

بهینه‌سازی پاسخ دزیمتری نوترون در بازه انرژی حرارتی و سریع برای آشکارساز دیودی

حسین ذکی دیزجی^{۱*}، فریدون عباسی دوانی^۲ و طیب کاکاوند^۳

^۱ گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه جامع امام حسین(ع)، تهران، ایران.

^۲ گروه کاربرد پرتوها، دانشکده مهندسی هسته‌ای، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

^۳ گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی، قزوین، ایران.

* تهران، اتوبان شهید بابایی، دانشگاه جامع امام حسین(ع)، دانشکده علوم پایه، گروه فیزیک، صندوق پستی: ۱۶۵۷۵-۳۴۷

پست الکترونیکی: hz.dizaji@yahoo.com

چکیده

دزیمتری فعال فردی گاما و نوترون در سال‌های اخیر مورد توجه بوده‌اند و از این میان، دیودهای نیمه‌هادی گزینه مناسبی برای این منظور هستند. دیودهای نیمه‌هادی برای آشکارسازی ذرات باردار استفاده می‌شوند و برای ایجاد حساسیت نوترونی در آن‌ها از یک لایه مبدل استفاده می‌شود. نوترون‌ها با انجام واکنش در مبدل نوترون، ذرات باردار ثانویه تولید می‌کنند. این ذرات باردار ثانویه با رسیدن به آشکارساز ثبت می‌شوند. برای پوشش دادن به بازه انرژی حرارتی و سریع، یک آشکارساز دیود سیلیکونی به‌همراه مبدل نوترون حرارتی (${}^6\text{LiF}$) و مبدل نوترون سریع (پلی اتیلن) به‌کار برده شده است. پاسخ آشکارساز برای تابش نوترون تحت تأثیر مبدل نوترون بوده و با ایجاد تغییر در مشخصات مبدل نوترون، تابع پاسخ آشکارسازی به‌منظور دست‌یابی به پاسخ دزیمتری نوترون در انرژی‌های مختلف تنظیم شده است. برای دست‌یابی به پاسخ دزیمتری مناسب در بازه گسترده انرژی $15\text{ MeV} - 0.1\text{ eV}$ ، ضخامت بهینه مبدل نوترون حرارتی و سریع به ترتیب ۴ میکرون و یک میلی‌متر تعیین شده است. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که پاسخ دزیمتری برحسب انرژی نوترون تا حدودی مناسب بوده و میزان انحراف آن در بازه گسترده انرژی، قابل قبول است.

کلیدواژه‌گان: دزیمتر فعال فردی، دزیمتری نوترون، آشکارساز دیودی، پروتون پس‌زده، مبدل نوترون.

۱. مقدمه

مواد آشکارسازی ممکن است یکی بوده یا به‌صورت شیمیایی با یکدیگر ترکیب شده یا به‌صورت فیزیکی با یکدیگر مخلوط گردیده و تداخلی در فرایند آشکارسازی به‌وجود نمی‌آید. در برخی دیگر از آشکارسازهای نوترونی، مواد مبدل نوترونی و مواد آشکارسازی به‌صورت جدا از یکدیگر بوده و امکان ترکیب و مخلوط شدن نیز ندارند. در این حالت، مواد مبدل نوترونی و مواد آشکارسازی دارای فضای کاملاً مجزایی بوده و به‌صورت فیزیکی کنار هم قرار می‌گیرند. در این صورت، تابع پاسخ آشکارساز تابع مشخصات مبدل نوترون می‌شود. دیودهای نیمه‌هادی همراه با یک لایه از مبدل نوترون برای آشکارسازی و دزیمتری نوترون استفاده می‌شوند [۲ و ۳]. هرچند جدا بودن فضای حاوی مواد مبدل نوترون و مواد آشکارسازی، باعث

آشکارسازی تابش‌های هسته‌ای اغلب از طریق فرایندهای یونش و برانگیزش صورت می‌گیرد. یونش و برانگیزش در نتیجه اندرکنش‌های ذرات باردار با اجزای مواد آشکارسازی انجام می‌گیرد. فرایند آشکارسازی نوترون‌ها نسبت به بقیه تابش‌های هسته‌ای تا حدودی طولانی‌تر و پیچیده‌تر است. نوترون‌ها به‌دلیل خشی بودن، قادر به ایجاد یونش و برانگیزش مستقیم نبوده و از طریق واکنش‌های هسته‌ای واسطه و تولید ذرات باردار ثانویه آشکار می‌شوند. واکنش‌های واسطه و تولید ذرات باردار ثانویه در مواد مبدل نوترونی صورت می‌گیرد [۱]. در برخی از آشکارسازهای نوترونی، مواد مبدل نوترونی و

