

شبیه‌سازی تابع پاسخ سوسوزن‌های آلی به تابش گاما و نوترون با استفاده از کدهای مونت کارلوی FLUKA، MCNPX و SCINFUL

مجتبی تاجیک^۱ و حسن یوسف‌نیا^۲

۱. دانشکده فیزیک، دانشگاه دامغان، دامغان

۲. پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، تهران

پست الکترونیکی: tajik@du.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۳۹۳/۰۷/۰۶؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۵/۰۷/۲۷)

چکیده

در سوسوزن‌های آلی توزیع انرژی فوتون‌های گاما و نوترون به طور غیر مستقیم از طریق توزیع ارتفاع پالس حاصل از نور خروجی برهم‌کنش‌های گاما و نوترون در داخل آشکارساز به دست می‌آید. برآورد صحیح از برهم‌کنش تابش‌های گاما و نوترون با مواد سوسوزنی و تولید ذرات ثانویه باردار و متعاقب آن تولید نور در انرژی‌های مختلف گاما و به ویژه نوترون یک عامل مهم در محاسبه تابع پاسخ سوسوزنی است. به علت پیچیدگی تولید نور در این آشکارسازها، شبیه‌سازی تابع پاسخ با روش‌های معمول مونت کارلو مشکل است. در این مقاله تابع پاسخ سوسوزن پلاستیک^{۱۰۲}NE به فوتون‌های چشمه^{۱۳۷}Cs و نوترون‌های تک انرژی و تابع پاسخ سوسوزن مایع^{۱۰۱A}BC^{۵۰} به نوترون‌های تک انرژی و چشمه^{۲۱}Am-Be با استفاده از کارت EVENTBIN کد FLUKA و کارت PTRAC کد MCNPX محاسبه شده است. مقایسه نتایج شبیه‌سازی کدهای FLUKA و کد MCNPX با نتایج شبیه‌سازی کد SCINFUL و نتایج اندازه‌گیری شده همخوانی خوبی را نشان می‌دهند.

واژه‌های کلیدی: نوترون، تابع پاسخ، آشکارساز سوسوزن آلی، کد FLUKA، کد MCNPX

۱. مقدمه

است و نیازی به ایجاد ارتباط بین آنها نمی‌باشد. اما در بیشتر موارد، تابع پاسخ بسیار پیچیده بوده و ممکن است دارای قله‌های متعدد و یک پیوستار باشد. بنابراین طیف ارتفاع تپ اندازه‌گیری شده نیز بسیار پیچیده خواهد بود و برای دستیابی به طیف انرژی ذرات فرودی باید طیف ارتفاع تپ را مورد تحلیل قرار داد [۱]. روش‌های مونت کارلو به طور گسترده‌ای در شبیه‌سازی تابع پاسخ آشکارسازها استفاده می‌شود. مطالعات

تابع پاسخ آشکارساز، مفهوم مهمی است که باید برای اندازه‌گیری طیف انرژی، در نظر گرفته شود. تابع پاسخ آشکارساز، طیف ارتفاع تپ‌های مشاهده شده از آشکارساز در اثر تابش دهی است. در صورتی که تابع پاسخ آشکارساز در هر انرژی یک قله باریک یا تابع دلتای دیراک باشد، بین ارتفاع تپ اندازه‌گیری شده و انرژی پرتو تابیده رابطه‌ای یک به یک برقرار

پاسخ را به صورت کمی و کیفی برآورده کرده‌ایم. ساختار مقاله به صورت زیر است: در بخش دوم روش شبیه‌سازی تابع پاسخ سوسوزن با استفاده از کدهای MCNPX و FLUKA، در بخش سوم جزئیات آزمایش اندازه‌گیری تابع پاسخ به روش گذر از صفر و در بخش چهارم بحث نتایج انجام شده است.

