

طراحی دزیمر نوترونی بر اساس آشکارساز کروی ^3He

زهرا، علی پور^{۱*}، اسمعیل، بیات^۲؛ پرویز، قربانی^۳؛ حسین، آفریده^۴

۱-دانشگاه زنجان، دانشکده علوم پایه، گروه فیزیک

۲-دانشگاه بیرجند، دانشکده علوم پایه، گروه فیزیک

۳-دانشگاه آزاداسلامی واحد علوم و تحقیقات، دانشکده علوم پایه، گروه فیزیک

۴-دانشگاه امیرکبیر، دانشکده مهندسی انرژی و فیزیک

چکیده

طراحی و شبیه‌سازی دزیمر نوترونی دارای آشکارساز کروی ^3He با استفاده از کد محاسباتی MCNPX انجام شد. پارامترهای بهینه برای بدست آوردن تابع پاسخ دز معادل محیطی دزیمر مورد بررسی قرار گرفت. ضخامت پلی اتیلن خارجی دزیمر و پلی اتیلن احاطه کننده آشکارساز به ترتیب 8 cm و $1,885\text{ cm}$ و همچنین شعاع 12 حفره استوانه‌ای تعبیه شده از سطح کره پلی اتیلن خارجی تا سطح پلی اتیلن داخلی، $0,35\text{ cm}$ در نظر گرفته شد. بر اساس ابعاد بهینه بدست آمده، تابع پاسخ محاسبه شده برای دزیمر نوترونی مورد بررسی همخوانی بسیار خوبی با پراب نوترونی LB ۶۴۱۱ دارد.

کلید واژه: دزیمر کروی، MCNPX، آشکارساز کروی ^3He .

مقدمه

پاسخ دزیمرهای نوترونی بطور قابل ملاحظه‌ای در گستره وسیع انرژی تغییر می‌یابد. تابع پاسخ دزیمر نوترونی به شکلی استخراج می‌گردد که متناسب با ضرایب تبدیل شار به دز معادل باشد. بر اساس ملاحظات ارائه شده در ICRP ۱۹۹۰ معادل دز محیطی ($H^*(10)$) بصورت ذیل تعرف می‌گردد:

$$H^*(10) = \int h_{\varphi}(E)\varphi(E)dE$$

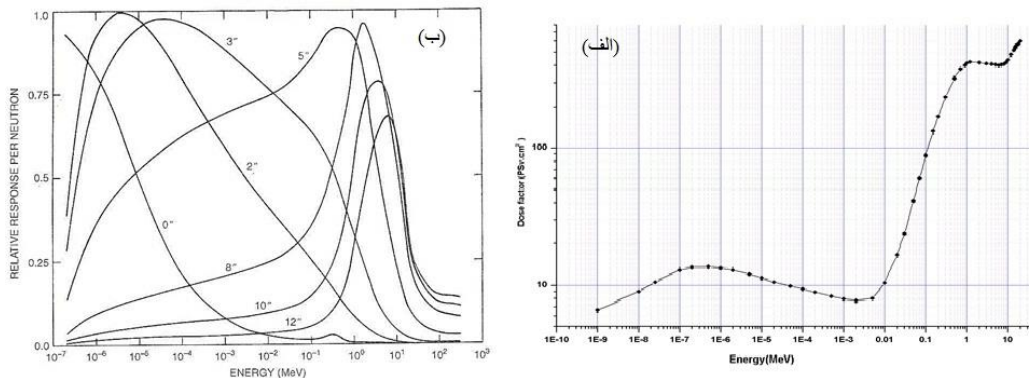
در این معادله $h_{\varphi}(E)$ ، تابع تبدیل شار به دز معادل محیطی و φ_E ، شار نوترون می‌باشند. تابع پاسخ دزیمر (R)

$$R = \int C \cdot d_{\varphi}(E)\varphi(E)dE$$

بصورت ذیل تعریف می‌گردد:

