

معرفی یک روش پوشی برای تعیین مکان یک چشمه نوترون در یک محیط محدود

حسام مالمیر^۱ - ناصر وثوقی^{۱*} - غلامرضا اطاعتی^۲ - محمد جواد صفری^۲

۱. دانشگاه صنعتی شریف - دانشکده مهندسی انرژی - گروه مهندسی هسته‌ای

۲. دانشگاه صنعتی امیرکبیر - دانشکده مهندسی هسته‌ای و فیزیک

چکیده

تعیین مکان یک چشمه نوترون گم شده در یک محیط محدود (بدون مداخله فرد آزمایشگر به منظور رعایت موارد ایمنی) و یا مخفی شده در داخل یک وسیله نقلیه و یا کشتی‌های تجاری (به منظور کشف محموله‌های قاچاق چشمه‌های نوترون) و غیره، ضرورت‌آرایه روشی مناسب با دقت بالا، هزینه پایین و قابلیت استفاده در تمامی محیط‌های ممکن را روشن می‌سازد. هدف از انجام این پژوهش، یافتن روشی بهینه جهت به دست آوردن تخمین قابل قبولی از مکان یک چشمه نقطه‌ای نوترون در یک محیط مشخص محدود، با دارا بودن تمامی مشخصات فوق، می‌باشد. اهمیت تعیین مکان این چشمه از خارج محیط، از نقطه نظر مسایل ایمنی و حفاظت در برابر پرتو می‌باشد. در این راستا، ضمن مطالعه کیفی بر روی تمامی روش‌های موجود در این زمینه، روشی بدیع جهت تعیین مکان یک چشمه نوترونی در تمامی انواع محیط‌های همگن و ناهمگن و انواع هندسه‌های ممکن آرایه شده است. این روش، به دلیل آن که تمامی نقاط محیط مورد بررسی را با استفاده از راهبرد خاصی جستجو می‌کند تا محل چشمه را بیابد، روش پوشی نام‌گذاری شده است. در روش پوشی، فرض بر آن است که محیط مدنظر به همراه عناصر تشکیل دهنده آن شناخته شده است. بدین ترتیب، ابتدا به شبیه‌سازی محیط با استفاده از کد MCNP اقدام شده و تابع گرین آن به دست آورده می‌شود. سپس، با توجه به اندازه‌گیری‌های صورت گرفته در آشکارسازهای نوترونی اطراف محیط مدنظر، نسبت شار ثبت شده در این آشکارسازها دو به دو یافته می‌شوند. از کمینه‌یابی مربعات خطاهای مربوط به نسبت شار اندازه‌گیری شده و محاسبه شده (عناصر تابع گرین)، محل واقعی چشمه نقطه‌ای نوترون را می‌توان یافت. این روش در مورد یک محیط سه‌بعدی ناهمگن با هندسه پیچیده آزموده شده و نتایج به دست آمده، حاکی از دقت بالای این می‌باشد. از این روش می‌توان در طراحی دروازه‌های ورودی و خروجی خودرو، جهت یافتن مکان چشمه‌های نوترونی مخفی شده و یا در مشخص نمودن مکان چشمه‌های گم شده در محیط‌های آزمایشگاهی و غیره بهره جست.

کلیدواژه: تعیین مکان چشمه نوترونی، سه بعدی، محیط‌های ناهمگن، روش پوشی، تابع گرین محیط

مقدمه

هدف از انجام پژوهش حاضر، به دست آوردن تخمین قابل قبولی از مکان یک چشمه نقطه‌ای نوترون در یک محیط مشخص محدود می‌باشد. اهمیت تعیین مکان این چشمه از خارج محیط، از نقطه نظر مسایل ایمنی و حفاظت در برابر پرتو می‌باشد. از جمله کاربردهای آن می‌توان به کشف محموله‌های قاچاق چشمه‌های نوترون و نیز چشمه‌های آلفا از طریق اندرکنش‌های (α, n) ، تعیین مکان چشمه‌های گم شده در یک محیط

محدود، اندازه گیری های مربوط به زباله های رادیواکتیو، پیدا کردن چشمه های کوچک در glove box ها و غیره اشاره کرد.