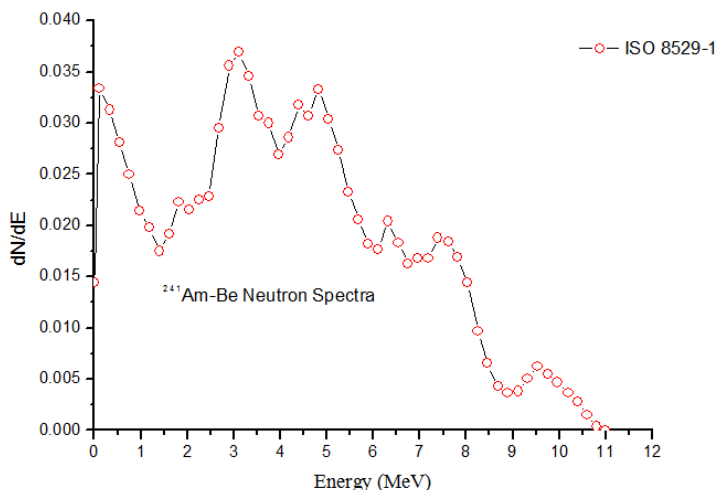
۲. مطالعات شبیه‌سازی

برای شبیه‌سازی پاسخ سوسوزن، باید نور سوسوزنی حاصل از برهم‌کنش ذرات باردار ثانویه تولید شده به ازای هر ذره ورودی به آشکار ساز محاسبه شود. برای این منظور باید میزان انرژی به جا گذاشته شده ذرات باردار در سوسوزن به صورت رویداد به رویداد برای هر تاریخچه ذره فرودی محاسبه شود. با توجه به رابطه خطی میان انرژی الکترون و نور آن در سوسوزن‌های آلی، انرژی به جا گذاشته شده آن معادل نور الکترون است، اما برای ذرات باردار دیگر ناشی از برهم‌کنش‌های نوترون با اتم‌های سوسوزن، نور خروجی از طریق انرژی جنبشی ذرات باردار ثانویه تولید شده در داخل حجم سوسوزن و بر اساس منحنی‌های نوری (یعنی منحنی‌های تبدیل انرژی ذرات باردار به نور سوسوزنی) به دست می‌آید. منحنی‌های نوری مورد استفاده در این مطالعه، مربوط به وربینسکی است [۹] که در آنها مدل برازش داده‌ها از مقاله سسیل بر گرفته شده است [۱۰].

$$L(E) = L_{ee} = a_1 E - a_2 \left[1 - \exp(-a_3 E^{a_4}) \right]. \quad (1)$$

در رابطه فوق، L_{ee} ، نور خروجی ناشی از ذرات باردار است که برحسب MeV بیان می‌شود (۱ MeV، انرژی ذره باردار است که می‌تواند با آن انرژی، نوری برابر با نور یک الکترون با انرژی ۱ MeV در سوسوزن تولید کند) و $L(E_\alpha)$ ، $L(E_p)$ و $L(E_e)$ به ترتیب نور خروجی پروتون، آلفا، کربن و الکترون می‌باشد. در مطالعات وربینسکی، نور حاصل از بریلیم برابر با یک سوم نور کربن در نظر گرفته شده است [۹]. به منظور تشریح جزئیات شبیه‌سازی پاسخ نوترونی سوسوزن ابتدا هندسه، مواد، موقعیت، انرژی چشمه و نوع آماره برای کد

بسیاری بر روی شبیه‌سازی تابع پاسخ آشکار سازهای آلی صورت گرفته که حاصل آن معرفی کدهای مستقل تولید تابع پاسخ مانند SCINFUL [۲] و O5S [۳] و همچنین استفاده از کدهای چند منظوره‌ای نظیر FLUKA، MCNP، GEANT و برای شبیه‌سازی تابع پاسخ آشکار ساز [۴-۶] بوده است. هر کدام از کدهای تولید تابع پاسخ دارای توانمندی‌ها و ضعف‌هایی است، مثلاً کدهای مستقل تولید تابع پاسخ فقط به منظور تولید تابع پاسخ آشکارسازهای خاصی (از لحاظ نوع و ساختار) نسبت به تابش یک ذره و در گستره محدودی از انرژی ذره فرودی تهیه شده و به طور مستقیم تابع پاسخ را به دست می‌دهند، در نتیجه کار کردن با این کدها راحت‌تر و آسان‌تر است، اما این کدها در شبیه‌سازی انواع مواد و هندسه‌های متنوع ناتوان می‌باشند. برخی کدهای مونت کارلو مورد استفاده برای تولید تابع پاسخ چند منظوره هستند به طوری که حوزه کاربرد بسیار متنوع دارند. تولید تابع پاسخ آشکارساز با این کدها به صورت غیر مستقیم است، به عبارتی کاربر باید خروجی‌های این کدهای چند منظوره را با استفاده از برنامه‌های پس پردازشی که تهیه می‌کند، تجزیه و تحلیل کند سپس از خروجی برنامه پس پردازش تابع پاسخ را به دست آورد. این روش تولید تابع پاسخ محدودیت‌های کمتری نسبت به روش مستقیم دارد اما وقت گیر و امکان اشتباه در فرایند تولید پاسخ بیشتر است. کدهای چند منظوره از مدل‌های فیزیکی مختلفی بسته به نوع و انرژی ذره برای ترابرد ذرات در مواد استفاده می‌کنند، لذا تابع پاسخ‌های تولید شده با استفاده از این کدهای چند منظوره اختلافاتی با یکدیگر و با نتایج تجربی را نشان می‌دهند. مقایسه‌ای بین کدهای Geant ۴ و MCNPX-PoliMi به منظور تولید تابع پاسخ آشکارساز سوسوزن مایع EJ-۳۰۹ برای نوترون‌های سریع انجام شده است [۷]. همچنین مقایسه‌ای بین کدهای Geant ۴ و FLUKA به منظور تولید تابع پاسخ آشکارساز سوسوزن مایع EJ-۳۰۱ برای فوتون‌های گاما انجام شده است [۸]، ولی تاکنون مقایسه‌ای میان دو کد MCNPX و FLUKA در زمینه شبیه‌سازی تابع پاسخ سوسوزن‌ها انجام نشده است در این مقاله میزان توانمندی کد FLUKA در تولید تابع



شکل ۱. (رنگی در نسخه الکترونیکی) طیف انرژی چشمه $^{241}\text{Am-Be}$ مورد استفاده برای شبیه‌سازی تابع پاسخ نوترونی آشکارساز سوسوزن BC501A [۱۱].