در این معادله $d_{\varphi}(E)$ ، تابع پاسخ دزیمر بر حسب شمارش به ازای واحد شار بوده و C فاکتور کالیبراسیون بر حسب سیورت در هر شمارش می‌باشد. نسبت $d_{\varphi}(E)/h_{\varphi}(E)$ به عنوان پاسخ انرژی استاندارد بر حسب شمارش در هر واحد دز معادل تعریف می‌گردد. اندازه گیری دزیمر به شرطی دقیق می‌باشد که $d_{\varphi}(E)$ پاسخ انرژی یکنواختی نسبت به $h_{\varphi}(E)$ دارا باشد. مشکل اصلی این است که $d_{\varphi}(E)$ در کل گستره انرژی نوترون متناسب با $h_{\varphi}(E)$ نمی‌باشد، بنابراین پاسخ آشکارسازها زیر پاسخ واقعی یا بالای آن در ناحیه انرژی معین می‌افتد. از این رو دانستن طیف نوترون در اندازه گیری می‌تواند در سنجش دز نوترون مفید واقع گردد. در نمودار شکل ۱. الف، مقادیر ضرایب تبدیل شار به دز معادل محیطی عمقی یعنی $H^*(10)$ در انرژی‌های مختلف نوترون

آمده است، مشاهده می‌گردد که دز نوترون شدیداً به انرژی نوترون وابسته است. لذا پاسخ شار آشکارساز متفاوت از پاسخ دز نوترون آن می‌باشد [۱]. بر مبنای مطالعات انجام گرفته منحنی پاسخ نشان داده شده در شکل ۱.ب، برای کره‌ای به قطر ۱۲ اینچ، رفتاری مشابه با ضرایب تبدیل شار به دز معادل محیطی (شکل ۱.الف) دارد [۲]. به علت شباهت دو منحنی، بازدهی آشکارساز برای آندسته از نوترونهایی که اهمیت بیولوژیکی بالایی دارد، بالا است و برای نوترونهایی که بازدهی پایینی دارد دز وابستگی کمی دارد. بنابراین، شمارش کلی حاصل از آشکارساز در یک طیف چند انرژی بطور خودکار دارای فاکتورهای وزنی مناسب برای کلیه انرژی‌ها است و سنجش معناداری از دز وابسته به کلیه انرژیهای نوترون ها ارائه خواهد داد. برای برخی دزیمترهای نوترون مانند LB ۶۴۱۱ ساخت شرکت Berthold بر مبنای این تحلیل، طراحی و ساخته شده‌اند [۱]. در این تحقیق نیز، طراحی و شبیه‌سازی یک دزیمتر نوترونی با آشکارساز کروی ^3He مورد بررسی قرار گرفت و پارامترهای بهینه برای طراحی دزیمتر نوترونی مناسب بدست آمد.



شکل ۱. الف) نمودار تغییرات ضرایب تبدیل شار به دز معادل محیطی عمقی برای نوترون در انرژی‌های مختلف ب) وابستگی انرژی بازدهی نسبی آشکارسازی، آشکارسازهای نوترون کره بانر با قطرهای مختلف تا ۱۲ اینچ. [۱،۲]

مواد و روش

پارامترهای مختلف در طراحی دزیمتر مورد نظر، مانند ضخامت کندکننده و ابعاد قسمت‌های مختلف آن شبیه‌سازی و مورد بررسی قرار گرفت. آشکارساز انتخاب شده برای طراحی دزیمتر نوترونی، یک آشکارساز کروی محصول شرکت LND از نوع تناسبی بوده که توسط گاز ^3He با فشار ۵,۰۵۴ bar پر شده است و دارای قطر ۵,۰۸ cm می‌باشد. چگالی گاز ^3He آشکارساز بر اساس قانون گاز ایده‌آل محاسبه شده است. آشکارساز ^3He دارای سطح مقطع بسیار بالایی برای نوترون‌های کند می‌باشد. بنابراین جهت اندازه‌گیری نوترون‌های با انرژی بالاتر، نیاز به یک کندکننده، غالباً پلیمری، است. در این طراحی، آشکارساز توسط یک کره از پلی‌اتیلن (چگالی 0.95 g/cm^3) با ۰,۳% کربن افزوده (و یک لایه کادمیومی جذب کننده نوترونی احاطه شده است. لایه



