

مدل سازی پاسخ آشکارساز ردپای هسته‌ای CR-۳۹ در میدان نوترون‌های $^{241}\text{Am-Be}$ با استفاده از نرم افزار شبیه سازی Geant4 و ارزیابی تجربی آن

سکینه محمدیان^۱، سمانه برادران^۲، مسلم سوهانی^۱ و امیر مصلحی^{۳*}

^۱دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران.

^۲پژوهشکده راکتور و ایمنی هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، تهران، ایران.

^۳پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، تهران، ایران.

*تهران، سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده کاربرد پرتوها، کد پستی: ۱۱۳۶۵-۳۴۸۶.

پست الکترونیکی: ammoslehi@aeoi.org.ir

چکیده

در پژوهش حاضر پاسخ آشکارساز ردپای هسته‌ای CR-۳۹ در میدان نوترون‌های سریع چشمه $^{241}\text{Am-Be}$ پس از دریافت معادل دز فردی ۰/۵ mSv به صورت تجربی اندازه گیری شده است. همچنین، پاسخ با استفاده از نرم افزار شبیه سازی Geant4 مدل سازی شده است. در مدل توسعه داده شده فرض شده است که اگر ذره باردار ثانویه در ضخامتی از آشکارساز که پس از خورش شیمیایی برداشته خواهد شد تولید شود و انرژی جنبشی آن از یک مقدار آستانه تعیین شده بیشتر باشد، ردپا تشکیل و اثر آن در ضخامت باقیمانده پس از خورش شیمیایی ثبت خواهد شد. نتایج به دست آمده نشان می دهد که پاسخ های تجربی و مدل سازی شده همخوانی قابل قبولی دارند. علاوه بر این، مشخص شده است که هم پراکندگی کشسان و هم ناکشسان نوترون ها در ایجاد ردپا سهم هستند. در مجموع، مدل توسعه داده شده وابسته به انرژی نوترون نیست و می تواند به منظور پیش بینی پاسخ آشکارساز CR-۳۹ در سایر میدان های نوترون مورد استفاده قرار گیرد. همچنین، پاسخ های محاسبه شده می توانند به منظور تصحیح پاسخ این آشکارساز در میدان های نوترونی که طیف انرژی متفاوتی از میدان کالیبراسیون دارند مورد استفاده قرار گیرند.

کلیدواژگان: مدل سازی، پاسخ، آشکارساز CR-۳۹، نوترون $^{241}\text{Am-Be}$.

۱. مقدمه

رادون در هوای محیط مورد استفاده قرار می گیرد [۱-۳]. همچنین، برخی آشکارسازهای ردپا مانند CR-۳۹ برای دزیمتری نوترون نیز به کار برده می شوند [۴-۶]. در این جا ابتدا نوترون ها با ماده آشکارساز اندرکنش می کنند و سپس ذرات

آشکارسازهای ردپای هسته‌ای حالت جامد (SSNTDs)^۱، از جمله آشکارسازهای غیرفعال از جنس پلیمر هستند که عمدتاً برای آشکارسازی ذرات باردار مورد استفاده قرار می گیرند. در میان آن ها پلی کربنات برای دزیمتری ذرات آلفا و سنجش میزان

¹ Solid State Nuclear Track Detectors

باردار ثانویه آن‌ها ردپا ایجاد می‌کنند. به‌طور کلی ذرات باردار به‌دلیل توان یونسازی بالا در امتداد مسیر خود باعث شکستن زنجیره پلیمری و ایجاد ردپای نهفته^۱ در ماده آشکارساز می‌شوند. ردپای نهفته با خورش شیمیایی یا الکتروشیمیایی قابل مشاهده و آشکارسازی می‌شود [۹-۷].