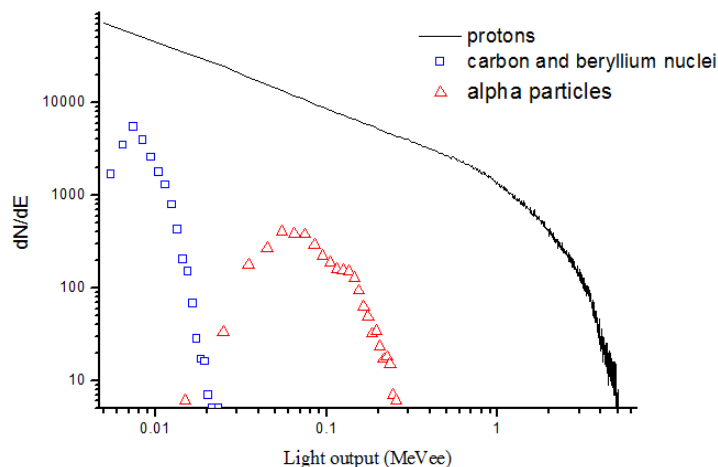
الکترون از انرژی ۱ keV تا ۱ TeV، هادرون‌ها تا انرژی TeV ۲۰، نوترون از محدوده انرژی گرمایی تا ۲۰ TeV و پروتون از انرژی ۱ keV تا ۲۰ TeV را در مواد با دقت بالا شبیه‌سازی کند. این کد، تاریخچه ذرات را در محیط تعریف شده توسط کاربر شبیه‌سازی می‌کند [۱۳]. با استفاده از کارت BEAM انرژی و کارت BEAMPOS موقعیت و مسیر حرکت ذرات چشمه نوترون تک انرژی و با استفاده از کارت SOURCE طیف انرژی نوترون‌های چشمه $^{241}\text{Am-Be}$ ، موقعیت و مسیر حرکت ذرات چشمه برای کد FLUKA تعریف شد. برای محاسبه تابع پاسخ نیاز به ثبت برهم‌کنش‌های ذره فرودی به صورت رویداد به رویداد برای هر تاریخچه ذره داریم. برای محاسبه تابع پاسخ سوسوزن پلاستیک NE۱۰۲ به فوتون‌های چشمه ^{137}Cs ، با استفاده از کارت EVENBIN انرژی به جا گذاشته شده الکترون‌های تولیدی برای هر تاریخچه فوتون گاما را در داخل سوسوزن به دست آورده و با توجه به رابطه خطی میان انرژی الکترون و نور آن در داخل سوسوزن، خروجی کارت EVENTBIN همان نور خروجی حاصل از فوتون‌های گاما در سوسوزن است. در مورد ذرات نوترون، میزان نور خروجی ناشی از واکنش‌های $^{12}\text{C}(n,n)^{12}\text{C}$ ، $^{12}\text{C}(n,n)^{12}\text{C}$ ، $^{12}\text{C}(n,\alpha)^9\text{Be}$ ، $^{12}\text{C}(n,\alpha)^9\text{Be}$ نسبت به واکنش پراکندگی کشسان

FLUKA تعیین می‌شود. یک سوسوزن آلی پلاستیک ۱۰۲ NE به قطر و ارتفاع ۵٫۰۸ cm در معرض فوتون‌های گامای ^{137}Cs ، دو سوسوزن استوانه‌ای یکی BC501A به قطر ۴٫۶۵ cm و ارتفاع ۴٫۶۰ cm و دیگری NE۱۰۲ به قطر ۱۲٫۵۰ cm و ارتفاع ۵ cm در معرض چشمه نوترون‌های تک انرژی و یک سوسوزن BC501A به قطر و ارتفاع ۵٫۰۸ cm که در معرض نوترون‌های چشمه $^{241}\text{Am-Be}$ باطیف انرژی مطابق شکل ۱ قرار داده شده است به علت عدم دسترسی به گواهی طیف انرژی چشمه Am-Be مربوط به کارخانه سازنده، داده‌های طیف انرژی چشمه Am-Be از یک مؤسسه استاندارد بین‌المللی معتبر [۱۱] گرفته شده است. در شبیه‌سازی‌های انجام شده تعداد ذرات (NPS) فرودی را بیشتر از یک میلیون ذره در نظر گرفته که این مقدار، نتایج قابل قبول تولید کرده و خطای داده‌های شبیه‌سازی در حدود ۱٪ خواهد شد.