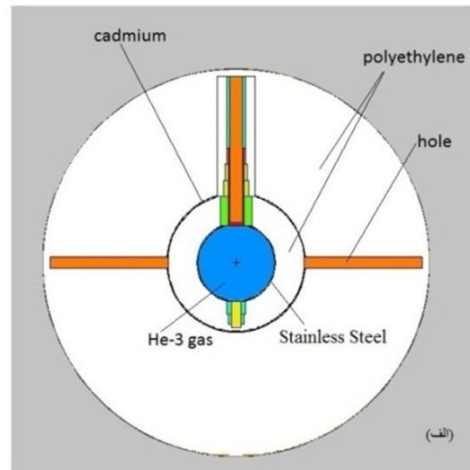
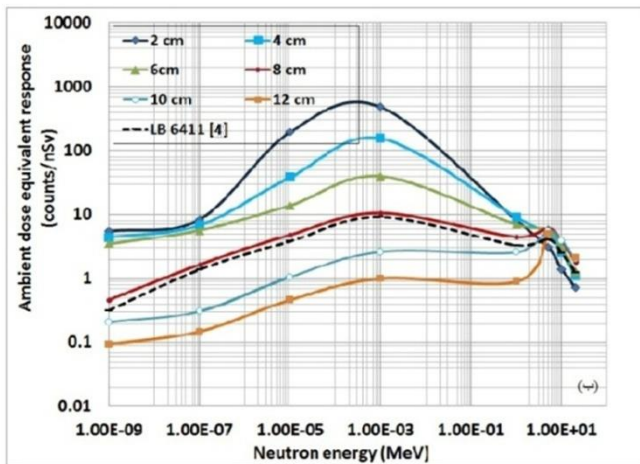
پلی اتیلن خارجی احاطه کننده کادمیوم شامل حفره‌های استوانه‌ای شکل می‌باشد. حفره‌های تعبیه شده در پلی اتیلن به منظور بالا بردن احتمال رسیدن نوترون‌های حرارتی چشمه به محل آشکارساز است. برای بدست آوردن حالت بهینه ضخامت کند کننده‌ها، آهنگ اندرکنش (n,p) در شمارنده کروی ^3He بر اساس ضخامت‌های ۲، ۴، ۶، ۸، ۱۰ و ۱۲ سانتی‌متر پلی اتیلن خارجی (احاطه کننده کادمیوم) و ضخامت‌های مختلف پلی اتیلن داخلی (احاطه کننده آشکارساز) محاسبه شده است. همچنین در شبیه‌سازی‌ها، قطرهای مختلفی برای حفره‌های استوانه‌ای موجود در کندکننده پلی اتیلنی برای بدست آوردن قطر مناسب، مورد بررسی قرار گرفت.

پاسخ دز معادل محیطی و پاسخ شار دزیمتر برای نوترون‌های تک انرژی حرارتی تا ۲۰ MeV محاسبه شد. در این تحقیق تمامی محاسبات، بر اساس داده‌های بدست آمده از کد ترابرد نوترون، فوتون و الکترون (MCNPX) (۶، ۲) انجام شده است [۳]. تاریخچه ذرات تا جایی دنبال شده‌اند که خطای عدم قطعیت محاسبات کمتر از یک درصد باشد. ثابت‌ها و پارامترهای مختلفی برای شبیه‌سازی دستگاه مورد نظر بکار رفته است. برای شبیه‌سازی برهمکنش‌های نوترون با مواد مختلف، از داده‌های سطح مقطع نوترون ENDF/B-VII استفاده شده است. برای در نظر گرفتن اثر پیوندهای شیمیایی هیدروژن موجود در پلی اتیلن نیز که با نوترون‌های گرمایی برهمکنش دارند، از POLY.۰۱T مربوط به $S(\alpha, \beta)$ استفاده شده است. به منظور اعمال شرایط ICRP در ایجاد میدان تابشی نوترونی منظم و گسترده، چشمه نوترونی بصورت یک صفحه دایره‌ای شکل با قطر معادل قطر کندکننده در نظر گرفته شده است. همچنین فاصله چشمه تا مرکز آشکارساز نیز برابر با قطر کندکننده می‌باشد. فرض می‌شود که نقطه شروع حرکت نوترون‌ها بصورت یکنواخت روی سطح چشمه توزیع شده است و نوترون‌ها در جهت بردار نرمال چشمه به سمت آشکارساز حرکت می‌کنند. برای محاسبه تعداد کل برهمکنش‌ها که در حجم حساس رخ داده است، یک کارت تالی F۴ به همراه یک کارت FM۴ معرفی می‌شود. تالی F۴ متوسط شار نوترونی بر روی حجم حساس گاز تناسبی را محاسبه می‌کند. بوسیله ضرب نتیجه تالی F۴ در چگالی اتمی ماده و سطح مقطع میکروسکوپی واکنش (n,p)، تولید کل پروتون، بواسطه گیراندازی نوترون در تیوپ شمارنده، بدست می‌آید. و این بوسیله استفاده از یک کارت تالی FM امکان پذیر است. برای رسیدن به کمیت تابع پاسخ دز معادل محیطی بر حسب counts/nSv، نتایج نهایی حاصل از فایل ورودی counts باید بر حسب counts per source particle باشد. بدین منظور از کارت SD استفاده می‌شود.