از مزایای مهم آشکارسازهای ردپا در دزیمتری نوترون بر خلاف دزیمترهای دیگر مانند دزیمترهای ترمولومینسانس عدم حساسیت آن‌ها به پرتوهای گاما است؛ زیرا غالباً نوترون‌های گسیلی از چشمه‌های رادیوایزوتوپی و یا نوترون‌های تولید شده در شتاب‌دهنده‌ها با پرتوهای گاما آمیخته هستند. از آن‌جا که الکترون‌های ثانویه پرتوهای گاما توان توقف کمتری نسبت به ذرات باردار سنگین‌تر دارند، توانایی ایجاد ردپای قابل مشاهده در آشکارسازهای ردپا را ندارند. از طرف دیگر، یکی از مشکلات مهم در هنگام استفاده از اکثر دزیمترهای نوترون از جمله آشکارسازهای ردپا وابستگی پاسخ آن‌ها به انرژی نوترون‌هاست. هنگامی که دزیمتر در یک میدان نوترون با طیف انرژی متفاوت از میدانی که در آن کالیبره شده است به کار برده شود، این وابستگی منجر به تحمیل عدم قطعیت قابل توجه به مقدار معادل دز اندازه‌گیری شده خواهد شد [۱۰]. برای رفع این مشکل، یا باید میدان‌های نوترونی کالیبره با طیف‌های انرژی مختلف در دسترس باشد تا دزیمتر در آن‌ها کالیبره شود و یا در غیر این صورت پاسخ دزیمتر به نحوی تصحیح شود. برای تصحیح پاسخ دزیمتر، لازم است تا پاسخ آن در میدان‌های نوترونی مختلف به‌ویژه میدان‌های تک انرژی را داشته باشیم. تنها راه رسیدن به این منظور استفاده از روش‌های محاسباتی و شبیه‌سازی است.

در دهه‌های اخیر پژوهش‌هایی به‌منظور محاسبه پاسخ آشکارسازهای ردپا انجام شده است. در سال ۱۹۹۶، Robert از کد محاسباتی MCNP برای شبیه‌سازی پس‌زنی پروتون و

ثبت ذرات آلفا در CR-۳۹ استفاده کرد [۱۱]. در سال ۱۹۹۷، جمیل و همکارانش، علاوه بر پس‌زنی پروتون، پس‌زنی اکسیژن و کربن را نیز در ایجاد ردپا در CR-۳۹ به‌طور محاسباتی و تجربی مورد بررسی قرار دادند [۱۲]. در مطالعه‌ای دیگر در سال ۲۰۰۳ انرژی و توزیع زاویه‌ای هسته‌های پس‌زن محاسبه در CR-۳۹ توسط لنگار و همکارانش شبیه‌سازی شدند [۱۳]. در سال ۲۰۱۱، دیوبند و همکارانش، پاسخ آشکارساز CR-۳۹ در میدان نوترون‌های Am-Be را با روش مونت کارلو بررسی کردند [۱۴]. در سال ۲۰۱۴، نادیر و همکارانش نشان دادند که بازدهی آشکارساز CR-۳۹ خالص، برای نوترون سریع پایین است. از این رو بهتر است با یک لایه تابنده در مقابل آشکارساز قرار گیرد تا ابتدا نوترون‌های سریع با این لایه اندرکنش کرده و پروتون‌های ثانویه وارد CR-۳۹ شوند. بر این اساس، ضخامت بهینه لایه تابنده با کد MCNP تعیین شد [۱۵]. در سال ۲۰۲۲ نیز مصلحی و همکارانش، بهره آشکارسازی ذرات آلفا در آشکارساز پلی‌کربنات را با استفاده از ابزار شبیه‌سازی Geant4 مدل‌سازی کردند [۱۶].

در این پژوهش، باتوجه به این که تنها میدان کالیبره موجود در کشور میدان نوترون‌های Am-Be^{۲۴۱} مرکز نظام ایمنی و حفاظت در برابر اشعه کشور است، پاسخ آشکارساز CR-۳۹ در این میدان با استفاده از نرم‌افزار Geant4 (CERN) مدل‌سازی شده است و نتایج با اندازه‌گیری تجربی مقایسه شده است. نرم‌افزار Geant4 با در اختیار گذاشتن اطلاعاتی مانند بار الکتریکی، مختصات مکانی و انرژی جنبشی ذرات باردار ثانویه نوترون‌ها در CR-۳۹ امکان شمارش و آنالیز ردپاها را فراهم می‌نماید. همان‌طور که پیش‌ازین ذکر شد، باتوجه به وابستگی پاسخ CR-۳۹ به انرژی نوترون‌ها، تعداد ردپاها در واحد معادل دز در میدان‌های نوترونی مختلف متفاوت است. از طرف دیگر، از آن‌جا که تنها میدان استاندارد نوترون در کشور میدان

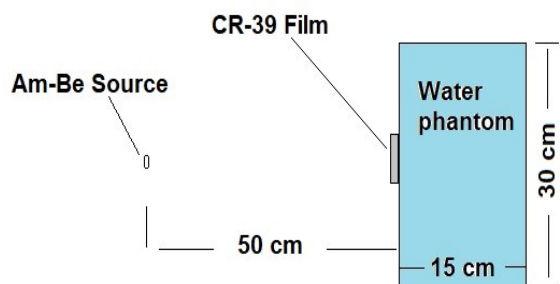
¹ Latened Track

دلیل انتخاب این دز ثبت تعداد مناسبی از ردپا در آشکار ساز و مدیریت زمان مورد نیاز برای آن در محاسبات است. هندسه پرتو دهی به صورت طرحوار در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل (۱): تصویر فیلم‌های CR-۳۹ مورد استفاده در این پژوهش.

