



طراحی سلول سوسوزن پلاستیک همراه با مواد جاذب نوترون حرارتی برای شمارش نوترون در میدان های آمیخته

عزیزی، مریم*^(۱) - عباسی دوانی، فریدون^(۱) - قاسمی، بهجت^(۱) - محمدی، عقیل^(۲)

^(۱) دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده مهندسی هسته‌ای، گروه کاربرد پرتوها

^(۲) دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی انرژی و فیزیک، گروه کاربرد پرتوها

چکیده:

در این تحقیق استفاده از آشکارساز سوسوزن پلاستیک همراه با پودر کاربید بور (B_4C) به منظور افزایش بازدهی شمارش نوترون های حرارتی مطرح شده و مورد بررسی قرار گرفته است، هندسه مناسب برای قرار دادن ماده جاذب در سلول سوسوزن با استفاده از کد MCNPX، همچنین نوع ماده جاذب با هدف افزایش بازدهی آشکارسازی نوترون تعیین شده است. برخی مشخصات این سلول از جمله پاسخ نوری آن با توجه به تغییرات انجام شده در آن و تاثیر استفاده از بازتابنده به عنوان پوشش سطح سوسوزن در پاسخ آن با استفاده از کد GATE شبیه سازی شده است. در نهایت با استفاده از نتایج حاصل از شبیه سازی، سلول سوسوزن تراشیده شد و همراه با ماده جاذب در مقابل چشمه نوترون $^{241}Am-Be$ قرار گرفت. نتایج این اندازه گیری نشان دهنده عملکرد صحیح روش به کاررفته در این مقاله برای آشکارسازی نوترون های حرارتی است.

کلمات کلیدی: آشکارسازی، شمارش نوترون، سوسوزن پلاستیک، کد GATE، کد MCNPX

مقدمه:

امروزه آشکارسازهایی همچون طیف سنج کروی بانر، شمارنده بلند و آشکارسازهای BF_3 , 3He و سوسوزن شیشه‌ای لیتیم و شمارنده گازی با پوشش بور، برای آشکارسازی نوترون های سریع و حرارتی مورد استفاده قرار می گیرند. قیمت گران آشکارسازهای گازی BF_3 و 3He و به ویژه کمبود ذخایر 3He در جهان [۱-۳] موجب شده است نیاز به جایگزین های مناسب احساس شود، به طوری که ارزان تر بوده، کارایی مناسبی داشته و نسبت سیگنال به پس زمینه قابل قبولی ارائه دهند [۴].

سوسوزن آلی از قبیل سوسوزن مایع و پلاستیک (به دلیل وجود هیدروژن در آنها) برای آشکارسازی نوترون های سریع به طور وسیعی مورد استفاده قرار می گیرند. برای به کارگیری این سوسوزن ها در آشکارسازی نوترون سریع و حرارتی پژوهش هایی انجام شده است و در سال های اخیر سوسوزن های آلی بارگذاری شده در حوزه آشکارسازی نوترون نیز مشاهده می شود. بدین صورت که سوسوزن های مایع و پلاستیک می توانند با یکی از عناصری که دارای سطح مقطع بالایی برای نوترون ها هستند، مثل بور، لیتیم و گادولینیم بارگذاری شوند [۵-۱۰]. ذرات باردار ثانویه یا پرتوهای گامای حاصل



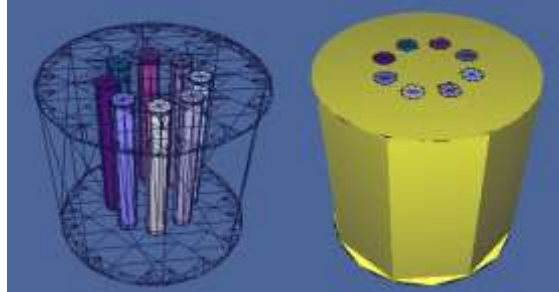
از واکنش‌های القایی نوترون می‌توانند مستقیماً توسط سوسوزن آشکارسازی شده و باعث ایجاد سیگنال خروجی شوند. بدین ترتیب امکان آشکارسازی نوترون با بازدهی بالا فراهم می‌شود.

