

## شبیه‌سازی حفاظی چندلایه برای یک چشمه استوانه‌ای $^{241}\text{Am-Be}$ به منظور کاهش هر چه بیشتر دز معادل نوترون با استفاده از کد MCNP5

مهدی نصری نصرآبادی\* و صدیقه سجادی‌فر

گروه مهندسی هسته‌ای، دانشکده علوم و فناوری‌های نوین، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران.

\*اصفهان، دانشگاه اصفهان، دانشکده علوم و فناوری‌های نوین، گروه مهندسی هسته‌ای، کد پستی: ۸۱۷۴۶-۷۳۴۴۱

پست الکترونیکی: mnnasrabadi@ast.ui.ac.ir

### چکیده

در این تحقیق، برای شبیه‌سازی حفاظ‌های نوترونی از کد محاسباتی MCNP5 استفاده شده و سه نوع چیدمان حفاظ تفکیک شده چندلایه و همگن که توسط چشمه نوترونی  $^{241}\text{Am-Be}$  مورد تابش قرار گرفتند، بررسی گردید. در این حفاظ‌ها، از پلی اتیلن ( $\text{C}_2\text{H}_4$ ) و پلی استایرن ( $\text{C}_8\text{H}_8$ ) به عنوان مواد کندکننده، از کریید بور ( $\text{B}_4\text{C}$ ) به عنوان ماده جاذب نوترون‌های حرارتی و از فولاد ضد زنگ (Stainless Steel) به عنوان جاذب پرتوهای گاما استفاده شد. هدف نهایی این تحقیق، در نظر گرفتن بهترین نوع چیدمان برای چشمه مورد نظر جهت دستیابی به کمترین مقدار شار و دز تولید شده در بیرون حفاظ به منظور اطمینان از سطح مجاز آن‌هاست. به منظور راستی‌آزمایی شبیه‌سازی، نتایج محاسبات با یک کار تجربی مقایسه شد.

کلیدواژه‌گان: حفاظ‌سازی، چشمه  $^{241}\text{Am-Be}$ ، کد MCNP5، دز معادل نوترون.

### ۱. مقدمه

مؤثر در مقابل ذرات، نیازمند انتخاب مواد و پیکربندی مناسب و در نظر گرفتن ضخامت لازم برای آن‌هاست [۲]. این امر ارتباط تنگاتنگی با بهینه‌سازی حفاظ از نظر وزن، حجم، بهای تمام‌شده، در دسترس بودن و ملاحظات ایمنی دارد. این ملاحظات به طور مطمئن بر انتخاب مواد و در نتیجه، بر طراحی نهایی حفاظ تأثیر خواهد گذاشت. با وجود این، معمولاً نمی‌توان حفاظی طراحی کرد که تمام موارد را در حد اعلا ارضا نموده و از همه نظر بهینه باشد. معمولاً برای مقاصد عملی یکی از موارد به عنوان هدف اصلی در نظر گرفته شده و سایر اهداف در کنار آن، به سمت بهینه‌شدن تنظیم می‌شوند.

در حالت کلی، حفاظت در برابر نوترون‌ها مشکل‌تر از حفاظت در برابر ذرات باردار و گاما است. بهترین حفاظ برای نوترون‌ها موادی با وزن اتمی کم و برای پرتوهای گاما موادی با وزن اتمی زیاد است. هنگام عبور باریکه نوترون‌ها از حجم زیاد ماده، شدت باریکه در اثر واکنش‌های هسته‌ای کاهش می‌یابد و

امروزه در جهان و از جمله در کشور ما، استفاده از تکنولوژی هسته‌ای در زمینه‌های گوناگون نیروگاهی، صنعتی، کشاورزی و پزشکی رو به گسترش است. یکی از مهم‌ترین مسائل در فناوری هسته‌ای، حفاظت در برابر تابش‌های هسته‌ای است تا از آثار زیان‌بار زیست‌محیطی، بیماری‌زا و همچنین آثار مخربی که آن‌ها روی برخی از ابزارهای اندازه‌گیری دقیق دارند، جلوگیری شود. از دیدگاه حفاظ‌سازی، همه تابش‌ها و ذرات از اهمیت یکسانی برخوردار نیستند، زیرا میزان نفوذ و تأثیرگذاری آن‌ها در مواد مختلف از جمله بافت زنده برابر نیست. در بحث حفاظ‌سازی، تابش‌های نوترون و گاما از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند، زیرا به دلیل بدون بار بودن می‌توانند ضخامت‌های نسبتاً زیادی از حفاظ را پشت سر گذاشته و در بالا بردن آهنگ دز در بیرون حفاظ مشارکت داشته باشند [۱]. طراحی یک حفاظ مناسب و