پس از پرتو دهی فیلم‌ها به مدت ۷ h در محلول هیدروکسید سدیم با غلظت $6/2\text{ N}$ و دمای 70°C (با مقادیر انحراف معیار کوچک‌تر از ۵٪) به منظور انجام خورش شیمیایی قرار داده شده‌اند [۱۷]. سپس، فیلم‌ها شستشو شده‌اند و پس از خشک شدن تعداد ردپاهای میانگین سه فیلم CR-۳۹ (پس از کسر سهم تابش زمینه) در هر mm^2 از فیلم با استفاده از میکروسکوپ نوری (Lietz Wetzlar، آلمان) شمارش شده است. سپس تعداد ردپاها در عدد ۱۰۰ ضرب شده است تا تعداد در یکای cm^2 به دست آید. در شکل ۳، تصویر فیلم‌ها درون محلول خورش و داخل کوره نشان داده شده است.



شکل (۲): تصویر طرحوار پرتو دهی فیلم‌های CR-۳۹ با نوترون‌های $^{241}\text{Am-Be}$.

$^{241}\text{Am-Be}$ است، پس از کالیبراسیون CR-۳۹ در این میدان، مقدار معادل دز اندازه‌گیری شده در سایر میدان‌ها ممکن است دارای عدم قطعیت قابل توجهی باشد. به منظور کاهش این عدم قطعیت لازم است پاسخ آشکارساز در سایر میدان‌ها و انرژی‌ها محاسبه شود و ضرایب تصحیح مناسبی به آن اعمال شود تا بتوان از منحنی کالیبراسیون تهیه شده در میدان $^{241}\text{Am-Be}$ برای اندازه‌گیری معادل دز در سایر میدان‌ها استفاده کرد. از این رو، هدف این پژوهش توسعه یک مدل محاسباتی ساده و قابل اعتماد است تا پس از اعتبارسنجی در میدان نوترون‌های $^{241}\text{Am-Be}$ بتوان در آینده از آن برای محاسبه پاسخ این آشکارساز در سایر میدان‌های نوترونی بهره برد.

۲. مواد و روش‌ها

۱.۲. اندازه‌گیری تجربی

در این بخش تعداد شش عدد فیلم CR-۳۹ حاوی بور طبیعی با ابعاد $2/5\text{ cm} \times 2/5\text{ cm}$ و ضخامت $0/75\text{ mm}$ انتخاب شده‌اند. تصویر فیلم‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است. تعداد سه فیلم بر روی بخش مرکزی وجه بزرگتر فانتوم مکعبی شکل با ابعاد $30\text{ cm} \times 30\text{ cm} \times 15\text{ cm}$ با دیواره‌ای از جنس پرسپکس (PMMA) به ضخامت 2 mm و پر از آب نصب شده‌اند. سه فیلم نیز برای اندازه‌گیری ردپاهای ناشی از تابش زمینه در نظر گرفته شده است. برای پرتو دهی فیلم‌ها از میدان استاندارد نوترون‌های چشمه $^{241}\text{Am-Be}$ مرکز نظام ایمنی و حفاظت در برابر اشعه کشور مستقر در سازمان انرژی اتمی ایران با اکتیویته 10 Ci و آهنگ گسیل نوترون 10^7 n/s استفاده شده است. فاصله فیلم‌ها از چشمه برابر با 50 cm در نظر گرفته شده و آهنگ معادل دز فردی، $H_p(10)$ در این فاصله برابر با $57/1 \pm 953/1\text{ }\mu\text{Sv/h}$ است. فیلم‌ها به مدت $31/5\text{ min}$ پرتو دهی شده‌اند تا مقدار معادل دز فردی دریافت شده در آن‌ها برابر با $0/03 \pm 0/5\text{ mSv}$ باشد.



شکل (۳): قرارگیری فیلم‌های CR-۳۹ در محلول خورش و درون کوره.