در این مقاله روش کنار هم قرار دادن سوسوزن پلاستیک و مواد جاذب نوترون (در اینجا ترکیب بور) به جای روش ترکیب شیمیایی مواد سوسوزن و ماده جاذب قبل از فرآیند پلیمریزاسیون، جهت شمارش نوترون در میدان آمیخته نوترون و گاما مطرح شده و مورد بررسی قرار گرفته است. بدین صورت که مواد جاذب نوترون حرارتی در کنار مواد سوسوزنی قرار می‌گیرد. نوترون‌های سریع در برخورد با ماده سوسوزن ابتدا کند شده و سپس با ماده جاذب اندرکنش می‌کنند. محصولات اندرکنش در برخورد با ماده سوسوزن تولید نور کرده و آشکارسازی می‌شوند.

روش کار :

در این تحقیق از سوسوزن پلاستیک از نوع BC-400 استفاده شده است. از میان مواد جاذب نوترون، ^{10}B به دلیل دارا بودن سطح مقطع اندرکنش بالا با نوترون‌های حرارتی و فراوانی طبیعی بالای آن مناسب تشخیص داده شد. در میان ترکیبات بور در دسترس، می‌توان به پودر اسید بوریک (با فرمول شیمیایی H_3BO_3) و همچنین پودر کاربید بور (با فرمول شیمیایی B_4C) اشاره کرد. به منظور افزایش گیراندازی نوترون و در نتیجه افزایش بازدهی آشکارسازی، پودر کاربید بور استفاده شد (برتری کاربید بور نسبت به اسید بوریک این است که در کاربید بور، نسبت بور به کل اتم‌های موجود ۸۰٪ است در حالی که در اسید بوریک این نسبت برابر ۱۴٪ است).

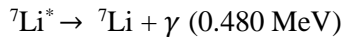
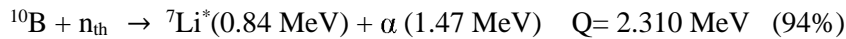
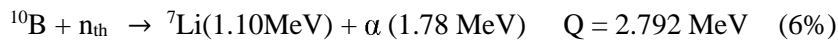
به منظور قرار گیری ماده جاذب در داخل پلاستیک، لازم است حفره‌هایی درون آن ایجاد شود. از آنجایی که مکان حفره‌های ایجاد شده در بازدهی آشکارسازی نوترون موثر است، بنابراین در این پژوهش به این موضوع پرداخته شده است. بدین صورت که با استفاده از کد MCNPX، استوانه‌ای با قطر و ارتفاع ۵ cm از جنس پلاستیک تعریف شد. سپس به منظور قرارگیری مواد جاذب در داخل آن، چندین حفره به ترتیب با قطر و ارتفاع ۰/۵ cm و ۴/۵ cm در شعاع ۰/۷ cm از مرکز پلاستیک تعریف شد و با پودر کاربید بور پر شد (شکل ۱) با استفاده از تالی FM4 و F4 در کد MCNPX، میزان اندرکنش نوترون در سلول‌های پر شده با کاربید بور محاسبه شد. سپس شعاع قرارگیری حفره‌ها درون پلاستیک با گام ۰/۳ cm تغییر داده شد و میزان اندرکنش نوترون در ماده جاذب در هر گام محاسبه شد. نتایج حاصل از شبیه سازی در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۱. هندسه طراحی شده با استفاده از کد MCNPX برای تعیین مکان مناسب برای ایجاد حفره در سوسوزن

پلاستیک

در این آشکارساز نوترون در برخورد با سوسوزن کند شده، سپس در ^{10}B جذب می‌شوند، در اثر این اندرکنش، با احتمال ۹۴٪ ذرات آلفا (با انرژی $1/470 \text{ MeV}$) و پرتو گاما (با انرژی $0/480 \text{ MeV}$) به طور همزمان گسیل شده و در اثر برخورد با سوسوزن آشکارسازی می‌شوند.