۲.۱. محاسبه انرژی ذخیره شده و نور خروجی

سوسوزن با استفاده از کد FLUKA

FLUKA، یک کد مونت‌کارلو سه بعدی برای شبیه‌سازی ترابرد و برهم‌کنش ذرات با مواد است. کد FLUKA می‌تواند برهم‌کنش و ترابرد حدود ۶۰ ذره مختلف از قبیل فوتون و



شکل ۲. (رنگی در نسخه الکترونیکی) سهم نور خروجی هر یک از ذرات باردار ثانویه ناشی از برهم‌کنش نوترون‌های چشمه $^{241}\text{Am-Be}$ در سوسوزن A BC501.

جدول ۱. ضرایب نور خروجی ذرات باردار ثانویه برای سوسوزن BC501A.

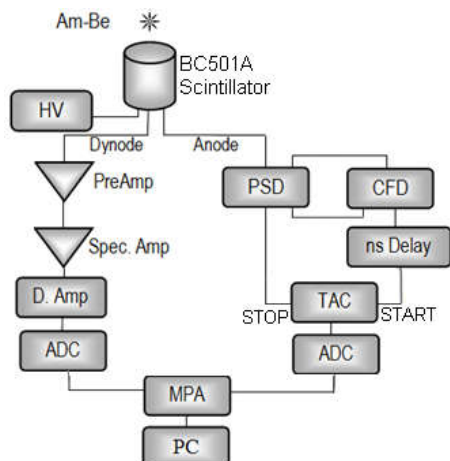
نوع ذره	a_1	a_2	a_3	a_4
پروتون	۰/۷۴۲	-۵/۳۴	-۰/۱۱۵	۰/۸۳
آلفا	۰/۵۱۸	۵/۲۰	۰/۰۹۴	۱/۱۵
کربن	-۰/۰۳۳	-۶/۶۲۱	-۰/۶۰۰	۰/۹۸

۲.۲. محاسبه انرژی ذخیره شده و نور خروجی سوسوزن

با استفاده از کد MCNPX

کدمونت کارلوی MCNPX یک کد توانمند چند منظوره ترابرد ذرات است که توانایی ترابرد انواع ذرات از قبیل نوترون، گاما، الکترون، پروتون، آلفا و هسته‌های سنگین و غیره را در بازه گسترده‌ای از انرژی‌ها را دارد و اکثر اندرکنش‌های هر یک از این ذرات در حجم مورد نظر را بررسی می‌کند [۱۴]. از آنجایی که نور سوسوزنی، حاصل از برهم‌کنش ذرات ثانویه باردار در سوسوزن است، باید میزان انرژی انباشته شده در سوسوزن توسط کارت PTRAC کد MCNPX محاسبه شود. کارت PTRAC کد MCNPX، تمام جزئیات تاریخچه ذره فرودی از قبیل نوع برهم‌کنش، موقعیت، جهت حرکت و انرژی ذره را به صورت رویداد به رویداد ثبت می‌کند [۱۵]. برای محاسبه انباشت انرژی ذره در داخل سوسوزن، یک برنامه پردازش XPTRAC به زبان فرترن نوشته شد، که فایل

$^1\text{H}(n,n)^1\text{H}$ در انرژی‌های پایین‌تر از ۱۰ MeV ناچیز است. با توجه به شکل ۲ سهم عمده نور خروجی ناشی از برهم‌کنش‌های نوترون‌های چشمه $^{241}\text{Am-Be}$ مربوط به پروتون‌های پس زده است. ذرات آلفا و هسته‌های سنگین مانند کربن و بریلیوم به ترتیب در بازه ۰/۱۷ MeV تا ۰/۲۵ MeV و ناحیه‌های پایین‌تر از ۰/۲۱ MeV در طیف نور خروجی سوسوزن نقش دارند، لذا در شبیه‌سازی انرژی ذخیره شده ناشی از پروتون‌های پس زده برای هر تاریخچه نوترون، با استفاده از کارت EVENTBIN، به دست آمد سپس با استفاده از برنامه پس پردازش XEVENTBIN که به زبان فرترن نوشته شد، که فایل خروجی EVENTBIN را به عنوان ورودی گرفته و با توجه به رابطه (۱) و ضرایب جدول ۱ نور خروجی را برای تاریخچه‌های مختلف نوترون محاسبه کرده و با فراوانی گرفتن از نورهای مختلف ثبت شده برای تاریخچه‌های هر نوترون، تابع پاسخ سوسوزن حاصل شد.



شکل ۳. چیدمان آزمایش جدا سازی نوترون-گاما به روش گذر از صفر.