مرکز وجه فانتوم با ابعاد $30\text{ cm} \times 30\text{ cm}$ در نظر گرفته شده و چشمه نوترون‌های $^{241}\text{Am-Be}$ به صورت نقطه‌ای در فاصله 50 cm از فیلم در نظر گرفته شده است. با در نظر گرفتن مقدار معادل دز فردی 0.5 mSv که در بخش تجربی انتخاب شده است و نیز توجه به مقدار ضریب شارش به معادل دز فردی برای نوترون‌های چشمه $^{241}\text{Am-Be}$ ، برابر با pSv- 40.8 cm^2 [۲۱]، تعداد نوترون‌های خروجی مورد نیاز برای شبیه‌سازی برابر با $10^9 \times 1/1$ به دست آمده است. به منظور کاهش زمان محاسبه، نوترون‌ها در داخل یک مخروط فرضی که سطح مقطع فانتوم را در بر بگیرد، تابیده شده‌اند. به منظور ترابرد نوترون‌ها از مدل فیزیک QGSP_BERT_HP [۱۹] که دارای کتابخانه‌های با دقت بالا برای اندرکنش نوترون‌ها در انرژی‌های کمتر از 20 MeV است، استفاده شده است.

۲.۲.۲. محاسبه تعداد ردپا

برای محاسبه تعداد ردپاها، اندرکنش‌های ممکن نوترون‌ها با ماده سازنده فیلم CR-۳۹ مدنظر قرار گرفته است. علاوه بر پروتون‌های پس‌زده شده، هسته‌های کربن و اکسیژن پس‌زده شده و نیز ذرات آلفای ناشی از اندرکنش نوترون با بور در محاسبات لحاظ شده‌اند. چون در این اندرکنش هسته‌های لیتیم در کنار ذرات آلفا تولید می‌شوند، سهم آن‌ها توأم با ذرات آلفا خواهد بود. پس از انجام خورش شیمیایی در بخش تجربی، مشخص شده که ضخامت کل میانگین برداشته شده از دو طرف فیلم برابر با $3 \pm 40\text{ }\mu\text{m}$ است ($20\text{ }\mu\text{m}$ از هر طرف). لازم به ذکر است در محاسبات این لایه بر روی فیلم در نظر گرفته شده است. می‌دانیم که برای ایجاد یک ردپای قابل مشاهده پس از مرحله خورش، ذره باردار باید توان توقیفی بیش از یک مقدار آستانه داشته باشد و یا به‌طور معادل انرژی آن کمتر از یک مقدار بیشینه باشد [۲۲]. این توان توقف از ویژگی‌های ذاتی یک آشکارساز ردپاست. پرنرژی‌ترین پروتون (با کمترین توان

لازم به ذکر است به‌منظور خوانش ردپاها، هر فیلم به ۱۰ ناحیه تقسیم شده و تعداد ردپاها در هر ناحیه شمارش شده است. تعداد میانگین این ردپاها به عنوان تعداد ردپا در هر فیلم گزارش شده است. همچنین، عدم قطعیت در تعداد ردپا با استفاده از رابطه انتشار خطا [۱۸] با در نظر گرفتن انحراف معیار محاسبه شده برای مقدار میانگین ردپا و نیز عدم قطعیت سطح فیلم در زیر میکروسکوپ (0.1 cm^2) محاسبه شده است.

۲.۲. محاسبات مونت کارلو با Geant4

۱.۲.۲. هندسه پرتودهی

به‌منظور مدل‌سازی پاسخ فیلم CR-۳۹ و شمارش ردپاهای ناشی از نوترون‌های سریع از ابزار شبیه‌سازی Geant 4 (ویرایش ۱۱/۱) [۱۹] استفاده شده است. هندسه پرتودهی، فانتوم و فیلم CR-۳۹ به‌طور یکسان با بخش تجربی شبیه‌سازی شده است. مقدار بور طبیعی موجود در فیلم معادل با $3/75$ درصد وزنی در نظر گرفته شده است [۲۰]. هندسه پرتودهی مطابق با شکل ۲ شبیه‌سازی شده است. یک فیلم CR-۳۹ در

