



دزیمتری گاما و نوترون در میدان‌های تابشی آمیخته با استفاده از یک دیود سیلیسیمی

حسین ذکی‌دیزجی*^۱، فریدون عباسی دوانی^۲، طیب کاکاوند^۱

۱. گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه زنجان، صندوق پستی: ۳۱۳-۴۵۱، زنجان - ایران

۲. گروه کاربرد پرتوها، دانشکده‌ی مهندسی هسته‌ای، دانشگاه شهید بهشتی، صندوق پستی: ۱۹۸۳۹۶۳۱۱۳، تهران - ایران

چکیده: دزیمتری فعال فردی گاما و نوترون در سال‌های اخیر مورد توجه بوده است و در این میان دیودهای سیلیسیمی گزینه‌ی مناسبی برای این منظور هستند. دیودهای سیلیسیمی، حساس به گاما بوده و برای ایجاد حساسیت نوترونی در آن‌ها از یک لایه‌ی مبدل استفاده می‌شود. در این پژوهش، ابعاد بهینه‌ی مبدل و آشکارساز برای ایجاد رفتار دزیمتری مناسب و جداسازی معادل دز گاما و نوترون تعیین شده است. با توجه به طراحی دزیمتر و اعمال روش داده‌برداری گزینشی براساس ارتفاع تپ‌ها، مقدارهای معادل دز گاما و نوترون‌های سریع به صورت مجزا تعیین شدند. معادل دز گاما در بازه‌ی انرژی ۰٫۳ تا ۶ MeV و معادل دز نوترون در بازه‌ی انرژی ۱ تا ۱۲ MeV اندازه‌گیری شد. حد پایین دزیمتری برای تابش گاما و نوترون به ترتیب ۰٫۱۵ و ۱۰ μSv است. در میدان تابشی چشمه Am-Be، نتایج تجربی به دست آمده، توافق خوبی با داده‌های شبیه‌سازی داشته و خطای معادل دز گاما و نوترون به ترتیب کم‌تر از ۱۵ و ۱۸ درصد بود.

کلیدواژه‌ها: دزیمتری گاما و نوترون، دیود سیلیسیمی، میدان‌های تابشی آمیخته، لایه‌ی مبدل

Gamma and Neutron Dosimetry in Mixed Radiation Fields Using a Single Silicon Diode

H. Zaki Dizaji*¹, F. Abbasi Davani², T. Kakavand¹

1. Physics Department, Faculty of Science, Zanjan University, P.O.Box: 451-313, Zanjan - Iran

2. Radiation Application Department, Nuclear Engineering Faculty, Shahid Beheshti University, P.O.Box: 1983963113, Tehran - Iran

Abstract: During the past few years, real time gamma and neutron dosimeters have been developed and silicon diodes have frequently been used in these dosimeters. Silicon diodes are sensitive to gamma, and their neutron sensitivity is ensured with a converter layer on their front surfaces. In this study, a special converter detector design is optimized for dosimetry and determination of the neutron and gamma dose equivalent. Data analysis based on the pulse height is used for measuring the neutron and gamma dose equivalent. Neutron and gamma dose equivalent are determined in the energy range of 1-12 MeV and 0.3-6 MeV, respectively. The lower limit of dosimetry for gamma and neutron are 0.015 μSv and 10 μSv, respectively. In the ²⁴¹Am-Be source radiation, a good agreement has been observed between the calculated and experimental measurements and the errors corresponding to gamma and neutron are less than 15% and 18%, respectively.

Keywords: Gamma and Neutron Dosimetry, Silicon Diode, Mixed Radiation Fields, Converter Layer

*email: hz.dizaji@znu.ac.ir



۱. مقدمه

دزیمتری گاما و نوترون تند ارایه شد که ضمن جداسازی، مقادیر معادل دز گاما و نوترون تند را به طور مجزا تعیین می‌کند. در این روش از یک دیود سیلیسیم برای دزیمتری گاما و نوترون تند استفاده شد.