نتایج

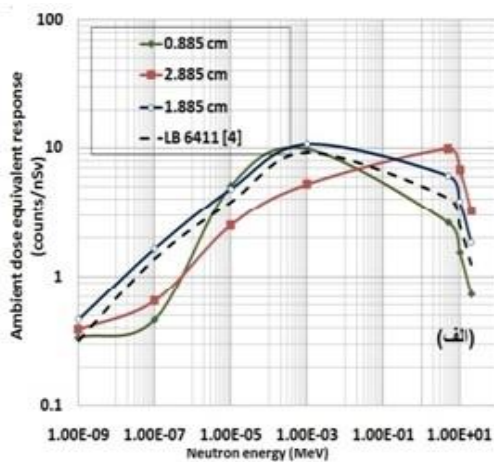
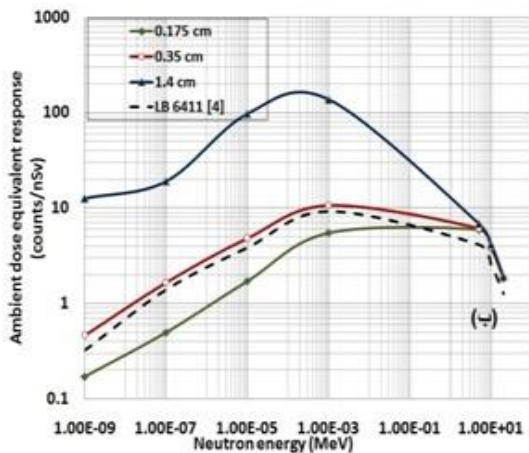
در تعریف بلوک هندسه فایل ورودی MCNPX، بر اساس شکل کروی آشکارساز، لایه پلی اتیلن و کادمیوم احاطه کننده آشکارساز نیز به صورت کروی تعریف شده است. در شکل ۲ الف، هندسه دزیمتر شبیه‌سازی شده توسط MCNPX نشان داده شده است.

تعداد اندرکنش (n,p) در شمارنده کروی ^3He بر اساس ضخامت‌های مختلف پلی اتیلن برای انرژی‌های نوترونی حرارتی تا 20 MeV محاسبه شد. بر اساس شکل ۲.ب، رفتار تابع پاسخ دز محیطی در ضخامت‌های 8 cm و بیشتر، متشابه رفتار دزیتر نوترونی LB 6411 خواهد بود انتخاب ضخامت بیشتر از 8 cm باعث افزایش وزن و حجم دزیتر نوترونی مورد طراحی، می‌شود.



شکل ۲. الف. هندسه پراب نوترونی طراحی شده توسط MCNPX. ب. تابع پاسخ دز محاسبه شده برای ضخامت‌های مختلف پلی اتیلن خارجی

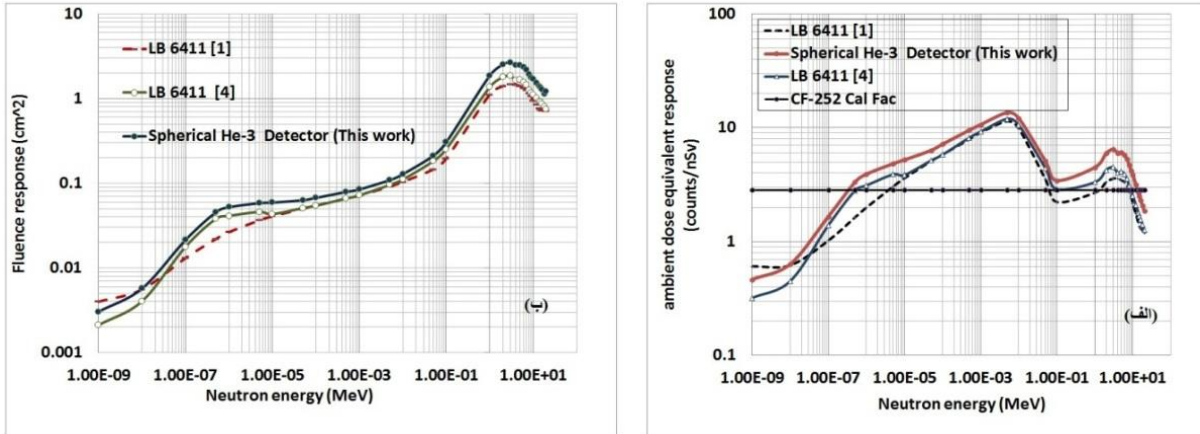
ضخامت پوسته کروی احاطه کننده آشکارساز در سه حالت مختلف مورد بررسی قرار گرفت. در شکل ۳. الف، تابع پاسخ دز معادل محیطی محاسبه شده بر اساس حالات مختلف توسط MCNPX مشاهده می‌شود. در بررسی پارامترهای بهینه، تابع پاسخ دزیتر بر اساس تعداد و شعاع حفره‌های استوانه‌ای موجود در پلی اتیلن کروی خارجی در حالت‌های مختلف محاسبه شد (شکل ۳.ب).