۳. نتایج و یافته‌ها

تعداد ردپاهای محاسبه شده با استفاده از مدل تهیه شده در Geant4 همراه با تعداد شمارش شده به صورت تجربی به ازای معادل دز فردی 0.5 mSv از نوترون‌های $^{241}\text{Am-Be}$ به همراه انحراف استاندارد (با ضریب پوششی ۱) در جدول ۱ داده شده است. به علاوه، برای ردپاهای محاسبه شده، سهم پروتون‌های پس زده شده (p)، ذرات آلفا (α)، هسته‌های کربن (^{12}C) و اکسیژن (^{16}O) به صورت مجزا ارائه شده است. داده‌های جدول نشان می‌دهند که اولاً تعداد ردپای محاسبه شده و اندازه‌گیری شده با اختلاف نسبی 8% همخوانی دارند که بیانگر صحت مدل سازی انجام شده برای پاسخ آشکارساز CR-۳۹ است. ثانیاً، در بین ذرات باردار ثانویه مسئول ایجاد ردپا در CR-۳۹ حاوی بور، به ترتیب ذرات آلفا، پروتون‌ها، هسته‌های کربن و سرانجام هسته‌های اکسیژن سهم هستند. در بین هسته‌های پس زده شده پروتون‌ها بیشترین سهم را دارند؛ زیرا دارای بزرگترین سطح مقطع پراکندگی کشسان از نوترون‌های سریع هستند. به علاوه، ذرات آلفا بیش از نیمی از ردپاهای ناشی از نوترون‌های چشمه $^{241}\text{Am-Be}$ را ایجاد کرده‌اند که به دلیل سطح مقطع بالای اندرکنش این نوترون‌ها با بور است.

قابلیت جداسازی سهم ذرات باردار ثانویه در ایجاد ردپا از مزایای مدل معرفی شده نسبت به اندازه‌گیری تجربی است. در عمل و در تجربه نمی‌توان سهم ذرات باردار مختلف در ردپاهای ایجاد شده را مشخص کرد. آنچه که در تجربه مشاهده می‌شود ردپاهای با اندازه‌های مختلف است. اندازه ردپاها هم به انرژی ذره باردار و هم به محل تولید ردپا در ناحیه خورش مربوط است. اگر ذره باردار با LET مورد نیاز برای ایجاد ردپا در عمق‌های کمتر (نسبت به سطح آشکارساز) تولید شود، پس از خورش ردپای بزرگ‌تری خواهد داشت. برعکس، اگر ذره

توقف) که می‌تواند در CR-۳۹ ردپای قابل مشاهده ایجاد کند، دارای انرژی 13 MeV است [۲۲]. از طرف دیگر، پژوهش‌ها نشان داده‌اند که برای نوترون‌های سریع پروتون‌های ثانویه با انرژی بیش از 50 keV امکان ایجاد ردپا در CR-۳۹ را دارند [۲۳]. از آنجا که این توان توقف آستانه برای CR-۳۹ مشخص نیست، در این مقاله از حداقل انرژی مورد نیاز برای ایجاد ردپا به عنوان شرط آستانه استفاده شده است. برای پروتون‌ها محدوده انرژی بین 50 keV تا 13 MeV در نظر گرفته شده است. همچنین، برای آستانه انرژی هسته‌های کربن و اکسیژن از حداقل برد لازم برای ایجاد ردپا استفاده شده است. بدین صورت که ابتدا برد پروتون‌های 50 keV در CR-۳۹ با نرم افزار SRIM (the Stopping and Range of Ions in Matter)، مدل ۲۰۱۰، IAEA، محاسبه شده است ($0.1 \mu\text{m}$) است.

سپس انرژی معادل این برد برای هسته‌های کربن و اکسیژن (150 keV) به عنوان انرژی آستانه این هسته‌ها در نظر گرفته شده است. از طرف دیگر، با توجه به این که انرژی ذره آلفای تولید شده $47/1$ [۲۲] و برد آن بیشتر از مقدار آستانه است، تمامی ذرات آلفای تولید شده توسط نوترون‌ها در محاسبات لحاظ شده‌اند. در مرحله بعد مختصات مکانی و انرژی جنبشی ذرات باردار مورد نظر برای هر اندرکنش نوترون محاسبه شده‌اند. اگر شرط آستانه انرژی مورد نیاز برای ذرات باردار برآورده شود و مختصات اندرکنش در راستای محور Z در داخل ناحیه خورش (با ضخامت $20 \mu\text{m}$ از سطح فیلم) قرار گیرد یک ردپا شمرده شده است. بدین ترتیب، علاوه بر شمارش تعداد کل ردپاها امکان تعیین سهم هر یک از ذرات باردار ثانویه در ایجاد ردپا فراهم شده است. در نهایت، تعداد ردپاها در واحد سطح با مقدار اندازه‌گیری شده به صورت تجربی مقایسه شده‌اند. مقدار عدم قطعیت در تعداد ردپاهای محاسبه شده برابر با جذر تعداد ردپا در نظر گرفته شده است [۱۸].