تعیین تابع پاسخ آشکارساز مستلزم محاسبه‌ی توأم فرایندهای مربوط به نوترون و ذرات باردار است. با توجه به تفاوت فیزیکی حاکم بر اندرکنش‌های گاما، نوترون و ذرات باردار و روابط حاکم بر آنها، محاسبه‌های تابع پاسخ آشکارساز تا حدودی پیچیده است. متداول‌ترین روش محاسبه‌ی تابع پاسخ آشکارساز، روش مونت کارلو است. در این پژوهش کد مونت کارلوی MCNPX ۲.۶.۰، که توانایی ترابرد تابش‌های مختلف را دارد، برای شبیه‌سازی به کار رفته است [۸].

۲. روش کار

در میدان‌های تابشی آمیخته‌ی گاما و نوترون برای اندازه‌گیری مجزای دز معادل گاما و نوترون با استفاده از یک دیود سیلیسمی باید مراحل ایجاد پاسخ دزیمتری گاما و دزیمتری نوترون و جداسازی دز معادل گاما و نوترون به طور هم‌زمان در نظر گرفته شوند. روش اتخاذ شده برای دست‌یابی به دز معادل مجزای گاما و نوترون، براساس داده‌برداری گزینشی از خروجی آشکارساز دیود سیلیسمی با توجه به ارتفاع‌تپ‌های تولید شده در آن است. فرایند برهم‌کنش و ذخیره‌ی انرژی در دیود سیلیسمی برای تابش گاما و نوترون متفاوت بوده و مشخصات‌تپ‌های تولیدی یکسان نیستند. یکی از این مشخصه‌ها ارتفاع‌تپ‌ها است که برای حصول پاسخ دزیمتری و تعیین مجزای دز معادل گاما و نوترون استفاده شده است. در داده‌برداری گزینشی براساس ارتفاع‌تپ‌ها، یک حد پایین برای حذف‌تپ‌های نوفه (E_n)، یک بازه‌ی انرژی برای پاسخ گاما (E_1-E_2) و یک حد پایین برای پاسخ نوترون (E_3) منظور شده است. روندنمای جداسازی‌تپ‌ها براساس ارتفاع آنها در شکل ۱ نشان داده شده است.

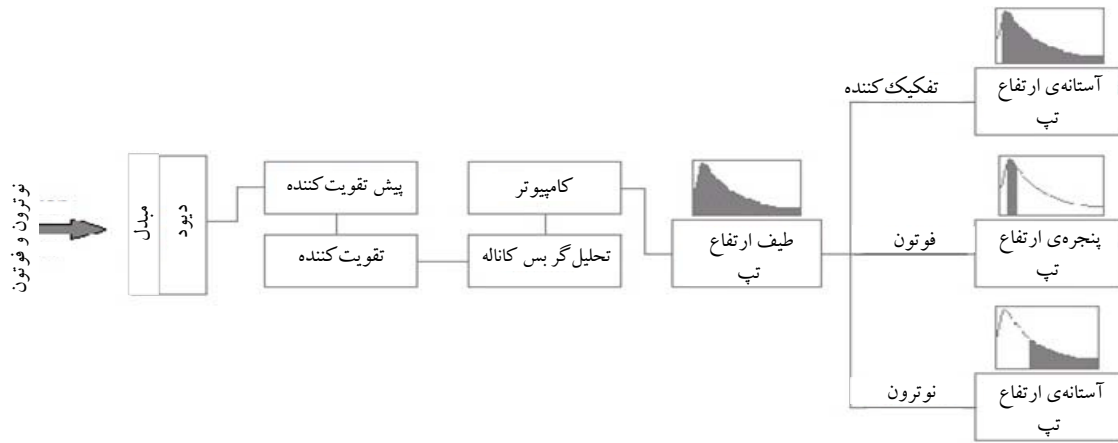
آشکارساز دیود سیلیسمی استفاده شده ($Bu-100-100-105$) ساخت شرکت اُرتک^(۱) بوده و دارای لایه‌ی مرده‌ی ۵۰nm، لایه‌ی تهی شده‌ی $100\mu m$ ، مساحت حساس $100mm^2$ و ولتاژ کاری ۵۰ ولت بود (شکل ۲).