تعیین تابع پاسخ آشکارساز مستلزم محاسبه توام فرایندهای مربوط به نوترون و ذرات باردار است. متداولترین روش محاسبه تابع پاسخ آشکارساز، روش مونت کارلو است. در این پژوهش، کد مونت کارلو MCNPX2.6.0 که توانایی ترابرد تابش‌های مختلف را دارد، برای شبیه‌سازی به‌کار رفته است [۸].

۲. روش کار

میزان حساسیت دیوده‌های سیلیکونی برای ذرات باردار صدرصد، برای نوترون‌های سریع ناچیز و برای نوترون‌های حرارتی صفر است. لایه پلی‌اتیلن و لیتیم فلوراید به‌عنوان مبدل نوترون‌های سریع و حرارتی جلوی دیود قرار داده شده تا حساسیت نوترون ایجاد گردد. نوترون‌ها با عناصر لایه مبدل برخورد کرده و با انجام واکنش هسته‌ای با ایزوتوپ‌های عناصر تشکیل‌دهنده لایه مبدل، منجر به تولید ذرات باردار می‌شوند. ذرات باردار تولیدی با عبور از ضخامت باقیمانده لایه مبدل و نفوذ در آشکارساز ثبت شده و علامت تولید می‌کنند.

۱.۲. استفاده از تابع تبدیل شار به معادل دز

برای دزیمتری نوترون‌ها از تابع (ضرایب) تبدیل شار به معادل دز استفاده می‌شود. این تابع تبدیل شار نوترون به معادل دز نوترون تابع انرژی است. در فرایند دزیمتری سعی می‌شود با استفاده از روش‌های سخت‌افزاری و یا نرم‌افزاری تابع پاسخ آشکارساز متناسب با تابع تبدیل شار به معادل دز گردد. در یک دزیمتر ایدئال، تابع پاسخ آشکارساز مساوی تابع تبدیل شار به معادل دز است.

حاصل ضرب شار تابش در تابع تبدیل شار به معادل دز مقدار معادل دز را نشان می‌دهد؛ بنابراین، اگر تغییرات تابع پاسخ آشکارساز برحسب انرژی، مشابه یا یکسان با تابع تبدیل شار به معادل دز گردد، می‌توان خروجی آشکارساز را برای دزیمتری به‌کار برد. معادل دز برای یک شار نوترون به‌صورت زیر است:

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

این رابطه را می‌توان به شکل ماتریس بازنویسی کرد:

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

محدودیت هندسی مبدل نوترونی شده و بازدهی آشکارساز نوترون را تحت تأثیر قرار می‌دهد، این امکان را فراهم می‌کند که با ایجاد تغییر در مبدل نوترون، می‌توان تابع پاسخ آشکارسازی را به‌منظور دستیابی به پاسخ دزیمتری نوترون در انرژی‌های مختلف تا حدودی تنظیم کرد [۴-۶].

با رشد و توسعه فناوری مواد نیم‌رسانا به‌ویژه سیلیکون، دزیمترهای فعال فردی گاما و نوترون بر پایه سیلیکون، توسعه خوبی یافته و استفاده از آن‌ها به‌جای فیلم بچ‌های غیرفعال مورد توجه قرار گرفته‌اند. دیوده‌های سیلیکونی به‌دلیل داشتن حجم کوچک، وزن کم، ولتاژ کاری پایین، قدرت تفکیک انرژی خوب، عملکرد ساده و سهولت حمل، بهترین ابزار برای استفاده به‌عنوان آشکارساز در دزیمتر فعال فردی گاما و نوترون هستند [۴ و ۷].

استفاده از دیوده‌های نیمه‌هادی به‌ویژه سیلیکون در آشکارسازی و دزیمتری تابش‌های هسته‌ای، سابقه نسبتاً طولانی دارد. از دهه ۱۹۸۰ میلادی قطعات نیمه‌هادی برای آشکارسازی و دزیمتری فوتون و ذرات باردار استفاده می‌شوند. در دهه ۲۰۰۰ میلادی از آشکارسازهای نیمه‌هادی آلاییده به‌بور یا آشکارسازهای نیمه‌هادی، به‌همراه لایه مبدل نوترون (مانند بور ۱۰، لیتیم ۶ و پلی‌اتیلن) برای آشکارسازی و دزیمتری نوترون استفاده شدند و در دهه ۲۰۱۰ میلادی برای دزیمتری نوترون و گاما در میدان‌های تابشی آمیخته توسعه داده شدند [۵ و ۶].