از جمله کاربردهای تعیین مکان چشمه نوترونی، در طراحی دروازه های ورودی و خروجی کانتینرهای حامل بار در مبادی گمرکی و غیره می باشد. البته تعیین مکان چشمه در مورد تمامی کانتینرهای ورودی به دروازه صورت نمی گیرد. در مرحله اول، یک اسکن سریع برای یافتن کانتینرهای نشان دهنده نسبت سیگنال به نویز بزرگتر از مقدار مشخصی (بر مبنای مقدار پس زمینه) صورت می گیرد. در مرحله بعد، تنها آنهایی که مقادیر سیگنال به نویز بالایی را نشان می دهند، جهت تعیین مکان چشمه نامعلوم مورد بررسی قرار می گیرند. در زمینه تعیین مکان یک چشمه نوترونی، در گذشته چندین مطالعه انجام شده است. آنتونوپولوس دومیس و همکارانش [۱] وجود ایزوتوپ های زوج پلوتونیم را در محفظه های مهر و موم شده، با استفاده از به نوسان درآوردن محفظه مشکوک در یک چاه حاوی یک استوانه پارافینی به همراه ۱۲ عدد آشکارساز 3He ، مشخص نمودند. سپس، پیورانگ و همکارانش [۲]، کاربرد یک آشکارساز سویی نوترون های حرارتی (مستقل از کندکننده) را جهت تشخیص و تعیین مکان چشمه های نوترونی، حتی در فواصل بیشتر از ۲۴ متر، پیشنهاد دادند.

لیندن و همکارانش [۳]، از یک آشکارساز سوسوزن کوچک که به یک تار اپتیکی متصل بود، استفاده نموده تا مکان چشمه نوترونی را در یک محیط همگن حاوی آب تعیین کنند. روش کار آنها بر مبنای اندازه گیری شار و گرادیان آن استوار بود. بعدها، آودیچ و همکارانش [۴] شار اسکالر نوترونی و جریان نوترونی را توسط یک آشکارساز تار اپتیکی اندازه گیری نموده و با استفاده از آن، یک چشمه نوترونی را در یک محفظه آب تعیین مکان نمودند.

دوبینسکی و همکارانش [۵]، با استفاده از دو آشکارساز 3He که در دو طرف یک جعبه به کار گرفتند، به تعیین مکان یک چشمه نوترونی در دو بعد اقدام نمودند. در این روش فرض بر آن است که نسبت نرخ شمارش ثبت شده در دو آشکارساز، بر حسب فاصله چشمه تا یکی از آشکارسازها، به صورت نمایی تغییر می کند. همین افراد، این روش را در حالت سه بعدی نیز به کار بردند [۶]. سپس، همین افراد دقت روش فوق را با استفاده از یک الگوریتم تکرار بهبود داده و در حالی که در به کار بردن روش فوق در مورد نواحی بزرگتر به تعداد آشکارساز بیشتری احتیاج است، روش تکرار تنها به تعداد گام های بیشتری نیاز دارد [۷].

همانطور که ملاحظه می گردد، روش های ارائه شده جهت تعیین مکان چشمه نوترونی تاکنون، هر کدام یا مختص کاربرد خاصی بوده و یا شامل فرض های ساده کننده می باشند. بدین ترتیب، روشی کلی که تمامی کاربردهای مورد انتظار را پوشش دهد، تا به حال ارائه نشده است.

معرفی روش پویشی

در این روش تابعی تحت عنوان تابع دلتا، بین هر دو آشکارساز موجود در سیستم به صورت زیر تعریف می شود:

$$\Delta_{ij}(r) = \frac{\phi(r_i)}{\phi(r_j)} - \frac{G(r_i, r)}{G(r_j, r)} \quad (1)$$