دزیمترهای فردی را می‌توان به دو دسته‌ی فعال و غیرفعال تقسیم‌بندی کرد. در دزیمترهای غیرفعال فردی از آشکارسازهایی که توان نگه‌داری داده‌های ثبت شده برای مدت زمان طولانی را دارند استفاده می‌شود. آشکارسازهای حالت جامد ردپای هسته‌ای و گرمالیانی از مهم‌ترین گزینه‌های مورد استفاده در دزیمترهای غیرفعال هستند [۱، ۲، ۳].

با رشد و پیشرفت فن‌آوری مواد نیم‌رسانا به ویژه سیلیسیم، دزیمترهای فعال فردی گاما و نوترونی بر پایه سیلیسیم توسعه‌ی خوبی یافته و آنها به جای فیلم بچ‌های غیرفعال گاما و نوترون مورد استفاده قرار گرفته‌اند. دیودهای سیلیسمی به دلیل داشتن حجم کوچک، وزن کم، ولتاژ کاری پایین، قدرت تفکیک انرژی خوب، عملکرد ساده و سهولت حمل، بهترین ابزار برای استفاده به عنوان آشکارساز در دزیمتر فعال فردی گاما و نوترون هستند [۴، ۵].

استفاده از دیودهای نیم‌رسانا به ویژه سیلیسمی در آشکارسازی و دزیمتری تابش‌های هسته‌ای سابقه‌ی نسبتاً طولانی دارد. از دهه‌ی ۱۹۸۰ میلادی قطعات نیم‌رسانا برای آشکارسازی و دزیمتری فوتون و ذرات باردار استفاده می‌شوند. در دهه‌ی ۲۰۰۰ میلادی آشکارسازهای نیم‌رسانای آلاییده به بور و یا آشکارسازهای نیم‌رسانای همراه با لایه‌ی مبدل نوترون (مانند بور-۱۰، لیتیم-۶ و پلی‌اتیلن) برای آشکارسازی و دزیمتری نوترون استفاده شدند و در دهه‌ی ۲۰۱۰ میلادی برای دزیمتری مستقل نوترون و گاما در میدان‌های تابشی آمیخته توسعه داده شدند [۶، ۷].

با وجود مزیت‌های زیاد، برخی معایب و محدودیت‌هایی در کاربرد دیودهای سیلیسمی به عنوان دزیمترهای فعال فردی گاما و نوترون وجود دارد. در دزیمترهای فعال فردی محدودیت حجم و وزن وجود داشته و امکان استفاده‌ی کافی از لایه‌های مختلف به منظور خطی‌سازی پاسخ آشکارساز وجود ندارد. در نتیجه پاسخ دزیمتر در بازه‌ی گسترده‌ی انرژی با خطای نسبتاً زیادی همراه است. علاوه بر این، جداسازی‌تپ‌های گاما و نوترون و دزیمتری مستقل آنها نیز باید در نظر گرفته شود. در این پژوهش برای برداشتن این محدودیت، روش جدیدی برای



شکل ۱. روندنمای جداسازی تپ‌ها براساس ارتفاع آن‌ها.

۶MeV در راستای عمود بر سطح آشکارساز تابیده شده و با استفاده از تالی F۸ کد MCNPX، توزیع ارتفاع تپ‌های تولید شده در آشکارساز دیود سیلیسیم تعیین شده است. توزیع ارتفاع تپ‌های تولید شده در دیود سیلیسمی با ضخامت لایه تهی شده‌ی ۱۰۰ میکرون در شکل ۳ نشان داده شده است.

برای رسیدن به پاسخ خطی آشکارساز به انرژی، تمام تپ‌های پرتوهای گاما تولید شده در آشکارساز شمارش نمی‌شوند، بلکه تنها در یک ناحیه خاص از آن‌ها که تابع توزیع انرژی به جا مانده از الکترون‌ها در آشکارساز بیش‌ترین مقدار را دارد، شمارش انجام می‌شود (شکل ۳). شمارش‌های واقع در بازه‌ی انرژی از $E_1=120$ تا $E_2=200$ کیلو الکترون ولت، پاسخ پرتوهای گاما تلقی می‌شوند. با توجه به طیف‌های محاسبه شده مشخص می‌شود که تپ‌های گاما سهم قابل توجهی در انرژی‌های بالاتر نداشته و در نتیجه با تقریب خوبی شمارش‌های واقع در انرژی‌های بالای $E_2=600$ keV مربوط به پاسخ نوترون‌ها است.