بخشی از نوترون‌ها از باریکه حذف می‌شوند. برای نوترون‌های تند، واکنش‌های زیادی نظیر  $(n,2n)$  و  $(n,p)$  امکان پذیر است، ولی علت اصلی ناپدید شدن نوترون‌های کند یا گرمایی، گیراندازی نوترونی است که طبق واکنش  $(n,\gamma)$  انجام می‌پذیرد [۱] و [۳]. فرایند کندسازی نوترون‌های سریع در اثر پراکندگی کشسان نوترون با هسته‌های سبک انجام می‌پذیرد. هیدروژن بهترین کندکننده نوترون در انرژی‌های زیر  $10\text{ MeV}$  است. بورون نیز به دلیل داشتن سطح مقطع بالای جذب نوترون‌های حرارتی  $(3837\text{ b})$ ، در حفاظسازی نوترونی کاربردهای زیادی دارد [۱].

چشمه رادیو ایزوتوپی  $^{241}\text{Am-Be}$  یکی از مهم‌ترین چشمه‌های نوترونی است که کاربردهای فراوانی در پزشکی، صنعت و تحقیقات علمی دارد. این چشمه دارای نیم عمر بالایی در حدود  $432/7$  سال است. علاوه بر نوترون، چشمه  $^{241}\text{Am-Be}$  پرتو گاما نیز تولید می‌کند. گاماها این چشمه در دو گروه دسته‌بندی می‌شوند: گروه اول آن‌هایی هستند که به طور مستقیم از چشمه تابش می‌شوند و گروه دوم آن‌هایی هستند که در برهم‌کنش  $(n,\gamma)$  در اثر گیراندازی نوترون‌های حرارتی توسط مواد جاذب ایجاد می‌شوند. بیشتر این گاماها در ناحیه پراکندگی کامپتون قرار دارند. بنابراین، در طراحی حفاظ باید از موادی استفاده شود که سطح مقطع پراکندگی غیرکشسان بالایی داشته باشند تا بتوانند انرژی پرتوهای گاما را تا حد امکان کاهش دهند. پرتوهای گاما معمولاً دارای انرژی‌هایی در گستره  $0/1\text{ MeV}$  تا  $10\text{ MeV}$  هستند. موادی مثل سرب، بیسموت، آهن و ترکیبات آن مانند استیل برای حفاظسازی گاما به کار می‌روند [۴].

## ۲. محاسبات و شبیه‌سازی

در این تحقیق، از کد  $\text{MCNP5}$  برای شبیه‌سازی استفاده شد. هندسه حفاظ‌های استفاده‌شده به صورت لایه‌های استوانه‌ای هم‌مرکز است که چشمه استوانه‌ای  $^{241}\text{Am-Be}$  را احاطه کرده‌اند. حفاظ تفکیک‌شده به ترتیب شامل سه لایه متوالی از پلیمر، کربید بور و استیل است. ضخامت استیل در حفاظ‌های پلی اتیلنی و پلی استایرنی به ترتیب  $30\text{ cm}$  و  $25\text{ cm}$  می‌باشد. حفاظ همگن نیز ترکیبی از دو ماده پلیمر و کربید بور است. در حفاظ چندلایه‌ای استفاده‌شده، هر کیک شامل یک لایه پلیمر و