مذکور در عمق بیشتری تولید شود ردپای کوچک‌تری خواهد داشت.

جدول (۱): تعداد ردپاهای اندازه‌گیری شده و محاسبه شده (cm^{-2})

ناشی از نوترون‌های Am-Be^{241} در فیلم CR-۳۹ بردار به‌ازای معادل دز فردی 0.5 mSv .

مجموع	تعداد ردپا				تجربی
	^{16}O	^{12}C	α	p	
2100 ± 37	-	-	-	-	-
1926 ± 44	۶۲	۱۵۲	۱۰۳۶	۶۸۶	شبه‌سازی
	(۲/۸٪)	(۶/۸٪)	(۵۴/۸٪)	(۳۵/۶٪)	

در توافق با پژوهش حاضر که هسته‌های پس زن p ، ^{12}C و ^{16}O مسئول ایجاد تقریباً نیمی از ردپاهای محاسبه شده در میدان نوترون‌های چشمه Am-Be^{241} هستند، شبه‌سازی کامپیوتری انجام شده توسط لنگار و همکاران در سال ۲۰۰۳ [۱۳] نیز همین هسته‌های پس زن را در ایجاد ردپا در CR-۳۹ (بدون بور) معرفی می‌کند. به علاوه، در یک پژوهش دیگر در سال ۲۰۰۸ [۲۴]، زکی دیزجی و همکاران بهره‌شمارش (تعداد ردپا در واحد نوترون) فیلم CR-۳۹ را در میدان نوترون‌های چشمه Am-Be^{241} با استفاده از کد MCNP و نرم افزار SRIM محاسبه کرده‌اند. آن‌ها از یک لایه پلی اتیلن با ضخامت 4 mm در جلوی فیلم CR-۳۹ به منظور تولید هسته‌های پس زن اضافی و افزایش پاسخ استفاده کرده‌اند و بهره‌ای تقریباً برابر با 0.35 به دست آورده‌اند. در حالی که در پژوهش حاضر بدون حضور پلی اتیلن بهره‌شمارش برابر با $10^{-6} \times 1/8$ به دست آمده است. در مطالعه دیگری که توسط دیوبند و همکاران [۱۴] در سال ۲۰۱۱ انجام شده است، پاسخ (تعداد ردپا در واحد سطح در واحد معادل دز) فیلم CR-۳۹ (بدون بور) در میدان نوترون‌های چشمه Am-Be^{241} هم به‌طور تجربی (با خورش الکتروشمیایی) و هم شبه‌سازی مونت کارلو تعیین شده است. آن‌ها مقادیر ۴۱۵ و ۴۶۳ را

به‌ترتیب برای پاسخ‌های تجربی و محاسباتی خود گزارش کرده‌اند. در حالی که در پژوهش حاضر این پاسخ‌ها به‌ترتیب برابر با ۴۲۰۰ و ۳۸۵۲ هستند که به‌ترتیب $1/10$ و $3/8$ برابر بزرگتر از مقادیر فوق هستند. پاسخ بزرگتر در مقاله حاضر ناشی از حضور بور طبیعی در فیلم CR-۳۹ است.

نهایتاً لازم به ذکر است که فرضیات در نظر گرفته شده برای شمارش ردپا در شبه‌سازی Geant4 به‌کاررفته در این پژوهش مشابه با پژوهش مصلحی و همکاران [۱۶] در سال ۲۰۲۲ است که بر روی پلی‌کربنات و آشکارسازی آلفا انجام شده است. در این پژوهش، نخستین بار از نرم‌افزار Geant4 برای مدل‌سازی و محاسبه پاسخ آشکارساز CR-۳۹ استفاده شده است. همان‌طور که در مقدمه نیز اشاره شده است، این نرم‌افزار جزئیات اندرکنش نوترون با CR-۳۹ و ذرات باردار ثانویه را بیشتر از هر نرم‌افزار و یا کد هسته‌ای دیگر به دست می‌دهد و امکان یک مدل‌سازی قابل قبول را فراهم می‌نماید.

۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله شمارش تعداد ردپاهای ایجاد شده در آشکارساز CR-۳۹ در میدان نوترون‌های چشمه Am-Be^{241} هم به‌صورت تجربی و هم با یک مدل ساده توسعه داده شده با استفاده از ابزار شبه‌سازی Geant4 تعیین شده است. در این مدل امکان تشخیص اندرکنش‌ها و ذرات باردار ثانویه مؤثر در ایجاد ردپا و تعیین سهم آن‌ها فراهم است. باتوجه به توافق نتایج تجربی و محاسباتی می‌توان در پژوهش‌های آینده، این مدل را برای سایر انرژی‌های نوترون به‌ویژه میدان‌هایی که در عمل در کشور قابل‌دسترس نیستند به‌کار برد و پاسخ آشکارساز CR-۳۹ را در آن میدان‌ها محاسبه نمود. هنگامی که این آشکارساز و یا هر آشکارساز و دزیمر دیگر در یک میدان نوترونی با (طیف) انرژی متفاوت از میدان کالیبراسیون مورد استفاده قرار گیرد، پاسخ آن در واحد دز با پاسخ در میدان

پاسخ‌های محاسبه شده با مدل محاسباتی تهیه شده در Geant4 می‌توانند به منظور تصحیح پاسخ‌ها در این شرایط راهگشا باشند.

کالیبراسیون متفاوت خواهد بود. در نتیجه نمی‌توان به طور مستقیم از منحنی دز-پاسخ تهیه شده در میدان کالیبراسیون استفاده کرد و در نتیجه پاسخ‌ها باید تصحیح شوند. براین اساس،

۵. مراجع

1. H. A. Khan, I. E. Qureshi. SSNTD applications in science and technology-A brief review. *Radiat. Measurements* 31 (1999) 25-36.
2. H. A. Khan, I. E. Qureshi, M. Tufail. Passive dosimetry of radon and its daughters using solid state nuclear track detectors (SSNTDs). *Radiat. Protect. Dosimetry* 46 (3) (1993) 149-170.
3. F. Mianji, S. Baradaran. *Radon Measurement in Environmental Assessments*. Arena, Tehran, 2016.
4. F. Bahrami, S. Baradaran, M. Taheri, F. Mianji. Design and calibration of a passive detector for separating neutron, proton and alpha particles in mixed radiation fields. *Pranama. J. Phys.* 94 (2020) 1-7.
5. A. Stabilini, M. S. Akselrod, V. Fomenko, J. Harrison, E. G. Yukihiro. Principal Component Analysis applied to neutron dosimetry based on PADC detectors and FNTDs. *Radiat. Measurements* 141 (2021) 1056516.
6. H. Rui, N. Xiao-Yang, W. Yi, et al. Advances in nuclear detection and readout techniques. *Nucl. Sci. Tech.* 34 (2023) 2-78.
7. H. A. Khan. Fast-Neutron Dosimetry by Solid-State Track Detectors. *Nucl. Instru. Meth.* 113 (1973) 55-60.
8. S. A. Durrani and R. K. Bull *Solid State Nuclear track Detection: Principles, Methods, and Applications*. Pergamon Press, Maxwell House, Fairview Park, Elmsford, New York 10523, U.S.A. 1977.
9. T. Yamauchi. Studies on the nuclear tracks in CR-39 plastics. *Radiat. Measurements* 36 (1-6) (2011) 73-81.
10. A. Moslehi, S. Baradaran, P. Rezaeian. A method to modify the response of neutron dosimeters in the fields with energy spectra different from the calibration field. *Nucl. Eng. Progress.* 1 (1) (2021) 1-8.
11. R. T. Devine. Neutron Charged Particle Reactions in CR-39 Calculated Using MCNP and LAHET. *Health Physics Society Health Physics of Radiation Generating Machines.* (5-8) (1996).
12. K. Jamil, S. Ali, I. E. Qureshi, F. Rehman, H. A. Khan, S. Manzoor, A. Waheed, R. Cherubini. Experimental and simulation study of neutron dosimetry at various neutron energies. *Radiat. Measurements* 28 (1-6) (1997) 495-498.
13. I. Lengar, J. Skvarč, R. Ilić. Computer simulation of the processes in a CR-39 neutron detector. *Radiat. Measurements.* 36 (2003) 115-118.
14. M. R. Deevband, P. Abdolmaleki, M. R. Kardan, H. R. Khosravi, M. Taheri, F. Nazeri, N. Ahmadi. Experimental and Monte Carlo studies on the response of CR-39 detectors to Am-Be neutron spectrum. *Iran. J. Radiat. Res.* 9 (2) (2011) 95-102.
15. A. F. Nadir, A. R. H. Subber, N. H. N. Al-Hashmi. Numerical and analytical calculations of efficiency and calibration factor for CR-39 detectors in the chamber diffusion by using Monte-Carlo method and the mean critical angle. *Archives Phys. Res.* 5 (5) (2014) 23-30.
16. A. Moslehi, S. Baradaran, M. Taheri. GEANT4 modeling of alpha particles detection efficiency for polycarbonate SSNTDs. *Nucl. Ins. And Met. Phys. Res. A* 1033 (2022) 166714.
17. R. L. Fleischer, P. B. Price, R. M. Walker. *Nuclear Tracks in Solids*, University of California Press, USA, 1975.
18. P. R. Bevington, D. K. Robinson. *Data Reduction and Error Analysis for the Physical Sciences*. McGraw-Hill, 3rd ed. (2003).
19. S. S. Agostinelli, J. Allison, K. Amako, J. Apostolakis, H. Araujo, P. Arce, M. Asai, D. Axen, S. Banerjee, G. Barrand, F. Behner, L. Bellagamba, J. Boudreau, L. Broglia, A. Brunengo, H. Burkhardt, S. Chauvie, J. Chuma, R. Chytrcek, G. Cooperman, G. Cosmo, P. Degtyarenko, A. Dell'Acqua, G. Depaola, D. Dietrich, R. Enami, A. Feliciello, C. Ferguson, H. Fesefeldt, G. Folger, F. Foppiano, A. Forti, S. Garelli, S. Giani, R. Giannitrapani, D. Gibin, J. J. Gómez Cadenas, I. González, G. Gracia Abril, G. Greeniaus, W. Greiner, V. Grichine, A. Grossheim, S. Guatelli, P. Gumplinger, R. Hamatsu, K. Hashimoto, H. Hasui, A. Heikkinen, A. Howard, V. Ivanchenko, A. Johnson, F.W. Jones, J. Kallenbach, N. Kanaya, M. Kawabata, Y. Kawabata, M. Kawaguti, S. Kelner, P. Kent, A. Kimura, T. Kodama, R. Kokoulin, M. Kossov, H. Kurashige, E.