هر چند ممکن است برخی از تپ‌های نوترون نیز در بازه‌ی انرژی مربوط به گاما قرار داشته باشند و به عنوان پاسخ گاما محسوب شوند، خطای وارده از این راه در پاسخ پرتوهای گاما ناچیز و قابل صرف نظر کردن است. بازه‌ی انرژی تعیین شده برای پاسخ گاما حدود دو درصد کل طیف انرژی است.

حساسیت آشکارساز برای تابش گاما در بازه انرژی ۰/۳ تا ۶MeV حدود ۳۳۰ شمارش بر میکروسیورت است که با فرض ۵ شمارش برای حد پایین تپ‌ها، حداقل دز قابل اندازه‌گیری برای تابش گاما ۰/۱۵ میکروسیورت می‌شود.



شکل ۲. تصویر آشکارساز سیلیسمی.

۱.۲ پاسخ دزیمتری گاما

دیود سیلیسمی به صورت ذاتی برای تابش گاما حساس بوده و این حساسیت با افزایش انرژی کاهش می‌یابد. برای کاربرد این آشکارساز در دزیمتری گاما از یک لایه‌ی جبران کننده استفاده می‌شود تا روند کاهش حساسیت با افزایش انرژی گاما را جبران کند. در روش ارائه شده برای خطی سازی تابع پاسخ آشکارساز نسبت به تابش گاما به جای اضافه کردن قطعه‌ی سخت‌افزاری (لایه‌ی جبران کننده) از فرایند نرم‌افزاری (داده‌برداری گزینشی) استفاده شده است.

پرتوهای گاما با خارج نمودن الکترون‌ها از مدارهای الکترونی در آشکارساز انرژی بر جای می‌گذارند. لایه تهی شده‌ی دیود حجم کوچکی داشته و در نتیجه انرژی به جا مانده در آن تنها بخشی از انرژی الکترون‌ها تا چند صد کیلو الکترون ولت است و از این رو تپ‌های حاصل از گاما ارتفاع کمی دارند. تابع پاسخ آشکارساز برای تابش گاما با انرژی‌های مختلف حالت نزولی داشته و شکل دقیق آن به انرژی تابش و ضخامت لایه‌ی تهی شده‌ی دیود بستگی دارد. پرتوهای گاما با انرژی‌های ۰/۱ تا



این رابطه می‌تواند به شکل ماتریس بازنویسی شود

$$DE = \Phi K \quad (2)$$

که در آن‌ها، DE دز معادل، Φ شار و K تابع تبدیل شار به دز معادل است. خروجی آشکارساز به صورت زیر با حاصل ضرب شار و تابع پاسخ آشکارساز تعیین می‌شود.

$$M = \Phi R \quad (3)$$

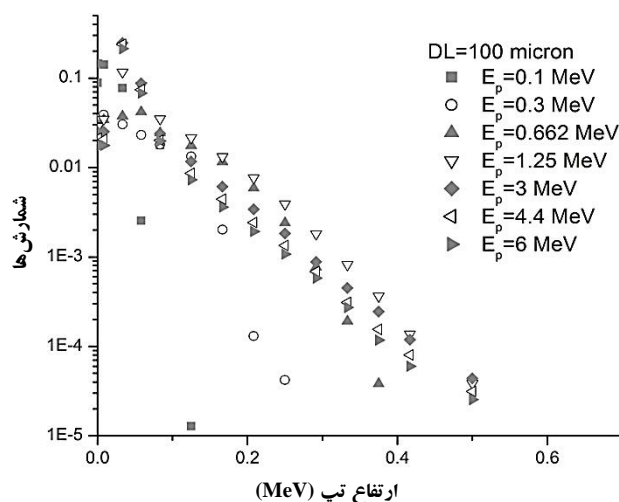
که در آن، M خروجی آشکارساز و R تابع پاسخ آشکارساز است. اگر تابع پاسخ آشکارساز متناسب با ضریب‌های تبدیل شار به دز معادل باشد، با استفاده از ضریب ثابت α تناسب مذکور به تساوی $R = \alpha K$ تبدیل می‌شود. با استفاده از رابطه‌های (۲) و (۳) خروجی آشکارساز متناسب با دز معادل می‌شود.