با وجود مزیت‌های زیاد، برخی معایب و محدودیت‌هایی در کاربرد دیوده‌های سیلیکونی به‌عنوان دزیمترهای فعال فردی نوترون وجود دارد. در دزیمترهای فعال فردی محدودیت حجم و وزن وجود داشته و امکان استفاده کافی از لایه‌های مختلف به‌منظور ایجاد پاسخ دزیمتری مناسب وجود ندارد. در نتیجه، پاسخ دزیمتری در بازه گسترده انرژی با خطای نسبتاً زیادی همراه است. در این پژوهش برای رفع این محدودیت، از ساختارهای چند لایه‌ای برای مبدل نوترون استفاده شده است تا پاسخ دزیمتری نوترون برحسب انرژی بهبود یابد. ساختار چند لایه‌ای شامل مبدل نوترون حرارتی و سریع و همچنین جبران‌کننده به‌همراه یک دیود سیلیکونی برای آشکارساز و دزیمتری نوترون‌های حرارتی و سریع به‌کار برده شده است.

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

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

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

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

۳. پاسخ نوترون

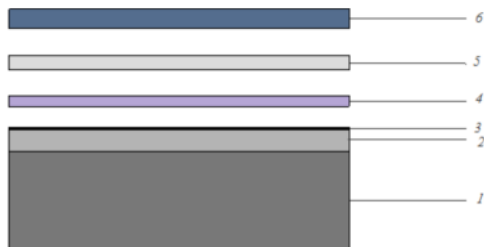
ضریب ثابتی بوده و از شبیه‌سازی به دست می‌آید. با استفاده از رابطه (۴) معادل دز نوترون از روی مقادیر به دست آمده از خروجی آشکارساز تعیین می‌شود. در آشکارساز دیود سیلیکونی، انرژی ذخیره شده از ذرات فرودی به پالس تبدیل شده و خروجی آشکارساز پالس است که براساس رویه خاصی تعداد این پالس‌ها شمارش می‌شوند. شمارش‌های انجام گرفته برای نوترون در یک ضریب ثابت (ضریب کالیبراسیون) ضرب شده تا مقدار معادل دز تابش نوترون به دست آید. در فرایند کالیبراسیون، مقدار این ضریب ثابت طوری تعیین می‌شود که در کل بازه انرژی نوترون‌ها قابل استفاده بوده و مقدار خطا در کل بازه انرژی کمینه گردد.

۲.۲. ضخامت بهینه مبدل نوترون

نوترون‌های سریع از طریق هسته‌های (به‌ویژه پروتون‌های) پس‌زده حاصل از پراکندگی نوترون در لایه مبدل سریع (پلی اتیلن) و نوترون‌های حرارتی از طریق ذرات باردار تولید شده از واکنش هسته‌ای نوترون با لیتیم ۶ در لایه مبدل حرارتی (${}^6\text{LiF}$) در آشکارساز دیودی ثبت می‌شوند. مسیر و روند ثبت نوترون‌ها در آشکارساز وابسته به انرژی آن‌هاست. بنابراین، پاسخ نوترون‌های حرارتی برای ترکیب آشکارساز و مبدل حرارتی و پاسخ نوترون‌های سریع برای ترکیب آشکارساز و مبدل سریع به صورت جداگانه تعیین شده است. سپس با اضافه کردن لایه جبران‌کننده به لایه‌های مبدل نوترون، پاسخ نوترون‌های حرارتی و سریع تلفیق گردیده است.