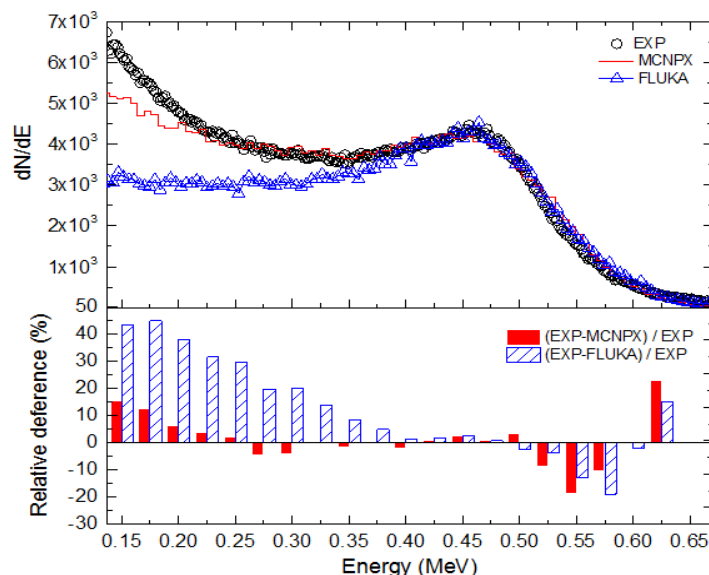
شده است. سلول این سوسوزن‌ها از یک استوانه آلومینیومی با یک انتهای شیشه‌ای تشکیل شده است که ماده سوسوزنی در آن قرار می‌گیرد. ضخامت جداره سلول ۱ mm و ابعاد سلول ۲"×۲" انتخاب شده است. سطح داخلی محفظه سلول با استفاده از رنگ انعکاس دهنده سفید از جنس ELGEN EJ۵۲۰ رنگ آمیزی شده است. پنجره سلول به منظور تطبیق مناسب با پنجره PMT، از شیشه بروسیلیکات (BK_v) با ضریب شکست مناسب ساخته شده است. PMT از نوع XP ۲۰۲۰ به قطر ۵٫۰۸ cm با زمان عبور ۳۰ ns گستردگی زمان عبور ۲٫۴ ns دارای پنجره انتهایی با فوتوکاتد حساس به آبی-سبز و دوازده دایند با طراحی خطی می‌باشد. به منظور جلوگیری از انعکاس نور از پنجره PMT که در اثر تفاوت در ضریب شکست نور پنجره PMT با سوسوزن رخ می‌دهد، برای اتصال اپتیکی این دو محیط از روغن سیلیکون استفاده شده است. به منظور حذف اثر میدان مغناطیسی زمین بر بازدهی PMT، طبق توصیه شرکت سازنده PMT، از حفاظ مغناطیسی مدل MS ۱۷۲ استفاده شده است.

همان طور که در مدار شکل ۳ نشان داده شده است، جداسازی نوترون-گاما بر اساس پالس آندی است که به طور هم‌زمان به واحد PSD (Pulse-Shape Discriminator) و واحد CFD (Constant Fraction Discriminator) وارد می‌شود.

خروجی PTRAC را به عنوان ورودی گرفته و با توجه به نوع برهم‌کنش نوترون، انرژی اولیه و ثانویه ذرات باردار، میزان انباشت انرژی در سوسوزن را به ازای هر نوترون محاسبه می‌کند و سپس با استفاده از رابطه (۱) و ضرایب جدول ۱، مجموع نور خروجی همه ذرات ثانویه برای هر تاریخچه نوترون محاسبه می‌شود. هنگامی که فرایندهای ذکر شده برای تعداد زیادی از نوترون‌های فرودی تکرار شود، رسم منحنی فراوانی نور کل ترابرد شده، مانسته طیف ارتفاع پالس سوسوزن خواهد بود. برای فراهم آمدن امکان مقایسه داده‌های شبیه‌سازی و تجربی، یک پهن شدگی اضافی نیز باید بر روی طیف شبیه‌سازی مرحله قبل اعمال شود که اساساً ناشی از اثر تضعیف فوتون در سوسوزن، حضور PMT (که می‌تواند به نایکنواختی سطح فوتوکاتد و تکثیر الکترون در زنجیره دایندی مرتبط باشد) و نیز نوفه الکترونیک است. این قدرت تفکیک اضافی معمولاً با پیچش یک تابع گوسی در طیف خروجی حاصل از برنامه‌های XEVENTBIN و XPTRAC انجام می‌شود.