$$M = \Phi R = \Phi(\alpha K) = \alpha \Phi K = \alpha DE \quad (4)$$

α ضریب ثابتی است که از شبیه‌سازی به دست می‌آید. با استفاده از رابطه‌ی (۴) دز معادل نوترون از روی مقادیر به دست آمده از خروجی آشکارساز تعیین می‌شود.

۳. محاسبه‌ی ضخامت بهینه‌ی مبدل نوترون

آشکارساز سیلیسیم همراه با لایه‌ی مبدل پلی‌اتیلن جلوی تابش نوترون قرار داده شد. راستای تابش عمود بر سطح آشکارساز بود و لایه‌ی مبدل (پلی‌اتیلن) به ضخامت‌های ۰٫۰۵ تا ۴ میلی‌متر جلوی آشکارساز قرار داشت. با استفاده از تالی $F8$ کد $MCNPX$ ، تپ‌های تولید شده در آشکارساز و تأثیر ضخامت‌های مختلف لایه‌ی مبدل بر خروجی آشکارساز در انرژی‌های مختلف محاسبه شد. نتایج به دست آمده برای خروجی آشکارساز و تابع تبدیل شار به دز معادل استاندارد دزیمتری $ICRP-60$ در شکل ۴ نشان داده شده است [۹]. از نتایج شبیه‌سازی ملاحظه می‌شود که در ضخامت‌های حدود ۱۰۰ میکرون، رفتار تابع پاسخ آشکارساز شبیه تابع تبدیل شار به دز معادل نوترون است. بنابراین با انتخاب ضخامت بهینه‌ی ۱۰۰ میکرون برای لایه‌ی مبدل، رفتار تابع پاسخ آشکارساز تا حدودی متناسب با رفتار ضریب‌های تبدیل می‌شود.



شکل ۳. توزیع ارتفاع تپ‌های تولید شده از تابش گاما با انرژی‌های مختلف.

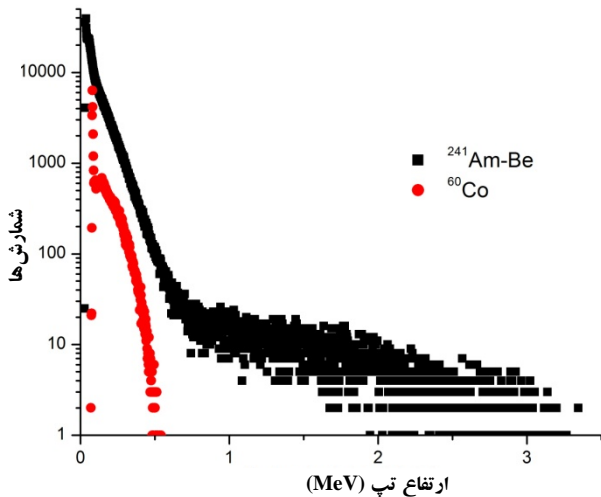
۲.۲ پاسخ دزیمتری نوترون

دیویدهای سیلیسیم برای ذرات باردار از حساسیت بسیار بالا و برای نوترون از حساسیت ناچیز برخوردارند. لایه‌ای از پلی‌اتیلن به عنوان مبدل نوترون تند جلوی دیود قرار می‌گیرد تا حساسیت نوترونی ایجاد شود. برخورد نوترون با لایه‌ی مبدل و پراکندگی کشسان آن از هسته‌های عناصر تشکیل‌دهنده‌ی مبدل، به ویژه هیدروژن، منجر به تولید پروتون‌های پس‌زن می‌شود. پروتون‌های پس‌زن با عبور از ضخامت باقی‌مانده‌ی لایه‌ی مبدل و نفوذ در آشکارساز، ثبت شده و تولید علامت می‌نمایند. ضخامت بهینه‌ی لایه‌ی مبدل و مشخصات بهینه‌ی دیود به منظور دست‌یابی به حساسیت بالا و رفتار دزیمتری مناسب با استفاده از شبیه‌سازی تعیین می‌شود.