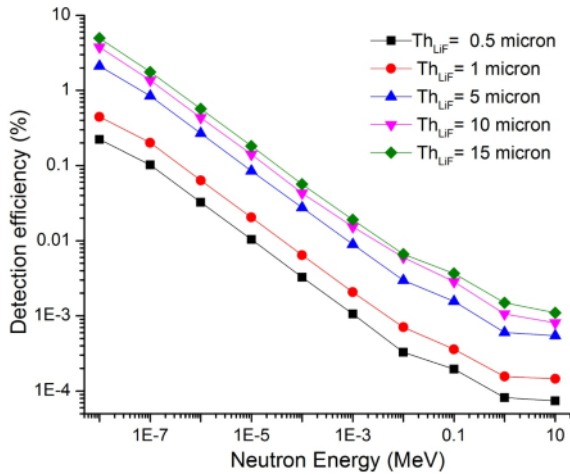
آشکارسازی و دزیمتری دو مقوله متفاوتی بوده و ضخامت بهینه لایه مبدل برای آشکارسازی و دزیمتری یکسان نیستند. ضخامت بهینه لایه مبدل نوترون برای آشکارسازی به منظور رسیدن به بیشترین مقدار بازدهی آشکارساز انتخاب می‌شود، در حالی که ضخامت بهینه لایه مبدل نوترون برای دزیمتری به منظور دستیابی به بهترین پاسخ دزیمتری نوترون‌ها در یک بازه انرژی انتخاب می‌گردد. با توجه به اینکه هدف اصلی این پژوهش، دزیمتری نوترون بوده، انتخاب ضخامت بهینه لایه‌های مبدل نوترون به منظور رسیدن به پاسخ دزیمتری مناسب انجام می‌گیرد.

آشکارساز سیلیکون همراه با لایه‌های مختلف مبدل نوترون در معرض تابش نوترون قرار داده شده است. با استفاده از تالی



شکل ۱: طرح‌واره دزیمتر ۱. ویفر ۲. لایه تهی شده ۳. لایه مرده ۴. مبدل حرارتی ۵. مبدل سریع ۶. لایه جبران‌کننده

با افزایش انرژی نوترون مقدار بازده آشکارسازی کاهش می‌یابد. تغییرات بازده آشکارسازی برحسب انرژی نوترون و ضخامت لایه مبدل حرارتی شبیه‌سازی شده و نتایج برای ضخامت‌های $0.5-15 \mu\text{m}$ مبدل نوترون حرارتی و انرژی‌های $0.1-10 \text{ MeV}$ در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳: تغییرات بازده آشکارسازی برحسب انرژی نوترون برای دو ضخامت مبدل نوترون حرارتی برای ${}^6\text{LiF}$

بازدهی آشکارساز با ضخامت لایه ${}^6\text{LiF}$ ارتباط مستقیم و با انرژی نوترون ارتباط عکس دارد. روند کاهش بازدهی آشکارساز با افزایش انرژی نوترون برای ضخامت‌های مختلف لایه ${}^6\text{LiF}$ یکسان است. منحنی تغییرات بازدهی آشکارساز برحسب افزایش انرژی نوترون در ناحیه انرژی $1 \text{ MeV} - 10 \text{ eV}$ در شکل نزولی دارد. این تغییرات در ناحیه $10 - 1 \text{ MeV}$ ناچیز است.

انتخاب ضخامت بهینه به‌منظور دستیابی به پاسخ دزیمتری مناسب نوترون‌های حرارتی در کنار نوترون‌های سریع انجام می‌گیرد.

۲.۳. پاسخ نوترون سریع

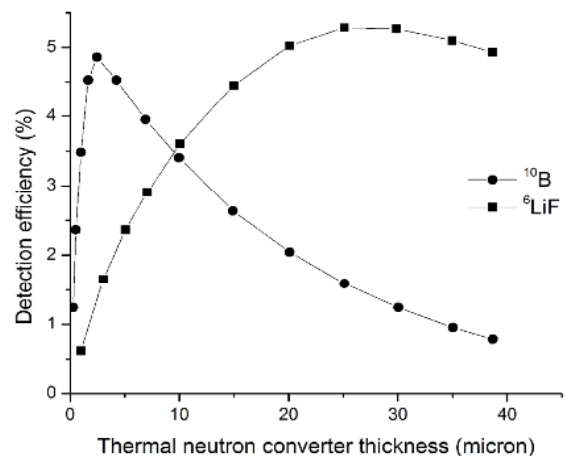
برای آشکارسازی و دزیمتری نوترون‌های سریع یک لایه پلی‌اتیلن جلوی آشکارساز بین‌دیود قرار داده شده و در معرض تابش نوترون‌های تک انرژی در راستای عمود بر سطح آشکارساز قرار می‌گیرد. بازدهی آشکارسازی در انرژی‌های مختلف برحسب ضخامت لایه مبدل نوترون سریع محاسبه شده است. تغییرات بازدهی آشکارساز برحسب ضخامت لایه

مقدار آستانه انرژی برای ارتفاع پالس‌های تولیدشده 0.5 MeV بوده و پالس‌های بزرگ‌تر از آن شمارش شده است. تعداد پالس‌های تولیدشده در حجم تهی‌شده دیود شمارش شده و به‌ازای یک نوترون ورودی به‌عنوان بازدهی آشکارساز تعریف شده است.