$$F2 = \iiint (r, E, t) dEdt \frac{dA}{A}$$

کربید بور می‌باشد. اصطلاح کیک، به لایه‌های تکرارشونده از دو یا چند ماده مختلف اطلاق می‌شود. در حفاظ چندلایه پلی اتیلنی، چهار کیک و در حفاظ پلی استایرنی، سه کیک در نظر گرفته شد. گفتنی است که درخصوص هر پلیمر به طور جداگانه، ضخامت نهایی حفاظ چندلایه و همگن یکسان است. علاوه بر این، ضخامت حفاظ‌ها و تعداد لایه‌ها به گونه‌ای محاسبه شده‌اند که میزان دز مجاز را برآورده سازند. در این شبیه‌سازی، از تالی  $F2$  که همان نقش آشکارساز صفحه‌ای را دارد و شار خروجی از سطح را طبق رابطه زیر به دست می‌دهد، استفاده شد.

## ۳. بحث و نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از شبیه‌سازی در این کار به دو بخش تقسیم می‌شود: بخش اول محاسبات مربوط به شار نوترون و بخش دوم محاسبات دزیمتری برای این سه نوع چیدمان. نتایج شبیه‌سازی شار نوترون در شکل‌های (۱) و (۲) آمده است که سه نوع آرایش حفاظ و پلیمرهای به کاررفته در آن‌ها با یکدیگر مقایسه شده‌اند. براساس این شکل‌ها حفاظ چندلایه بیشترین تضعیف شار نوترون را دارد و حفاظ‌های همگن و تفکیک‌شده به ترتیب در رده‌های بعدی قرار دارند. به عبارت دیگر، در مورد چشمه  $^{241}\text{Am-Be}$  حفاظ چندلایه عملکرد بهتری نسبت به دو نوع دیگر حفاظ از خود نشان داده است. ساختار حفاظ چندلایه به این صورت است که چندین مجموعه از حفاظ تفکیک‌شده به طور متوالی قرار می‌گیرند. در این نوع حفاظ‌ها، نوترون‌ها در

به پلی استایرن داشته است. نتایج شبیه‌سازی دز در جدول‌های (۱) تا (۴) آمده است. ضخامت‌های ذکر شده برای هر چیدمان براساس حداقل ضخامت ممکن و در نتیجه کمترین وزن حفاظ، به‌منظور کنترل دز در حد مجاز محاسبه شده‌اند.

جدول ۱: آهنگ دز معادل نوترون و گاما در لایه‌های حفاظ چندلایه‌ای، پلیمر پلی اتیلن

ضخامت (cm)	دز معادل نوترون ( $\mu\text{Svh}^{-1}$ )	دز کل گاما ( $\mu\text{Svh}^{-1}$ )	کیک
۴/۵	۶۸/۵۵۴	۲/۶۵۹۲۲۶	اول
۹	۳۸/۹۵۹۷	۲/۷۱۲۳۹۹	دوم
۱۴/۵	۱۷/۹۸۷۳	۲/۵۹۴۲۳۱	سوم
۲۰	۸/۱۴۷	۲/۳۳۷۸۷۶	چهارم

جدول ۲: آهنگ دز معادل نوترون و گاما در لایه‌های حفاظ چندلایه‌ای، پلیمر پلی استایرن

ضخامت (cm)	دز معادل نوترون ( $\mu\text{Svh}^{-1}$ )	دز کل گاما ( $\mu\text{Svh}^{-1}$ )	کیک
۷/۵	۶۲/۰۶۷۸	۲/۵۷۱۲۴۷	اول
۱۵	۲۹/۳۶۴۱	۲/۴۵۲۹۲۸	دوم
۲۳/۵	۱۱/۵۵۸۷	۲/۰۹۷۶۵۰	سوم

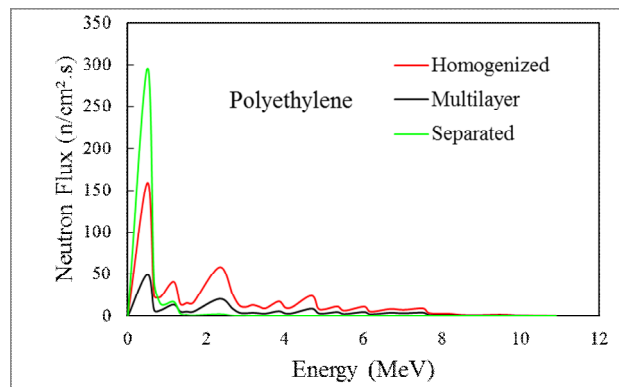
جدول ۳: آهنگ دز معادل نوترون و گاما در حفاظ همگن، برای دو نوع پلیمر