برای دزیمتری نوترون از تابع (ضریب‌های) تبدیل شار به دز معادل استفاده می‌شود. تابع تبدیل شار به دز معادل تابع انرژی است. با استفاده از روش‌های سخت‌افزاری و یا نرم‌افزاری سعی می‌شود تابع پاسخ آشکارساز متناسب با تابع تبدیل شار به دز معادل شود. در یک دزیمتر آرمانی، تابع پاسخ آشکارساز مساوی تابع تبدیل شار به دز معادل است.

حاصل ضرب شار تابش در تابع تبدیل شار به دز معادل، مقدار دز معادل را نشان می‌دهد. بنابراین اگر تابع پاسخ آشکارساز با تابع تبدیل شار به دز معادل شبیه و یا یکسان شود، می‌توان خروجی آشکارساز را برای دزیمتری به کار برد. دز معادل برای یک شار نوترون این است

$$DE = \int_{E_{min}}^{E_{max}} \Phi(E) K(E) dE \quad (1)$$



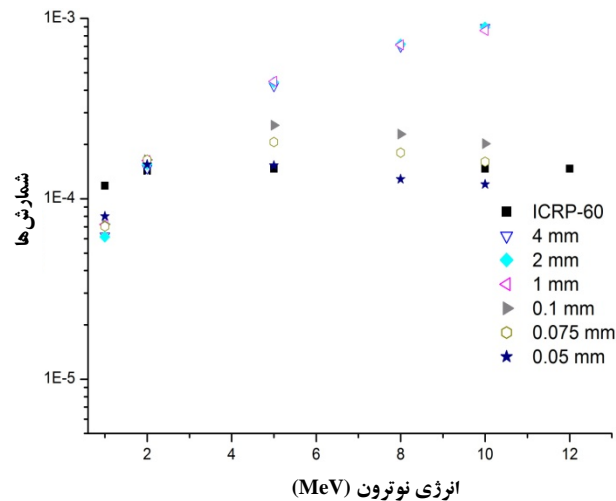
شکل ۵. طیف‌های انرژی به دست آمده برای تابش چشمه $Am-Be$ و چشمه ^{60}Co .

آن‌ها با انرژی $5/485 MeV$ در مقایسه با بقیه از شدت بیش‌تری برخوردار است. تب‌های حاصل از ذرات آلفا با این انرژی در کانال شماره ۱۰۹۷ قرار داشت. بنابراین انرژی معادل هر کانال ۵ کیلو الکترون ولت تعیین شد.

شمارش‌های واقع در انرژی‌های پایین‌تر از $E_0 = 100 keV$ به عنوان نوفه حذف شدند. این عمل با انتخاب حد پایین تفکیک‌کننده (LLD) انجام شد. شمارش‌ها در بازه‌ی انرژی $E_1 = 120$ تا $E_2 = 200$ کیلو الکترون ولت از آن پرتوهای گاما و شمارش‌های واقع در انرژی‌های بالای $E_3 = 600 keV$ مربوط به نوترون‌ها در نظر گرفته شد. با توجه به طیف به دست آمده برای چشمه‌ی گاما گسیل ^{60}Co مشخص شد که بازه‌های انرژی تعیین شده به وسیله‌ی شبیه‌سازی برای پاسخ گاما و نوترون مناسب بوده است.

دزیمتر در فواصل مختلف از چشمه‌ی آمرسیم-بریلیم و در معرض تابش‌های نوترون و گامای آن با شدت و دزهای متفاوت قرار گرفت. مقادیر تجربی دز معادل نوترون و گاما اندازه‌گیری شد. این مقادیر تجربی دز معادل با مقادیر شبیه‌سازی مقایسه شد. نتایج در شکل ۶ نشان داده شده است.