۱.۳. پاسخ نوترون حرارتی

مبدل حرارتی جلوی آشکارساز دیود قرار گرفته و مجموعه در معرض تابش نوترون‌های حرارتی قرار داده شده است. بازدهی آشکارسازی برحسب ضخامت لایه مبدل نوترون حرارتی برای لیتیم فلوراید و بور ۱۰ محاسبه شده و نتایج در شکل ۲ نشان داده شده است. هر دو نوع از مبدل‌ها یک ضخامت بهینه را نشان می‌دهند که در آن، بازدهی آشکارساز بیشترین مقدار را دارد. بیشترین مقدار بازدهی آشکارساز حدود ۵ درصد برای هر دو نوع مبدل است.

برد محصولات حاصل از واکنش نوترون حرارتی با بور ۱۰ کوتاه‌تر بوده و برای استفاده از آن در مبدل نوترون حرارتی، ظرافت و دقت بالایی لازم است. محصولات واکنش نوترون حرارتی با لیتیم ۶ سبک‌تر بوده و برد قابل توجهی دارند. بنابراین، لیتیم فلوراید برای مبدل حرارتی انتخاب شده است.



شکل ۲: وابستگی بازده آشکارسازی نوترون حرارتی برحسب ضخامت مبدل نوترون برای ${}^{10}\text{B}$ و ${}^6\text{LiF}$

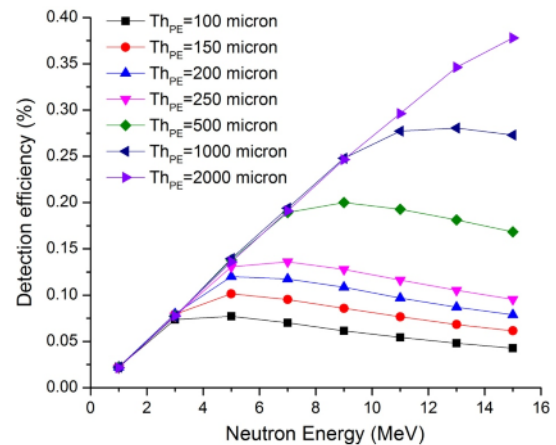
بازدهی آشکارساز به ضخامت لایه مبدل و انرژی نوترون وابسته است. برای ضخامت‌های مختلف مبدل حرارتی، بیشترین مقدار بازده آشکارسازی در انرژی‌های پایین بوده و

انرژی نوترون‌ها، رفتار دزیمتری مناسب وجود داشته باشد. حساسیت ترکیب آشکارساز دیود و مبدل ${}^6\text{LiF}$ به نوترون‌های حرارتی به مراتب بیشتر از حساسیت ترکیب آشکارساز دیود و مبدل پلی اتیلن به نوترون‌های سریع است، درحالی‌که ضریب تبدیل شار نوترون به معادل دز با انرژی نوترون رابطه مستقیم داشته و مقدار معادل دز به ازای یک واحد از شار نوترون، در انرژی‌های سریع بیشتر از انرژی‌های حرارتی است. بنابراین، برای دستیابی به پاسخ دزیمتری نوترون در بازه انرژی حرارتی تا سریع، از حساسیت نوترون حرارتی به نفع نوترون سریع تعدیل می‌شود تا مقدار حساسیت آشکارساز نسبت به نوترون در انرژی‌های حرارتی کمتر از انرژی‌های سریع شده و تا حد امکان وابستگی حساسیت آشکارساز به انرژی نوترون، متناسب با وابستگی ضرایب تبدیل شار نوترون به معادل دز به انرژی نوترون گردد. برای این منظور، ضخامت لایه مبدل حرارتی کمتر شده تا حساسیت نوترون‌های حرارتی کاسته شده و با ضرایب تبدیل شار نوترون به معادل دز هم‌خوانی داشته باشد.