ضخامت (cm)	دز معادل نوترون ( $\mu\text{Svh}^{-1}$ )	دز کل گاما ( $\mu\text{Svh}^{-1}$ )	پلی اتیلن
۲۰	۲۲/۶۴۵۹	۲/۱۴۶۷۰۷	پلی اتیلن
۲۳/۵	۱۴/۸۴۵	۱/۹۲۲۷۴۶	پلی استایرن

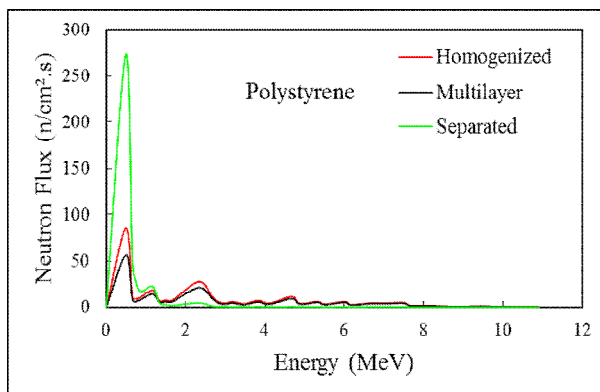
جدول ۴: آهنگ دز معادل نوترون و گاما در حفاظ تفکیک‌شده، برای دو نوع پلیمر

ضخامت (cm)	دز معادل نوترون ( $\mu\text{Svh}^{-1}$ )	دز کل گاما ( $\mu\text{Svh}^{-1}$ )	پلی اتیلن
۳۴/۵	۱۸/۱۶۰۷	۰/۰۴۵۶۴۶۰۸	پلی اتیلن
۳۲/۵	۱۸/۵۳۷۹	۰/۰۴۹۳۵۸۵۳	پلی استایرن

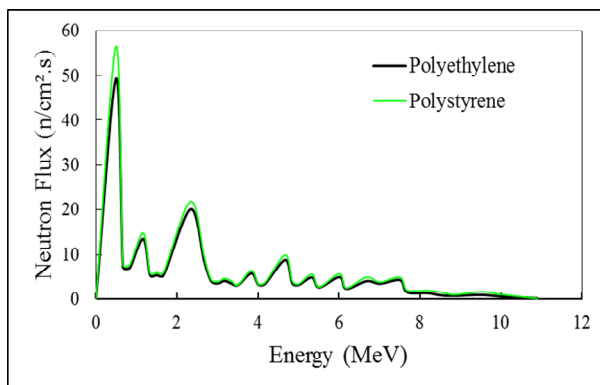
عبور از هر مجموعه در اثر پراکندگی کشسان توسط ماده سبک، کند شده و در نهایت توسط ماده جاذب، جذب می‌شوند. لذا ضخامت مورد نیاز برای یک تضعیف مطلوب و به تبع آن، حجم و وزن حفاظ نیز کاهش می‌یابد.