در بخش شبیه‌سازی، برای طیف انرژی نوترون و گامای چشمه‌ی $^{241}Am-Be$ ، به ترتیب، از مرجع‌های [۱۰] و [۱۱] و برای محاسبه‌ی دز معادل از تالی DE و DF کد MCNPX استفاده شد. مقدار خطای نتایج تجربی برحسب داده‌های شبیه‌سازی محاسبه شد. مقدار بیشینه و کمینه‌ی خطا برای دز معادل گاما، به ترتیب، ۲ و ۱۵ و برای دز معادل نوترون، به ترتیب، ۷ و ۱۸ درصد بود.



شکل ۴. تغییرات خروجی آشکارساز برحسب ضخامت لایه‌ی مبدل و مقایسه‌ی آن با تابع تبدیل شار به دز معادل.

با به کارگیری مبدل (پلی اتیلن) به ضخامت ۱۰۰ میکرون، حساسیت آشکارساز برای نوترون در بازه‌ی انرژی ۱ تا $12 MeV$ حدود ۰/۵ شمارش بر میکروسیورت است که با فرض ۵ شمارش برای حد پایین تب‌ها، دز کمینه‌ی قابل اندازه‌گیری برای تابش نوترون ۱۰ میکروسیورت می‌شود.

۴. آزمایش تجربی و نتایج آن

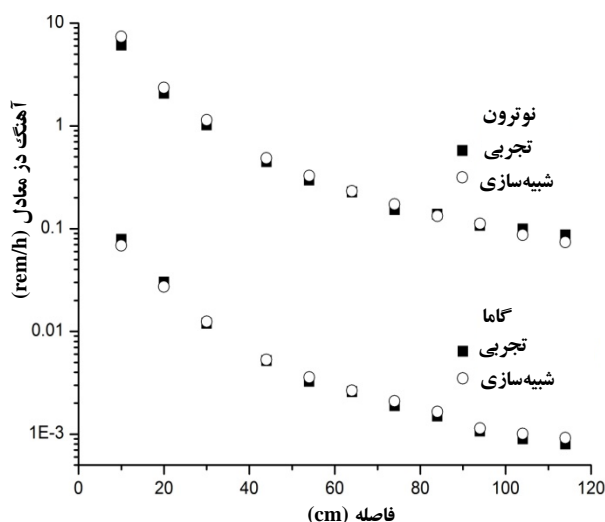
سیستم آشکارساز برای تقویت و پردازش تب‌ها به الکترونیک هسته‌ای مناسب شامل منبع تغذیه‌ی $IAP8100$ ، تقویت‌کننده‌ی $IAP3600$ ، پیش تقویت‌کننده‌ی $IAP3002$ ، مبدل قیاسی به رقمی و تحلیل‌گر $IAP4110$ تجهیز شد. چشمه‌ی رادیوایزوتوپی $^{241}Am-Be$ با قدرت ۲۰ کوری، قطر $40/2$ میلی‌متر و ارتفاع $137/20$ میلی‌متر برای پرتودهی دزیمتر استفاده شد. این چشمه دارای تابش نوترون و گاما است. میزان نوترون‌دهی و گامادهی چشمه‌های آمرسیم-بریلیم با توجه به قدرت آن‌ها تعیین می‌شود. طیف انرژی تابش نوترون و گامای چشمه‌ی آمرسیم-بریلیم اندازه‌گیری و همراه با طیف انرژی حاصل از تابش گامای ^{60}Co در شکل ۵ نشان داده شده است.