بازدهی آشکارساز در ضخامت یک میلی‌متر لایه پلی اتیلن برای نوترون‌های سریع (7 MeV) حدود 0.7 درصد است. با توجه به نسبت 40 برابری مقدار ضریب تبدیل شار به معادل دز در انرژی سریع و حرارتی، حساسیت نوترون‌های سریع می‌بایست 40 برابر نوترون‌های حرارتی شود. برای دستیابی به این نسبت در حساسیت نوترون‌های سریع به نوترون‌های حرارتی، مبدل حرارتی ${}^6\text{LiF}$ به ضخامت 4 میکرون انتخاب شد.

با توجه به حضور مبدل سریع پلی اتیلن که یک ماده هیدروژنه است، پروتون‌های پس زده شده از پراکندگی با نوترون‌های سریع در این لایه تولید شده و با رسیدن به لایه تهی‌شده دیود ثبت می‌شوند و در نتیجه، پاسخ قابل قبول آشکارساز برای نوترون‌های سریع ایجاد می‌گردد. همچنین، با حضور لایه مبدل حرارتی ${}^6\text{LiF}$ ، ذرات باردار تریتیوم و آلفا در نتیجه واکنش ${}^6\text{Li}(n,\alpha)\text{T}$ با $Q=4.78\text{ MeV}$ تولید و با رسیدن به لایه تهی‌شده دیود ثبت شده و در نتیجه، پاسخ قابل قبول آشکارساز برای نوترون‌های حرارتی ایجاد می‌شود. بنابراین،

مبدل سریع و انرژی نوترون فرودی در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴: بازدهی آشکارسازی نوترون‌های سریع در انرژی‌های مختلف برحسب ضخامت مبدل نوترون سریع

با افزایش ضخامت لایه پلی اتیلن، بازدهی آشکارساز افزایش می‌یابد. تغییرات بازدهی آشکارساز برحسب انرژی نوترون در ابتدا حالت صعودی داشته و سپس به‌طور تقریبی تخت می‌گردد. با افزایش ضخامت لایه پلی اتیلن قسمت تخت منحنی کمتر شده و در ضخامت 2000 میکرون از بین رفته و کل منحنی شکل صعودی دارد.

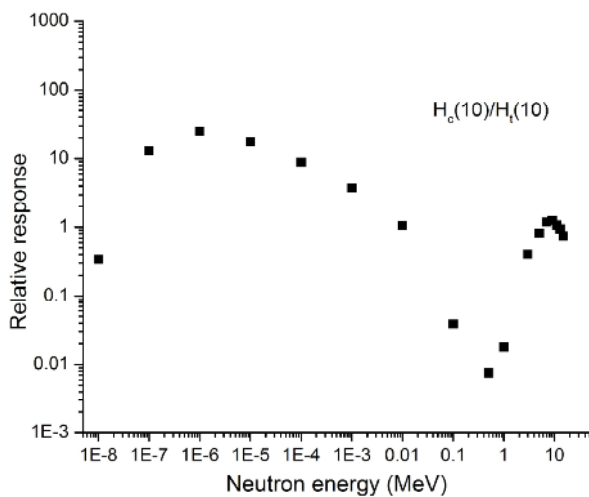
در ضخامت‌های پایین لایه پلی اتیلن، تغییرات بازدهی برحسب انرژی، شکل تخت‌تری داشته و مشابه ضرایب تبدیل شار به معادل دز است. از طرف دیگر، با کاهش ضخامت لایه پلی اتیلن حساسیت آشکارساز کاهش می‌یابد. برای اینکه بازدهی آشکارساز قابل توجه بوده و روند تغییرات آن نیز برحسب انرژی تا حدودی مشابه ضرایب تبدیل شار به معادل دز گردد، ضخامت یک میلی‌متر در نظر گرفته می‌شود. بیشترین مقدار بازدهی آشکارساز در ضخامت یک میلی‌متر لایه پلی اتیلن نزدیک 0.73 درصد است.

۳.۳. تلفیق پاسخ نوترون حرارتی و سریع

برای اینکه دزیمتر تمام انرژی‌های نوترون اعم از حرارتی و سریع را پوشش دهد، ضخامت بهینه لایه مبدل حرارتی با توجه به پاسخ نوترون‌های سریع و ضرایب تبدیل شار نوترون به معادل دز نوترون تعیین می‌شود، به‌طوری‌که در کل بازه

انرژی‌های نزدیک ۱ MeV یک افت محسوس در منحنی حساسیت نوترون وجود دارد. علت افت حساسیت آشکارسازی این است که این ناحیه انرژی در انتهای منحنی نزولی تابع پاسخ مبدل حرارتی و ابتدای منحنی صعودی تابع پاسخ مبدل سریع قرار گرفته و پالس‌های رسیده از مبدل حرارتی و مبدل سریع کاهش زیادی یافته است.