از آنجایی که ایجاد حفره و تراشیدن دقیق سطوح آن به لحاظ اپتیکی از اهمیت بالایی برخوردار است. چنانچه این کار با دقت انجام نشود، ناهمواری هایی بر دیواره آن ایجاد می‌شود و کیفیت اپتیکی آشکارساز کاهش می‌یابد. بنابراین به دلیل محدودیت تراشکاری، به جای ایجاد چندین حفره، یک شیار در شعاع تعیین شده با استفاده از نتایج حاصل از کد MCNPX، در داخل پلاستیک ایجاد شد، پس از تراش سوسوزن پلاستیک با کیفیت مناسب، سطوح مختلف آن پولیش داده شد (شکل ۲). همچنین به منظور جلوگیری از فرار نور از سطح سوسوزن نوار تفلون به علت بازتابندگی بالای آن به عنوان پوشش سطح سوسوزن انتخاب شد. و با توجه به اینکه کد GATE قابلیت ترابرد نور سوسوزنی را داراست، پاسخ نوری سوسوزن با توجه به تغییرات انجام شده در آن و تاثیر استفاده از بازتابنده به عنوان پوشش سطح سوسوزن در پاسخ آن با استفاده از این کد بررسی شد. بدین صورت که هندسه سوسوزن پلاستیک با استفاده از این کد تعریف شد. سپس یک چشمه گسیلنده گاما با انرژی $0/480 \text{ MeV}$ با گسیل همسانگرد (به عنوان محصول اندرکنش نوترون های حرارتی با ^{10}B) در شیار موجود در پلاستیک قرار داده شده و پاسخ آن بدون پوشش تفلون و همچنین با در نظر گرفتن نوار تفلون شبیه سازی شد. نتایج آن در شکل نشان داده شده است.

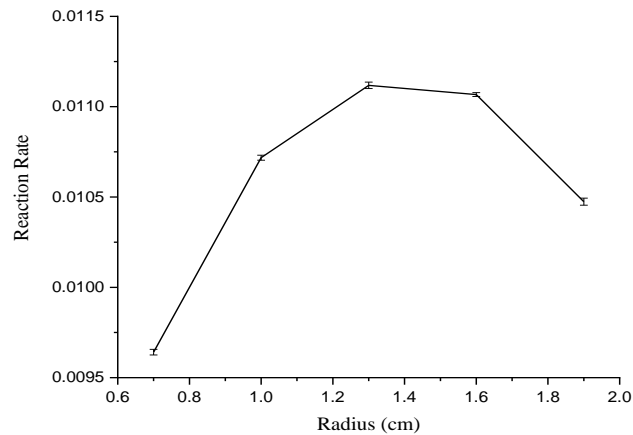
در نهایت جهت بررسی عملکرد آشکارساز در مقابل چشمه نوترون، پودر کاربید بور آسیاب شد و به داخل شیار انتقال یافت (شکل ۱). سپس سوسوزن پلاستیک با لایه نازکی از سیلیکون به لامپ تکثیرکننده فوتونی مدل XP33K0 متصل شد تا نور سوسوزنی حاصل از آن جمع آوری شود. مجموعه آشکارساز در مقابل چشمه نوترون $^{241}\text{Am-Be}$ قرار داده شد. نتایج این اندازه گیری ها در .. نشان داده شده است.



شکل ۲. سوسوزن پلاستیک همراه با ماده جاذب

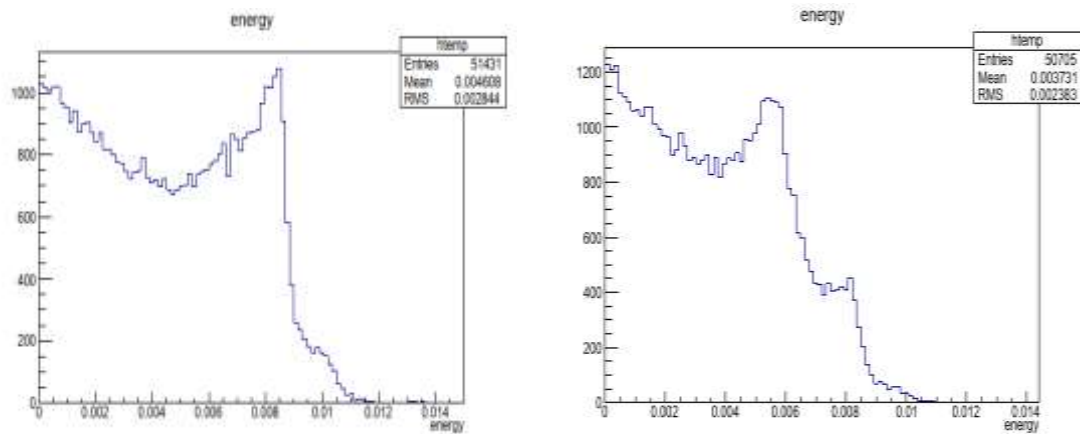
نتایج :

نتایج شبیه سازی با کد MCNPX (شکل ۳) نشان می دهد در صورتی که مرکز حفره ها در شعاع $1/3 \text{ cm}$ ایجاد شود نرخ اندرکنش (n,α) بیشینه بوده و در نتیجه بازدهی آشکارسازی نوترون افزایش می یابد.