برای به دست آوردن طیف انرژی با استفاده از تحلیل‌گر بس کاناله باید مقیاس‌بندی انرژی انجام می‌شد تا انرژی معادل کانال‌های تحلیل‌گر تعیین شود. برای این منظور، ابتدا 2048 کانال برای توزیع تب‌های خروجی از آشکارساز انتخاب و چشمه‌ی آلفازای ^{241}Am برای مقیاس‌بندی انرژی استفاده شد. آمرسیم 241 ، گروه‌های مختلف آلفا گسیل می‌کند که مهم‌ترین



مرجع‌ها

1. S.A. Durrani, R.K. Bull, Solid state nuclear track detection principles methods and applications, Pergamon Press (1987).
2. H. Zaki Dizaji, M. Shahriari, G.R. Etaati, Monte Carlo Calculation of CR-39 efficiency for fast neutron detection using a combination of MCNP and SRIM codes, and comparison with experimental results, Radiat. Meas. 42 (2007) 1332-1334.
3. G.F. Knoll, Radiotlon detection and measurement, John Wiley Press (1989).
4. T. Nunomiya, S. Abe, K. Aoyama, T. Nakamura, Development of advanced-type multi-functional electronic personal dosimeter, Radiat. Prot. Dosim. 126 (2007) 284-287.
5. M. Wielunski, R. Schutz, E. Fantuzzi, A. Pagnamenta, W. Wahl, J. Palfalvi, P. Zombori, A. Andrasi, H. Stadtmann, Ch. Schmitzer, Study of the sensitivity of neutron sensors consisting of a converter plus Si charged-particle detector, Nucl. Instr. and Meth. A, 517 (2004) 240-253.
6. K.A. Alyousef, A Novel Approach to mixed field dosimetry utilizing prototype silicon based P-I-N diodes, the thesis for the degree of doctor of philosophy, Wayne state university, Detroit, Michigan (2006).
7. C. Guardiola, C. Fleta, D. Quirion, J. Rodriguez, M. Lozano, F. Teixidor, C. Vinas, A.R. Popescu, C. Domongo, K. Amgarou, First investigations of a silicon neutron detector with a carborane converter, J. Instrum, 6 (2011).
8. Denise B. Pelowitz, Monte Carlo N-Particle Transport Code System for Multiparticle and High Energy Applications, Version 2.6.0, OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY, (2008).
9. The International Commission on Radiological Protection, 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 60, Annals of the ICRP, 21 (1991) 1-3.
10. ISO 8529-1, Reference Neutron Radiations. Part 1: Characteristics and methods of production. International Organization for Standardization (2001).
11. H.R. Vega-Carrillo, E. Manzanares-Acuna, A.M. Becerra-Ferreiro, A. Carrillo-Nunez, Neutron and gamma-ray spectra of $^{239}\text{PuBe}$ and $^{241}\text{AmBe}$, Appl. Radiat. Isotopes, 57 (2002) 167-170.



شکل ۶. تغییرات آهنگ دز معادل با فاصله‌ی دزیمتر از چشمه.

۵. نتیجه‌گیری

انتخاب ضخامت بهینه‌ی لایه‌ی میدل (پلی اتیلن) برای رسیدن به پاسخ مناسب برای دزیمتری نوترون مهم است. انتخاب ضخامت لایه‌ی تهی دیود برای به دست آوردن پاسخ مناسب برای دزیمتری گاما و هم‌چنین برای بالا بردن دقت جداسازی دز گاما و نوترون تند بسیار مهم و تأثیرگذار است.

با توجه به نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی و آزمایش تجربی مشخص شد که روش ارائه شده برای دزیمتری گاما و نوترون تند در میدان‌های تابشی آمیخته، مناسب و قابل استفاده است. خطای مقادیر دز معادل اندازه‌گیری شده برای گاما و نوترون چشمه‌ی $^{241}\text{Am-Be}$ ، به ترتیب، کم‌تر از ۱۵ و ۱۸ درصد بود. در این روش، بازه‌ی انرژی گاما ۰٫۳ تا ۶ MeV و نوترون ۱ تا ۱۲ MeV است. دز کمینه‌ی قابل اندازه‌گیری برای تابش گاما و نوترون، به ترتیب، ۰٫۱۵ و ۱۰ میکروسیورت بود.

روش ارائه شده، قابل پیاده‌سازی در دزیمتر فعال فردی گاما و نوترون بوده و می‌تواند برای اندازه‌گیری دز معادل گاما و نوترون تند در میدان‌های تابشی آمیخته و غیرآمیخته‌ی نوترون و گاما به کار برده شود.

پی‌نوشت

۱. Ortec

