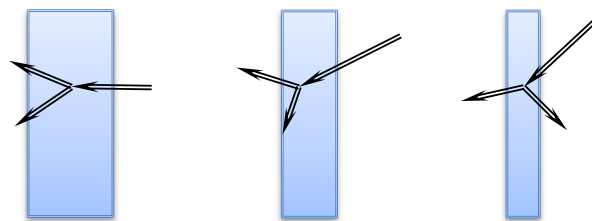
همان‌طور که نمودارها نشان می‌دهند، ضرایب انباشت حفاظ‌های با ضخامت کمتر از ۵mf با کاهش زاویه‌ی برخوردی افزایش می‌یابند، در حالی که در ضخامت بالای ۵mf این روند برعکس است. برای یافتن دلیل این رفتار در شکل ۵، یک نمای داخلی از تیغه‌ی نازک برای نوترون برخوردی مایل و عمودی ارائه شده است. در شکل (الف) یک نوترون در داخل حفاظ دچار برهم‌کنش شده و تحت یک زاویه‌ی مشخص پراکنده می‌شود. از آنجا که نوترون به صورت عمود با تیغه برخورد انجام داده است، بنابراین مؤلفه‌ی سمتی زاویه‌ی پراکنده‌گی هیچ نقشی در تعیین طول مسیر باقیمانده که نوترون برای خروج از تیغه باید طی کند، ندارد. این دلالت بر این نتیجه دارد که نوترون پراکنده شده تحت زاویه‌ی سمتی مختلف با احتمال یکسان از حفاظ خارج می‌شود.



شکل ۵: نمای داخلی از (الف) یک برخورد عمودی و (ب) یک برخورد مایل بر روی یک حفاظ ضخیم

اما این واقعیت برای نوترون‌هایی که به صورت مایل وارد تیغه می‌شوند صادق نیست (شکل ۵-ب). در این حالت، مؤلفه‌ی سمتی زاویه‌ی پراکنده‌گی اثر مؤثری بر روی احتمال خروج نوترون از تیغه دارد. به عنوان مثال، اگر یک نوترون تحت زاویه‌ای پراکنده شود به طوری که طول مسیر فرار «کوتاه» را طی کند، b_{short} ، احتمال آنکه بدون برهم‌کنش دیگری تیغه را ترک کند برابر با $e^{-b_{short}}$ است. این احتمال برای حالتی که ذره تحت زاویه‌ای پراکنده شود که مجبور به طی طول مسیر فرار «بلند» باشد برابر با $e^{-b_{long}}$ است. بنابراین از لحاظ کمی $e^{-b_{short}} > e^{-b_{long}}$ است. بدین معنی که ذرات پراکنده شده در طول مسیر «کوتاه» شانس بیشتری برای فرار از تیغه دارند. از لحاظ کمی مشاهده می‌کنیم که مقدار اختلاف اندازه بین طول فرار کوتاه و بلند به شدت به عمقی از تیغه که برهم‌کنش در آن نقطه رخ می‌دهد و نیز زاویه‌ی پراکنده‌گی بستگی دارد. در این حالت مؤلفه‌ی سمتی اثر قابل توجهی بر اینکه آیا نوترون پراکنده شده از تیغه خارج می‌شود یا نه با توجه به طول مسیر فرار دارد. طول مسیر فرار وابسته به ضخامت تیغه و زاویه‌ی پراکنده‌گی است. ذراتی که طول فرار کوتاه‌تری را طی می‌کنند شانس بیشتری را برای خروج از تیغه با زاویه‌ی کمتر در مقایسه با آن دسته از ذرات که در

راستای طول مسیر فرار بلندتر خارج می‌شوند، دارند. در نتیجه سهم کمتری در شار خروجی کل ایفا می‌کنند. در حالتی که ضخامت حفاظ 1mfp باشد، ضریب انباشت با کاهش زاویه‌ی نوترون فرودی بر سطح حفاظ، افزایش خواهد یافت. این بدین خاطر است که نوترون‌های با زاویه‌ی برخورد بزرگ‌تر، همان‌طور که در شکل ۶، نشان داده شده است، تیغه را با طول مسیر فرار کوتاه‌تر و زاویه‌ی فرار کوچک‌تر ترک خواهند کرد. در نتیجه شار خروجی کل با کاهش زاویه‌ی باریکه نوترون فرودی افزایش یافته که منجر به افزایش مقدار ضریب انباشت زاویه‌ای می‌شود. در برخی از زوایای مایل، b_{long} ممکن است حتی در راستای بازتاب باشد، بنابراین منجر به افزایش شار بازتابی از سطح ورودی تیغه می‌شود. برای تیغه‌های ضخیم که تعداد برهم‌کنش‌ها در آن‌ها بیشتر است، این رفتار برعکس است. با افزایش زاویه‌ی نوترون فرودی، ضخامت عمودی و طول مسیر فرار اپتیکی کوتاه، کاهش می‌یابد و اجازه می‌دهد تا ذرات طول مسیر فرار کوتاه‌تری داشته باشند. این حالت برای نوترون‌هایی که به صورت عمود بر سطح حفاظ فرود می‌آیند نمود بیشتری دارد و منجر به این می‌شود که نوترون‌ها شانس بیشتری را در فرار با برهم‌کنش‌های کمتر از حفاظ داشته باشند.



(الف)

(ب)

(ج)

تفاوت‌های طول فرار در حالت (الف) عمودی، (ب) شیب کم و (ج) شیب زیاد زاویه‌ی برخورد با سطح حفاظ

تشکر و قدردانی:

در پایان این مقاله از زحمات بی‌دریغ اساتید پژوهشگر فیزیک دانشگاه امام حسین (ع) و همچنین استاد راهنمای گرامی و ارجمند، جناب آقای دکتر محسن شایسته تشکر و قدردانی می‌نمایم و موفقیت‌های روز افزون را برای ایشان از خداوند خواستارم.

مراجع:

- [۱] A.B. Chilton, J.K. Shultis and R.E. Faw, "Principles of radiation shielding", Prentice-Hall, ۳۳۷, (۱۹۸۴).
- [۲] Wooten H.O., "Time Dependent Neutron and Photon Dose-Field Analysis", LA-۱۴۲۴۵-T, Los Alamos National Laboratory, ۲۰۰۵.
- [۳] Kornreich, D., Dooley, D., "A Two-Dimensional Point-Kernel Model for Dose Calculations in a Glovebox Array," *Trans. Am. Nucl. Soc.*, ۸۱ (۱۹۹۹) ۲۴۹-۲۵۶.
- [۴] M. Shayesteh, M. Shahriari, "Calculation of time-dependent neutronic parameters using Monte Carlo method", *Annals of Nuclear Energy* ۳۶(۲۰۰۹) ۹۰۱-۹۰۹
- [۵] Briesmeister J.F. (Ed.) "MCNP-A General Monte-Carlo NParticle Transport Code-Version ۴C". LA-۱۳۷۰۹-M (April ۲۰۰۰).
- [۶] G. E. Hansen & W. H. Roach, "Six And Sixteen Group Cross Sections for Fast And Intermediate Critical Assemblies", LAMS-۲۵۴۳, Los Alamos Scientific Laboratory, ۱۹۶۱.