شکل ۳. نتیجه حاصل از محاسبات کد MCNPX جهت به دست آوردن شعاع مناسب برای ایجاد حفره در سوسوزن پلاستیک

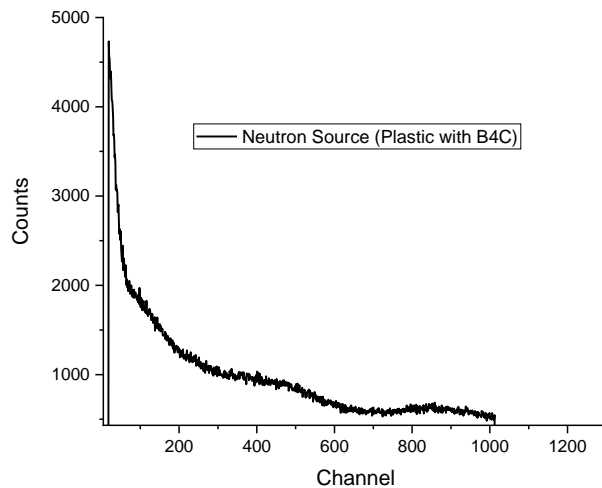
در شکل ۴ طیف شبیه سازی گامای حاصل از اندرکنش نوترون با ^{10}B در سوسوزن پلاستیک با در نظر گرفتن بازتابنده تفلون و بدون آن نشان داده شده است، همانطور که در شکل مشخص است استفاده از بازتابنده در سطح سوسوزن موجب بهبود جمع آوری نور سوسوزنی شده است. بنابراین لازم است سوسوزن پلاستیک همراه با این پوشش مورد استفاده قرار گیرد.



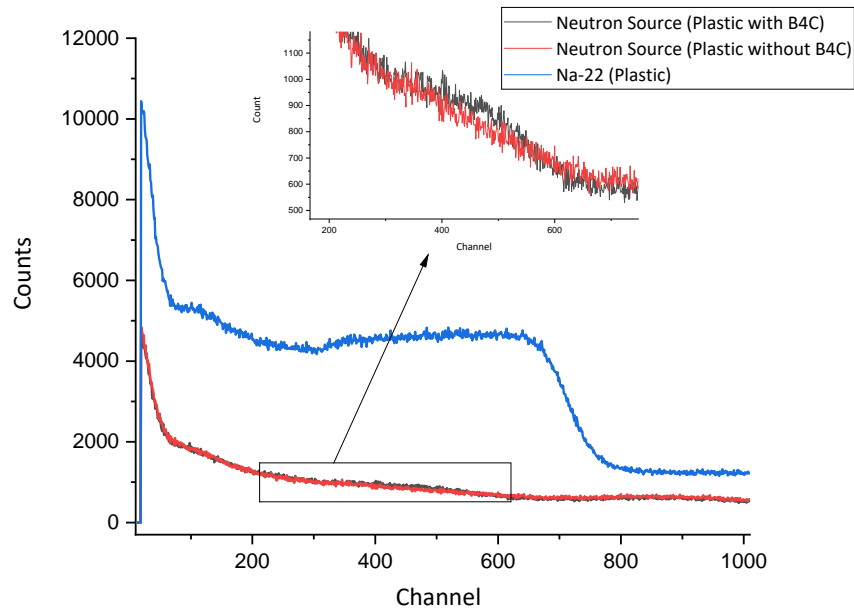
شکل ۴. طیف شبیه سازی پرتو گاما (به عنوان محصول اندرکنش نوترون با ^{10}B) آشکارساز سوسوزن پلاستیک



در شکل ۵ نتایج تجربی حاصل از قرار دادن سوسوزن پلاستیک همراه با مواد جاذب در مقابل چشمه نوترون نشان داده شده است، برای تعیین محدوده انرژی محصولات اندرکنش نوترون با ^{10}B (در اینجا گاما) در طیف، سوسوزن پلاستیک بدون ماده جاذب نیز در مقابل چشمه نوترون قرار داده شد. همچنین چشمه گاما از ^{22}Na به دلیل نزدیکی انرژی آن (0.511 MeV) به انرژی گامای گسیلی از ^{10}B به عنوان مقیاس به استفاده شد. همانطور که در شکل مشخص است در محدوده لبه کامپتون انرژی 0.511 MeV چشمه ^{22}Na ، شمارش سطح زیر نمودار مربوط به سوسوزن پلاستیک همراه با مواد جاذب، بیشتر از حالتی است که پلاستیک بدون مواد جاذب در مقابل چشمه نوترونی قرار داده می شود که به دلیل اندرکنش نوترون های حرارتی در ^{10}B و گسیل پرتو گاما است که لبه کامپتون آن در طیف سوسوزن پلاستیک مشخص است.