داده‌های به‌دست‌آمده از آشکارساز در یک ضریب ثابت ضرب شده و مقدار معادل دز نوترون به‌دست آورده شد. پاسخ نسبی دزیمتری یعنی مقدار پاسخ به‌دست‌آمده برای کمیت معادل دز فردی ($H_C(10)$) نسبت به داده‌های استاندارد ICRP74 ($H_T(10)$) تعیین شد و نتایج در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۶: پاسخ دزیمتری نسبت به مقدار استاندارد برحسب انرژی تابش نوترون

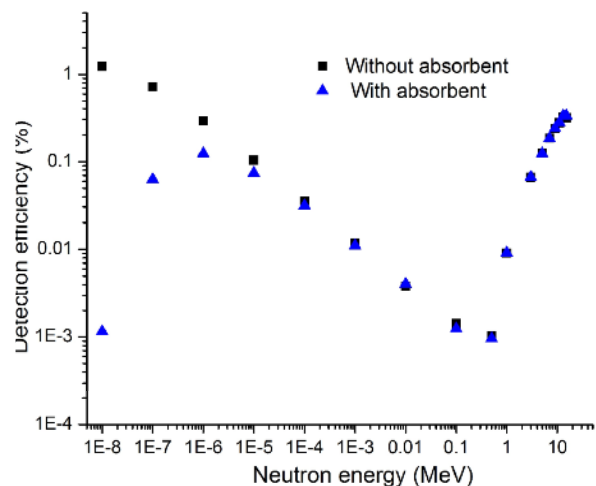
مقایسه نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی با داده‌های دیگران مشاهده می‌شود که روند تغییرات پاسخ دزیمتری در انرژی‌های مختلف هم‌خوانی داشته و میزان انحراف پاسخ دزیمتری بهبود یافته است [۱۰ و ۱۱].

۴. نتیجه‌گیری

اجزای دزیمتر و به‌ویژه عوامل تأثیرگذار آن شامل ضخامت لایه‌های تهی‌شده دیود، مبدل نوترون سریع، مبدل نوترون حرارتی، جبران‌کننده و حد آستانه پایین داده‌برداری تأثیر زیادی در پاسخ دزیمتری نوترون دارند. بنابراین، انتخاب ضخامت بهینه لایه‌های مبدل سریع، حرارتی و جبران‌کننده برای ایجاد

یک گاف پاسخ برای بازه انرژی بین سریع و حرارتی یعنی انرژی‌های میانی به‌وجود می‌آید و دزیمتر در این ناحیه انرژی دارای حساسیت پایینی است. برای جبران پاسخ در این ناحیه انرژی، یک لایه جبران‌کننده اضافه شد. لایه جبران‌کننده شامل پلی‌اتیلن آلانئیده به بور (پلی‌اتیلن به‌علاوه ۵۰ درصد بور) و دارای ضخامت ۲ میلی‌متر است. پلی‌اتیلن و بور به ترتیب، نقش کندکننده نوترون‌های میانی و جاذب نوترون‌های حرارتی را دارند. در نتیجه، حضور لایه جبران‌کننده، برخی از نوترون‌های حرارتی جذب شده و حساسیت نوترون‌های حرارتی کاهش یافته و همچنین، انرژی نوترون‌های میانی کاهش یافته و از طریق مبدل حرارتی ثبت می‌شوند. به این ترتیب، پاسخ آشکارساز نسبت به انرژی‌های میانی تا حدودی افزایش می‌یابد.