که در آن r_i و r_j به ترتیب نشان دهنده مکان آشکارسازهای i و j می باشند و r تمامی نقاط مورد بررسی جهت یافتن مکان چشمه نوترونی می باشد. همچنین، رابطه میان $\phi(r_i)$ و $G(r_i, r)$ توسط انتگرال فردهم به صورت زیر بیان می گردد [۸]:

$$\phi(r_i) = \int G(r_i, r) S(r) dr \quad (2)$$

که در آن $S(r)$ شدت چشمه نوترونی در نقطه r می باشد. سپس، یک تابع دلتای کل به صورت زیر تعریف می شود:

$$\Delta(r) = \sum_{i,j} \Delta_{ij}^2(r) \quad (3)$$

نقطه ای که کمینه این تابع دلتای کل را به دست دهد (r_s)، به عنوان مکان چشمه نوترونی معرفی خواهد شد. لازم به ذکر است که در تعریف تابع دلتای کل و کمینه یابی آن، روش کمینه مربعات خطاها مدنظر بوده است. همچنین، دلیل آن که از اختلاف نسبت شارها (رابطه ۱) استفاده شده است، حذف اثر شدت چشمه در الگوریتم تعیین مکان می باشد. بدین ترتیب، پس از تعیین مکان چشمه به روش فوق، شدت چشمه به صورت زیر به دست خواهد آمد:

$$S(r) = \frac{\phi(r_i)}{G(r_i, r)} \quad (4)$$

در این روش، نسبت شار محاسبه شده در آشکارسازها ناشی از چشمه فرضی نوترون در تک تک نقاط محیط (عناصر ماتریس تابع گرین) را می توان از حل معادلات تراز نوترون در محیط مورد بررسی به دست آورد. توجه شود که دقت روش پویشی ارایه شده جهت تعیین مکان چشمه نوترونی در یک محیط محدود، به روش مورد استفاده جهت تخمین شار نوترونی در آن محیط (تابع گرین محیط) بستگی داشته و هر اندازه که روش محاسبه شار نوترونی دقیق تر باشد، تعیین مکان به این روش نیز از دقت بالاتری برخوردار خواهد بود.

شبیه سازی و نتایج

محاسبات نوترونی با استفاده از کد مونت کارلو MCNP [۹] انجام داده شده اند. بدین منظور از تالی شار سلولی (F4) استفاده شده است. تالی F4 تخمین گر مقدار شار مورد انتظار در داخل سلول است. چنانچه این تالی را با چگالی اتمی ماده آشکارساز و سطح مقطع جذب آن وزن دهیم (ترکیب F4 و FM4)، می توان تعداد نوترون های جذب شده در یک آشکارساز واقعی را به دست آورد.

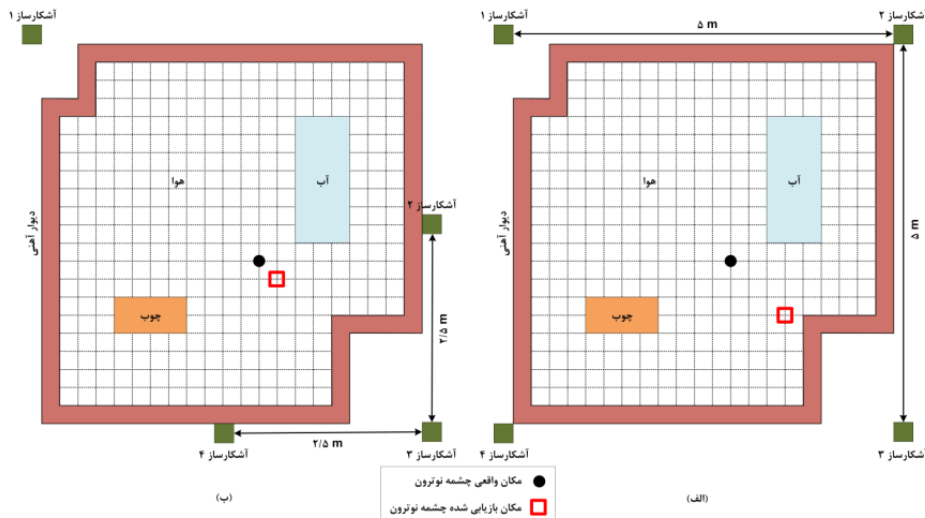
در اینجا آشکارسازهای نوترونی از نوع ^3He انتخاب شده‌اند. با توجه به اینکه این آشکارسازها تنها به نوترون‌های حرارتی حساس می‌باشند، دو گروه انرژی را در محاسبات لحاظ نموده و تنها شار نوترون‌های حرارتی در آشکارسازها ثبت و مورد استفاده قرار گرفته‌اند. همچنین، چشمه نوترونی ^{252}Cf انتخاب شده و طیف شکافت خود به خودی آن مستقیماً از کتابخانه‌های MCNP-4C، بر طبق طیف Watt fission، به صورت زیر برداشته شده است [۹]:

$$f(E) = C \cdot \exp\left(-\frac{E}{a}\right) \sinh(bE)^{1/2} \quad (5)$$

با ثوابت $b = 2.926 \text{ Mev}^{-1}$ و $a = 1.025 \text{ Mev}$

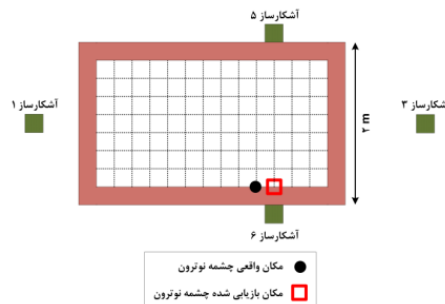
لازم به ذکر است که در شبیه‌سازی صورت گرفته توسط کد MCNP از روش‌های کاهش واریانس برخوردار اجباری و پنجره وزنی، برای کاهش خطای اندازه‌گیری شار توسط آشکارسازها و بالاتر بردن دقت محاسبات استفاده شده است. لازم به ذکر است که چنانچه از روش کاهش واریانس برخوردار اجباری در کنار تالی F5 (آشکارساز نقطه‌ای) استفاده شود، دقت شار ثبت شده در محیط‌های بزرگ (فاصله‌های نسبتاً دور چشمه از آشکارساز) بالاتر خواهد بود. در غیر اینصورت، چنانچه خطای اندازه‌گیری شار بالا باشد، دیگر نه تنها الگوریتم تعیین مکان به روش پویشی کارساز نمی‌باشد، بلکه سایر روش‌ها نیز از عهده این کار برنخواهند آمد. البته در عمل به دلیل استفاده از آشکارسازهای واقعی باید به دنبال کاهش خطای اندازه‌گیری بود.

جهت آزمودن روش پویشی، یک محیط ناهمگن با هندسه نامنظم به ابعاد ۵ در ۵ متر، شامل هوا، چوب و آب، که با یک حفاظ آهنی به ضخامت ۲۵ سانتی‌متر از محیط بیرونی مجزا شده است، در نظر گرفته شد (شکل ۱). با استفاده از ۴ آشکارساز با فاصله یکسان در اطراف محیط مدنظر، خطای به دست آمده در تعیین مکان چشمه حدود ۱۰۶ سانتی‌متر به دست آمد (شکل ۱-الف). همانطور که در این شکل قابل مشاهده است، با توجه به چینش اولیه آشکارسازها و همچنین ناهمگنی محیط، تعیین مکان چشمه نوترونی به این روش دقت مورد انتظار را ندارد. بنابراین، باید تعداد آشکارسازهای اطراف سیستم را افزایش داد و یا چیدمان آشکارسازها را طوری تغییر داد که شار نوترونی ثبت شده توسط آنها افزایش یابد. شیوه پیشنهادی برای تغییر چیدمان آشکارسازها بدین صورت است که نخست دو آشکارساز با بیشترین مقادیر شار نوترونی ثابت نگه داشته شده و دو آشکارساز دیگر به اندازه نصف فاصله اولیه به سمت آشکارساز با بیشترین مقدار شار ثبت شده جابجا شوند. در مسأله حاضر، شار ثبت شده توسط آشکارساز ۳ بیشترین مقدار را داشته و پس از آن شار نوترونی در آشکارسازهای ۱، ۴ و ۲ به ترتیب از مقادیر بیشتری برخوردار است. بنابراین شیوه تغییر چیدمان آشکارسازها در این حالت بدین صورت است که آشکارسازهای ۲ و ۴ به اندازه نصف فاصله اولیه به سمت آشکارساز ۳ حرکت داده می‌شوند (شکل ۱-ب). همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، خطای به دست آمده در این حالت به حدود ۳۵ سانتی‌متر بهبود می‌یابد.