۳. مطالعات تجربی

به منظور تأیید نتایج شبیه‌سازی، پاسخ تجربی سوسوزن آلی پلاستیک (NE۱۰۲) به قطر و ارتفاع ۵٫۰۸ cm که در معرض چشمه گامای ^{۱۳۷}Cs با قدرت ۱۲ μCi و انرژی ۰٫۶۶۲ keV قرار گرفته، اندازه‌گیری شده است. فاصله چشمه تا آشکار ساز تقریباً ۱ cm در نظر گرفته شده است. در مرحله بعد اندازه‌گیری‌های تجربی پاسخ آشکارساز سوسوزن استوانه‌ای BC۵۰۱A به قطر و ارتفاع ۵٫۰۸ cm که در معرض چشمه نوترون ^{۲۴۱}Am-Be قرار گرفته، انجام شده است. این آزمایش با چشمه ^{۲۴۱}Am-Be با فعالیت ۱۰۰ mCi انجام شده و فاصله چشمه تا آشکارساز تقریباً ۳۰ cm در نظر گرفته شده است. به منظور جلوگیری از اثرات پس پراکندگی، آشکارساز در فاصله ۱m از سطح زمین و ۱/۵ m از دیوارها قرار می‌گیرد. آشکارسازهای سوسوزن آلی پلاستیک (NE۱۰۲) و مایع (BC۵۰۱A) از قسمت‌های مختلف شامل سلول، PMT، مقسم ولتاژ و حفاظ مغناطیسی تشکیل



شکل ۴. (رنگی در نسخه الکترونیکی) مقایسه تابع پاسخ شبیه‌سازی کدهای MCNPX و FLUKA با نتایج تجربی، برای آشکارساز سوسوزن NE۱۰۲ با ابعاد "۲"×"۲" که در معرض چشمه ^{137}Cs قرار گرفته است.

۴. نتایج

با توجه به عدد اتمی پایین آشکارسازهای سوسوزن آلی، فرآیند غالب فرایند پراکندگی کامپتون است. بنابراین در نمودار طیف ارتفاع پالس حاصل از این آشکارسازهای سوسوزن، قله فوتوالکترونیک دیده نمی‌شود.

در شکل ۴ مقایسه نسبی نتایج شبیه‌سازی دو کد FLUKA و MCNPX با نتایج تجربی برای آشکارساز پلاستیک NE ۱۰۲ به قطر ۵٫۰۸ cm و ارتفاع ۵٫۰۸ cm نشان می‌دهد که در انرژی‌های بالا و لبه کامپتون توافق خوبی بین نتایج شبیه‌سازی‌ها و تجربی وجود دارد. همان‌طور که در جدول ۲ آورده شده است، اختلاف نسبی بازدهی نور خروجی مابین نتایج شبیه‌سازی و تجربی برای کد MCNPX کمتر از ۳٪ و برای کد FLUKA کمتر ۱۷٪ است. این اختلاف اغلب در انرژی‌های پایین وجود دارد که می‌تواند ناشی از عوامل زیر باشد:

- ۱- اثرات پراکندگی از مواد اطراف مانند میز، دیوارها و غیره که در شبیه‌سازی انجام شده در نظر گرفته نشده است.
- ۲- نوفه‌های الکترونیک مربوطه که بیشتر در ابتدای طیف ظاهر می‌شوند.

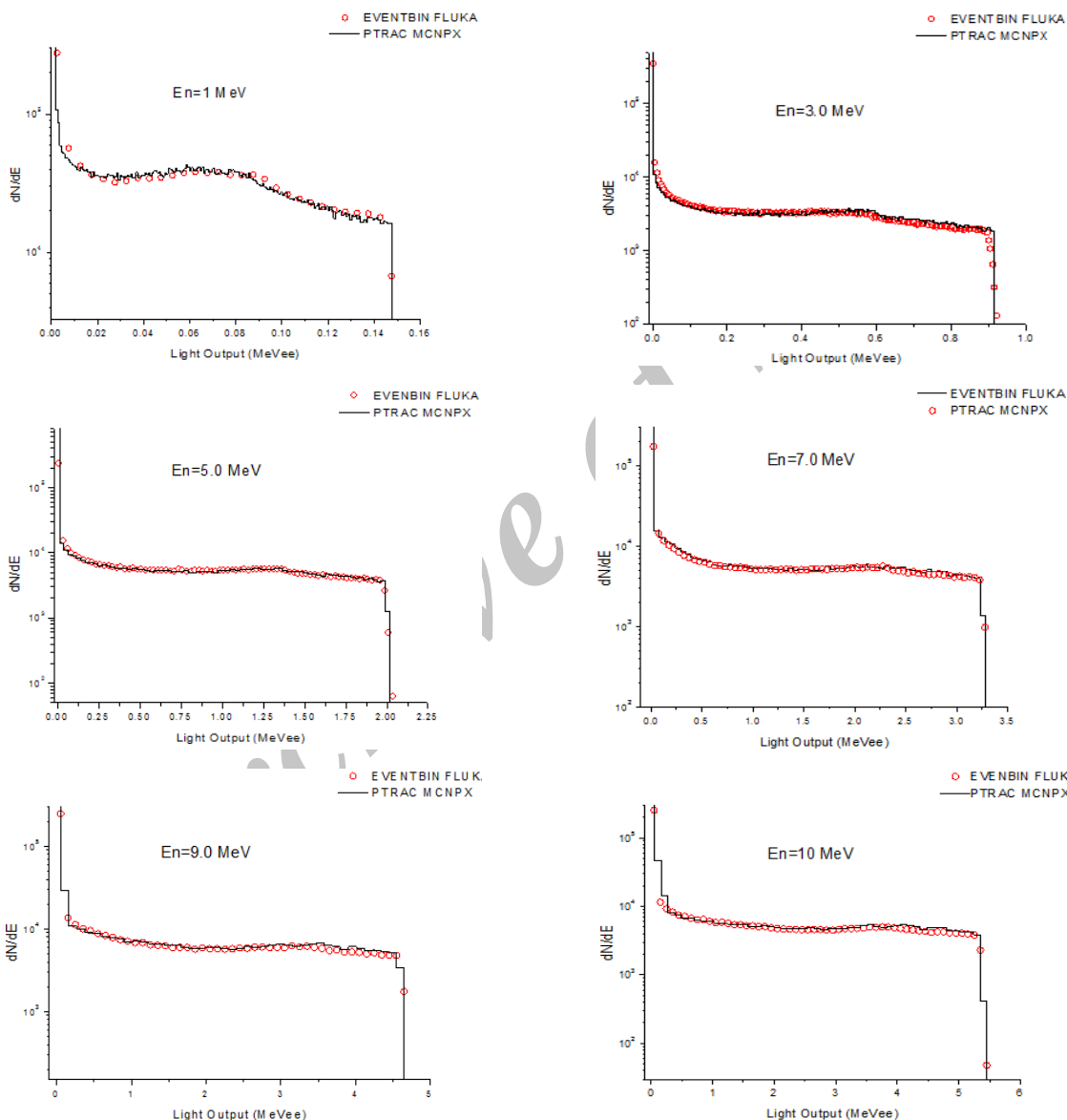
۳- عدم دقت سطح مقطع‌ها در ناحیه کم انرژی برهم‌کنش