به‌منظور محاسبه پاسخ نوترونی، دزیمتر در معرض تابش باریکه موازی نوترون‌های تک‌انرژی در بازه انرژی ۱۵ MeV - ۰/۱ eV قرار گرفته و انرژی ذخیره‌شده در حجم تهی‌شده دیود تعیین شده است. پالس‌های تولیدشده در آشکارساز برحسب انرژی تابش نوترون برای حالت حضور و عدم حضور لایه جاذب شبیه‌سازی شده و تأثیر حضور لایه جاذب نوترون‌های حرارتی در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵: پالس‌های تولیدشده در آشکارساز برحسب انرژی تابش نوترون برای حالت حضور و عدم حضور لایه جاذب

نتایج آورده شده در شکل ۵ نشان می‌دهد که روند تغییرات پاسخ نوترون در انرژی‌های مختلف یک‌نواخت نیست. در

این صورت، هر خروجی آشکارساز یک ضریب ثابت کالیبراسیون داشته و به صورت مستقل عمل می‌کند. افزایش تعداد ضرایب کالیبراسیون باعث کاهش خطای دزیمتری می‌شود. میزان مصرف لیتیوم متناسب با تعداد واکنش‌ها بوده و در مقایسه با تعداد اولیه آن که از مرتبه عدد آووگادرو است، ناچیز و قابل صرف نظر کردن می‌باشد. آثار تخریبی تابش نوترون بیشتر متوجه آشکارساز سیلیکونی است که در شارهای خیلی بالا ($10^{14} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$) بروز می‌کند. بنابراین، عمر مفید پیش‌بینی شده برای آشکارساز در میدان‌های تابشی معمول ($10^4 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$) محدودیتی نداشته و می‌تواند چندین سال باشد [۱۲].

پاسخ مناسب برای دزیمتری نوترون، مهم و تأثیرگذار است. با توجه به نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی مشخص می‌شود که روش ارائه شده برای دزیمتری نوترون مناسب بوده و قابل پیاده‌سازی در دزیمتر فعال فردی نوترون بوده و می‌تواند برای اندازه‌گیری نوترون به کار برده شود.

داده‌های به دست آمده نشان می‌دهد که دزیمتری نوترون با استفاده از یک آشکارساز دیود در بازه بلند انرژی با خطای نسبتاً زیادی همراه است. برای کاهش خطا در انرژی‌های دلخواه می‌توان بازه انرژی را محدود کرد. در این صورت، کالیبراسیون دزیمتر در انرژی‌های دلخواه انجام می‌شود و دزیمتر در همان بازه انرژی تعریف شده استفاده می‌گردد. روش دیگر برای کاهش خطا استفاده از چندین آشکارساز دیود یا آشکارساز دیودی چندقطعه با خروجی‌های متفاوت است. در

۵. مراجع

- [1] Gad Shani, "Radiation Dosimetry: instrumentation and methods", Second Edition, CRC Press, (2000)
- [2] H. Zaki Dizaji, M. Shahriari and GR. 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.* Vol. 42, 1332-1334, (2007)
- [3] حسین زکی دیزجی، یدا... لطفی، طبیب کاکاوند، دزیمتر فعال با حجم و وزن بسیار کوچک برای نوترون‌های سریع، هفدهمین کنفرانس هسته‌ای ایران، منطقه هسته‌ای اصفهان (فاتسا)، ۴ و ۵ اسفند ۱۳۸۹
- [4] 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*, 517 240-253, (2004)
- [5] Khalid 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)
- [6] C. Guardiola, C. Fleta, D. Quirion, J. Rodriguez, M. Lozano, F. Teixidor, C. Vinas, A. R. Popescu, C. Domingo, K. Amgarou, "First investigations of a silicon neutron detector with a carborane converter", *Journal of Instrumentation*, Vol. 6, (2011)
- [7] T. Nunomiya, S. Abe, K. Aoyama, T. Nakamura, "Development of advanced-type multi-functional electronic personal dosimeter, *Radiation Protection Dosimetry*", Vol. 126, 284-287, (2007)
- [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] ICRP 74, Conversion coefficients for use in radiological protection against external radiation. ICRP Publication 74, *Ann. ICRP* 26 (3/4) (1996).
- [10] T. Bolognese-Milsztajn, M. Ginjaume, M. Luszik-Bhadra, F. Vanhavere, W. Wahl and A. Weeks, Active personal dosimeters for individual monitoring and other new developments, *Radiat. Prot. Dosim.* Vol. 112, 141-168 (2004).
- [11] M. Luszik-Bhadra, A prototype personal neutron

dosemeter with one silicon diode, Radiat. Prot. Dosim., Vol. 96, pp. 227–229 (2001).

[12] G. Lindstrom, Radiation damage in silicon

detectors, 9th European Symposium on Semiconductor Detectors, Schlo Elmau, June 23-27 (2002).