شکل ۳. الف. ضخامت‌های مختلف پلی اتیلن داخلی. ب. شعاع مختلف حفره‌ها



پس از بدست آوردن پارامترهای بهینه در طراحی دزیمر مورد بررسی، تابع پاسخ دز معادل محیطی و تابع پاسخ شار دزیمر نوترونی توسط MCNPX محاسبه شد (شکل ۴).



شکل ۴. الف. تابع پاسخ دز معادل محیطی محاسبه شده ب. تابع پاسخ شار محاسبه شده توسط MCNPX

بحث و نتیجه گیری

در این تحقیق، به دلیل عدم وجود آشکارساز استوانه‌ای با طول و قطر یکسان (شبه کروی) در محصولات شرکت‌های سازنده آشکارسازهای گازی مانند LND [۵] و Centronic [۶] همچنین همسانگردی بهتر آشکارسازهای کروی نسبت به آشکارسازهای استوانه‌ای، طراحی با استفاده از آشکارساز کروی انجام گردید. هرچند طراحی پلی اتیلن و لایه کادمیومی اطراف آشکارساز کروی دشوار است. در طراحی و شبیه‌سازی نهایی، ضخامت پلی اتیلن خارجی دزیمر و ضخامت پلی اتیلن احاطه کننده آشکارساز به ترتیب ۸ cm و ۱,۸۸۵ cm و همچنین شعاع ۱۲ حفره استوانه‌ای تعبیه شده از سطح کره پلی اتیلن خارجی تا سطح پلی اتیلن داخلی، ۰,۳۵ cm در نظر گرفته شد. رفتار تابع پاسخ دز معادل محیطی دزیمر نوترونی شبیه‌سازی شده مطابق شکل ۴، همخوانی بسیار خوبی با پراب نوترونی LB ۶۴۱۱ دارد. در دزیمر شبیه‌سازی شده بر اساس آشکارساز کروی ^3He ، مدل LND۲۷۰۳۶، برای انرژی‌های یکسان، تابع پاسخ نسبت به پراب LB ۶۴۱۱، عدد بزرگتری را نشان می‌دهد که این تفاوت مربوط به بزرگتر بودن حجم حساس آشکارساز کروی ^3He و بالاتر بودن فشار گاز موجود در آشکارساز نسبت به آشکارساز مورد استفاده در دزیمر نوترونی LB ۶۴۱۱ می‌باشد.



مراجع

۱. Klett. A, Burgkhardt. B. The new remcounter LB ۶۴۱۱: measurement of neutron ambient dose equivalent $H^*(10)$ according to ICRP۶۰ with high sensitivity. IEEE Transaction On Nuclear Science, ۴۴, ۷۵۷, ۱۹۹۷.
۲. Jenny Andersson, Simulation of neutron uxes around the WV-X Stellarator Department of Nuclear and Reactor Physics, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden M.Sc Thesis, ۱۹۹۹
۳. MCNPX USER'S MANUAL version ۲,۶,۰, April ۲۰۰۸
۴. علی پور زهرا؛ قربانی پرویز؛ بیات اسماعیل؛ آفریده حسین؛ دیوانی نازیلا، محاسبات مونت کارلو تابع پاسخ دز معادل محیطی و شار پراب نوترونی LB ۶۴۱۱ ، کنفرانس فیزیک ایران ۱۳۹۲
۵. <http://www.lndinc.com/products>
۶. http://www.centronic.co.uk/radiation_detectors.htm