واحد PSD پالس منفی آند را گرفته و آن را دو قطبی می‌کند. از آنجایی که چندین نقطه گذر از صفر وجود دارد، نقطه مناسب گذر از صفر برای فرایند زمان‌گیری با استفاده از پنجره بارق، واحد CFD مشخص می‌شود، سپس در نقطه گذر از صفر، یک تپ در PSD ثبت می‌شود. سرانجام خروجی‌های واحدهای CFD و PSD به واحد TAC داده می‌شود، علامت خروجی داینود وارد پیش تقویت کننده و سپس وارد تقویت کننده می‌شود. در این مرحله علاوه بر شکل دهی تپ، ارتفاع آن تنظیم می‌شود. تپ خروجی از تقویت کننده پس از هم‌زمانی با تپ خروجی TAC هر کدام به واحد ADC جداگانه‌ای وصل شده و نهایتاً به دو کانال MPA داده می‌شوند. از چشمه گامای ^{22}Na نیز برای مدرج‌سازی محور انرژی استفاده شده است، بدین ترتیب که مطابق قرارداد، ۸۹٪ شمارش لبه کامپتون گامای پر انرژی این چشمه (فوتون با انرژی ۱/۲۷۴ MeV) که در انرژی ۱/۰۶۱ MeV قرار دارد، به عنوان یک واحد نوری یا ۱ MeV در نظر گرفته می‌شود [۱۶]. پس از مدرج‌سازی محور انرژی، از طیف جداسازی نوترون-گامای به دست آمده با آستانه نوری ۱۷۰ keV، طیف تجربی پاسخ نوترونی شکل ۹ به دست می‌آید.

۱. Strobe

جدول ۲. اختلاف نسبی بازدهی نوری آشکار سازی سوسوزن مایع BC۵۰۱A و NE۱۰۲ بین نتایج تجربی و شبیه‌سازی.

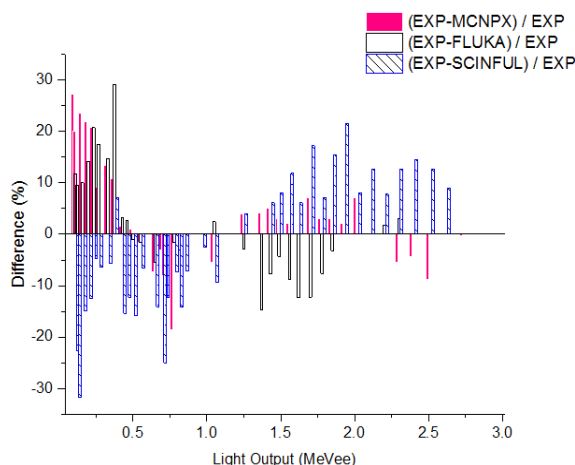
نوع چشمه	انرژی (MeV)	نوع آشکار ساز	ابعاد (آشکار ساز استوانه‌ای)	MCNPX (%)	FLUKA (%)	SCINFUL (%)
^{۱۳۷} Cs	۰٫۶۶۲	NE۱۰۲	۵٫۰۸ cm × ۵٫۰۸ cm	۲٫۵۴	۱۶٫۴۳	-----
نوترون تک انرژی	۷٫۰۳۷	BC۵۰۱ A	۵٫۰۸ cm × ۵٫۰۸ cm	۱٫۷۸	۴٫۹۵	۳٫۴۶
	۱۴٫۸	NE۱۰۲	۵٫۰ cm × ۶٫۲۵ cm	۳٫۵	۳٫۹	۱٫۳
^{۲۴۱} Am-Be	۰٫۱-۱۱	BC۵۰۱ A	۵٫۰۸ cm × ۵٫۰۸ cm	۲٫۱۳	۵٫۷۸	-----