شکل ۱- تعیین مکان یک چشمه در یک محیط ناهمگن با هندسه نامنظم؛ الف) قبل از جابجایی آشکارسازها ب) پس از جابجایی آشکارسازها

همچنین این روش در حالت سه بعدی با ارتفاع محیط ۲ متر، با افزودن دو آشکارساز در بالا و پایین محیط مدنظر (در محل بازیابی شده در دوبعد) آزموده شد (شکل ۲). در این حالت، درصد خطای نسبی مکان بازیابی شده چشمه (از تقسیم حجم ناحیه‌ای به شعاع خطا در اطراف موقعیت مکانی واقعی چشمه بر حجم کل ناحیه مورد بررسی) در مقایسه با مکان واقعی آن حدود ۱/۱٪ به دست آمد.



شکل ۲- تعیین مکان سه بعدی چشمه نوترونی با افزودن دو آشکارساز به بالا و پایین محیط

بحث و نتیجه‌گیری

در این مقاله، روش پوشی به عنوان الگوریتم جدیدی در تعیین مکان یک چشمه نوترونی در یک محیط محدود معرفی شد. این روش که برمبنای کمینه‌یابی اختلاف بین نسبت شار نوترونی اندازه‌گیری شده در آشکارسازها و نسبت شار محاسبه شده در تک تک نقاط مورد بررسی استوار است، علاوه بر دقت بالا در تعیین مکان یک چشمه نوترونی، قابلیت تعمیم به انواع محیط‌های ممکن با هر نوع هندسه پیچیده را دارا می‌باشد. خطای این روش در مورد یک مثال نسبتاً پیچیده (یک محیط سه‌بعدی ناهمگن با ساختار نامنظم) در حدود ۱/۱٪ به دست آمد.

در استفاده از روش پویشی باید به این نکته توجه داشت که عناصر ماتریس تابع گرین به دست آمده از محاسبات مونت کارلو باید از دقت بالایی برخوردار باشند و همچنین اندازه‌گیری‌های شار نوترونی در آشکارسازهای اطراف محیط نیز بر دقت این روش بسیار تأثیرگذار می‌باشند.

مراجع

- [1] M. Antonopoulos-Domis, M. Marseguerra, K. Mourtzanos, S. Tarantola. Neutron source localization within sealed tanks. *Ann. Nucl. Energy*, 21 (1994) 687-699.
- [2] A. J. Peurrung, P. L. Reeder, D. C. Stromswold. Location of neutron sources using moderator-free directional thermal neutron detectors. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 44 (1997) 3.
- [3] P. Linden, J. K. Karlsson, B. Dahl, I. Pazsit, G. Por. Localisation of a neutron source using measurements and calculation of the neutron flux and its gradient. *Nucl. Instr. and Meth. A*, 438 (1999) 345-355.
- [4] S. Avdic, P. Linden, I. Pazsit. Measurement of the neutron current and its use for the localization of a neutron source. *Nucl. Instr. and Meth. A*, 457 (2001) 607-616.
- [5] S. Dubinski, A. Talmor, O. Presler, A. Tshuva, I. Yaar, I. Orion, Z. B. Alfassi. The determination of a neutron source position in an unknown homogeneous medium: The planar case. *Nucl. Instr. and Meth. A*, 548 (2005) 555-563.
- [6] S. Dubinski, O. Presler, Z. B. Alfassi. The localization of a neutron source in an unknown homogeneous medium: The 3D case. *Nucl. Instr. and Meth. A*, 574 (2007) 315-323.
- [7] S. Dubinski., O. Presler, Z. B. Alfassi. An iterative method for the localization of a neutron source in a large box (container). *Nucl. Instr. and Meth. A*, 583 (2007) 439-446.
- [8] N. Tsoulfanidis. *Measurement and Detection of Radiation*, 2nd Edition. Taylor and Francis, Washington, (1995).
- [9] J.F. Briesmeister, ed. *MCNP- A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4C*. Technical report LA-13709-M, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM, (2000).