- Lamanna, T. Lampén, V. Lara, V. Lefebure, F. Lei, M. Liendl, W. Lockman, F. Longo, S. Magni, M. Maire, E. Medernach, K. Minamimoto, P. Mora de Freitas, Y. Morita, K. Murakami, M. Nagamatu, R. Nartallo, P. Nieminen, T. Nishimura, K. Ohtsubo, M. Okamura, S. O'Neale, Y. Oohata, K. Paech, J. Perl, A. Pfeiffer, M. G. Pia, F. Ranjard, A. Rybin, S. Sadilov, E. Di Salvo, G. Santin, T. Sasaki, N. Savvas, Y. Sawada, S. Scherer, S. Sei, V. Sirotenko, D. Smith, N. Starkov, H. Stoecker, J. Sulkimo, M. Takahata, S. Tanaka, E. Tcherniaev, E. Safai Tehrani, M. Tropeano, P. Truscott, H. Uno, L. Urban, P. Urban, M. Verderi, A. Walkden, W. Wander, H. Weber, J. P. Wellisch, T. Wenaus, D.C. Williams, D. Wright, T. Yamada, H. Yoshida, D. Zschesche. Geant4-A simulation toolkit. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* 506 (3) (2003) 250-303.
20. T. Tsuruta, N. Juto. Neutron dosimetry with Boron-doped CR-39 plastic. *J. Nucl. Sci. Technol.* 21 (11) (1984) 871-876.
 21. H. R. Vega-Carrillo, S. A. Martinez-Ovalle. Neutron spectra and dosimetric features of Isotopic neutron sources: A review. ISSSD (2015).
 22. G. F. Knoll. *Radiation Detection and Measurement*. New York, Chichester, Weinheim, Brisbane, Toronto, Singapore, 1999.
 23. A. Fiechtner, C. Wernli. Individual neutron monitoring with CR-39 detectors at an accelerator Centre. *Radiat. Prot. Dosim.* 85 (1999) 35-38.
 24. H. Zaki-Dizaji, M. Shahriari, G. R. Etaati. Calculation of CR-39 efficiency for fast neutrons using the MCNP and SRIM codes. *Radiat. Measurements* 43 (2008) S283-S285.