شکل ۵. طیف تجربی چشمه $^{241}\text{Am-Be}$ سوسوزن پلاستیک همراه با مواد جاذب نوترون



شکل ۶. طیف تجربی چشمه $^{241}\text{Am-Be}$ سوسوزن پلاستیک همراه با مواد جاذب نوترون و بدون آن

بحث و نتیجه گیری :

در این پژوهش، پیشنهادی برای طراحی و ساخت شمارنده نوترون با استفاده از مواد سوسوزنی و ماده جاذب نوترون مطرح شد. در این طراحی ماده سوسوزن هم نقش کندکننده و هم نقش آشکارساز محصولات اندرکنش نوترون با ماده جاذب را دارد. پس از طراحی سلول سوسوزن و بهینه سازی مکان قرارگیری ماده جاذب نوترون حرارتی در آن، پاسخ نوری آن با استفاده از کد GATE شبیه سازی شده است.

در نهایت با استفاده از نتایج حاصل از شبیه سازی، سلول سوسوزن تراشیده شد و پس از پولیش همراه با ماده جاذب در مقابل چشمه نوترون $^{241}\text{Am-Be}$ قرار داده شد. نتایج این اندازه گیری نشاندهنده عملکرد صحیح روش به کاررفته در این مقاله برای آشکارسازی نوترون های حرارتی است. در صورتی که از نمونه غنی شده از مواد جاذب استفاده گردد، میزان اندرکنش نوترون در مواد جاذب افزایش یافته که موجب افزایش بازدهی شمارش نوترون می شود.

مراجع :

- [1] F. Sacchetti *et al.*, "3He-free neutron detectors and their applications," *Eur. Phys. J. Plus*, vol. 130, no. 3, pp. 1–11, 2015.
- [2] N. Colonna, A. Pietropaolo, and F. Sacchetti, "3He replacement in neutron detection: Current



- status and perspectives,” *Eur. Phys. J. Plus*, vol. 130, no. 10, p. 1, 2015.
- [3] B. M. Young, “³He Replacement Technologies.” pp. 1–11, 2010.
- [4] R. T. Kouzes and J. H. Ely, “PNNL-19360: Status Summary of ³He and Neutron Detection Alternatives for Homeland Security,” no. April, 2010.
- [5] A. Mahl, H. A. Yemam, R. Fernando, J. T. Koubek, A. Sellinger, and U. Greife, “¹⁰B enriched plastic scintillators for application in thermal neutron detection,” *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.*, vol. 880, pp. 1–5, Feb. 2018.
- [6] A. Mahl, H. A. Yemam, J. Stuntz, T. Remedés, A. Sellinger, and U. Greife, “Bis(pinacolato)diboron as an additive for the detection of thermal neutrons in plastic scintillators,” *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.*, vol. 816, pp. 96–100, 2016.
- [7] I. A. Pawełczak, A. M. Glenn, H. P. Martinez, M. L. Carman, N. P. Zaitseva, and S. A. Payne, “Boron-loaded plastic scintillator with neutron- γ pulse shape discrimination capability,” *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.*, vol. 751, pp. 62–69, 2014.
- [8] L. Swiderski *et al.*, “Further study of boron-10 loaded liquid scintillators for detection of fast and thermal neutrons,” *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 57, no. 1 PART 2, pp. 375–380, 2010.
- [9] H. E. Jackson and G. E. Thomas, “Boron-loaded neutron detector with very low γ -ray sensitivity,” *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 36, no. 4, pp. 419–425, 1965.
- [10] Z. H. Cho, C. M. Tsai, and L. A. Eriksson, “Tin and lead loaded plastic scintillators for low energy gamma-ray detection with particular application to high rate detection,” *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 22, no. 1, pp. 72–80, 1975.
- [11] M. Roth, E. Mojaev, O. Khakhan, A. Fleider, E. Dul’Kin, and M. Schieber, “Composite boron nitride neutron detectors,” *J. Cryst. Growth*, vol. 401, pp. 791–794, 2014.