شکل ۱: شار نوترون برحسب انرژی برای سه نوع چیدمان حفاظ، پلیمر پلی اتیلن



شکل ۲: شار نوترون برحسب انرژی برای سه نوع چیدمان حفاظ، پلیمر پلی استایرن



شکل ۳: شار نوترون برحسب انرژی برای حفاظ چندلایه و برای دو نوع پلیمر

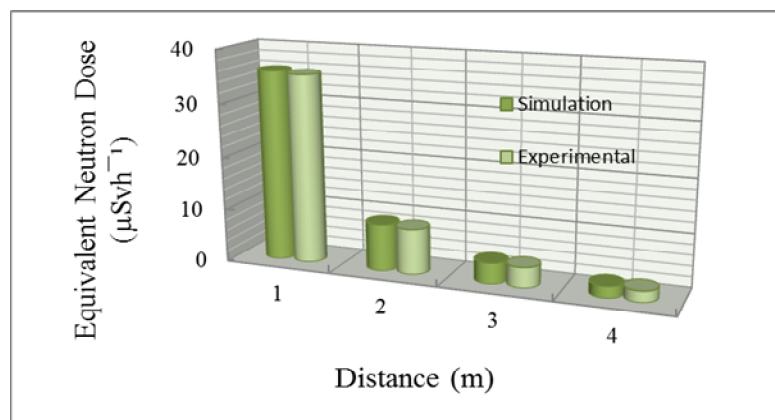
بعد از انتخاب بهترین نوع حفاظ، مقایسه‌ای بین پلیمرهای به‌کاررفته برای حفاظ چند لایه انجام گرفت. با توجه به شکل (۳) می‌توان دریافت که پلیمر پلی اتیلن عملکرد بهتری نسبت

داده شده است. با توجه به خطاهای محاسبه‌شده، نتایج شبیه‌سازی و آزمایش از تطابق خوبی برخوردارند.

جدول ۵: تأیید نتایج شبیه‌سازی

دز معادل نوترون ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )			
فاصله از چشمه (m)	شبیه‌سازی	تجربی	خطای نسبی
۱	۳۵/۸۶۷۲۶	۳۵/۵	۰/۰۱۰۳
۲	۸/۸۷۳۵۲۵	۸/۶	۰/۰۳۱۸
۳	۳/۹۲۷۸۷۱	۳/۸	۰/۰۳۳۶
۴	۲/۲۰۱۷۱۸۲	۲/۱	۰/۰۴۸۴

با توجه به نتایج ذکرشده در نمودارها و جدول‌ها، می‌توان دریافت که کمترین مقدار شار نوترون و همچنین حداقل مقدار دز مجاز در حفاظ چندلایه پلی اتیلنی حاصل می‌شود. با توجه به کاربردهای مختلفی که چشمه  $^{241}\text{Am-Be}$  دارد، بدیهی است با افزایش تعداد لایه‌ها می‌توان این مقادیر را کاهش بیشتری داد. از طرفی، از آنجا که در محاسبات حفاظ‌سازی، علاوه بر حداقل میزان دز، پارامترهای دیگری از جمله وزن نیز دارای اهمیت است، باز هم این نوع حفاظ انتخاب مناسبی است. در این تحقیق، به دلیل نبود امکان آزمایش، برای راستی‌آزمایی کد، از نتایج یک کار تجربی انجام‌شده روی یک چشمه  $^{241}\text{Am-Be}$  با فعالیت  $5\text{Ci}$  که توسط حفاظ پلی اتیلنی احاطه شده بود، استفاده شد [۷]. نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی، داده‌های استخراج‌شده از مرجع [۷] و خطای نسبی به‌دست‌آمده در جدول (۵) نشان



شکل ۴: مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی و آزمایش جهت دز معادل نوترون

#### ۴. مراجع

- [1] A.B. Chilton, J.K. Shultis, and R.E. Faw. Principles of Radiation Shielding. Prentice-Hall Englewood Cliffs 488 (1984).
- [2] M.N. Nasrabadi, G. Baghban. Neutron shielding design for  $^{241}\text{Am-Be}$  neutron source considering different sites to achieve maximum thermal and fast neutron flux using MCNPX code. Ann. Nucl. Energy 59 (2013) 47–52
- [3] N. Tsoufanidis. Measurement and Detection of Radiation. 2nd edition, University of Missouri-Rolla Press 706 (1995).
- [4] K.K. Shahri, L.R. Motavalli, H.M. Hakimabad, Finding a suitable shield for mixed neutron and photon fields based on an Am-Be source, J Radiation Nucl. Chem. 298 (2013) 33-9.
- [5] X-5 Monte Carlo Team, MCNP5 Manual, MCNP: A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5, Los Alamos National Laboratory (2008) 401-402.
- [6] ICRP Publication 60 (1990) recommendations of the international commission on radiological protection, Ann. ICRP. 21 (1991).
- [7] H.M. Hakimabad, A.V. Noghreian, H. Panjeh. Improving the moderator geometry of an anti-personnel landmine detection system. Appl. Radiat. Isot. 66 (2008) 606-611.