شکل ۵. (رنگی در نسخه الکترونیکی) مقایسه پاسخ شبیه‌سازی شده با استفاده از کدهای FLUKA و MCNPX برای آشکار ساز سوسوزن BC۵۰۱A با اندازه ۲"×۲" که در معرض چشمه نوترون‌های تک انرژی ۱، ۳، ۵، ۷، ۹ و ۱۰ مگا الکترون ولت قرار گرفته است.

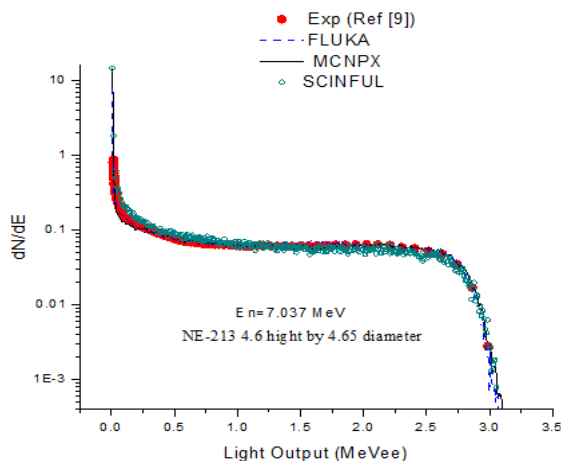
در نمودارهای شکل ۵ توزیع ارتفاع پالس برای آشکار ساز

تابش گاما با مواد به ویژه برای کد FLUKA.



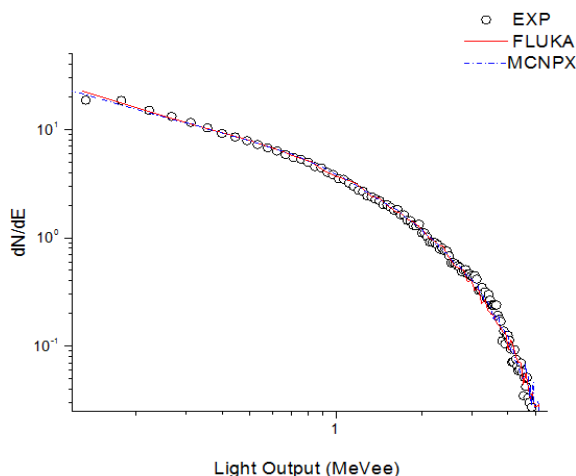
شکل ۷. (رنگی در نسخه الکترونیکی) اختلاف نسبی داده‌های شبیه‌سازی کدهای MCNPX، FLUKA و SCINFUL با داده‌های تجربی برای سوسونز مایع BC501A با هندسه استوانه‌ای به قطر ۴٫۶۵ cm و ارتفاع ۴٫۶۰ cm که در معرض نوترون‌های تک انرژی ۷٫۰۳ MeV قرار گرفته است.

در شکل ۶، نتایج شبیه‌سازی کد FLUKA با نتایج شبیه‌سازی کد MCNPX، کد SCINFUL و نتایج تجربی معتبر وربینسکی و همکاران [۹] برای آشکارساز سوسونز استوانه‌ای BC 501 A با قطر و ارتفاع ۵٫۰۸ cm در معرض چشمه نوترون تک انرژی ۷٫۰۳ MeV قرار گرفته، مقایسه نسبی شده است. این مقایسه نشان می‌دهد که شبیه‌سازی با استفاده از کدهای مذکور توافق خوبی را به جز در نواحی پایین طیف (ناحیه کم ارتفاع پالس) ارائه می‌دهد. به منظور مقایسه کمی نتایج کدهای شبیه‌سازی با نتایج تجربی در برآورد تابع پاسخ نوترونی سوسونز، اختلاف نسبی داده‌های شبیه‌سازی و تجربی محاسبه شده است. بر اساس داده‌های شکل ۶، شکل ۷ و جدول ۲، اختلاف نسبی بازدهی نور خروجی مابین نتایج شبیه‌سازی و تجربی برای کد MCNPX کمتر از ۲٪ و برای کد FLUKA کمتر از ۵٪ و برای کد SCINFUL کمتر از ۴٪ است. در شکل ۸، مقایسه نسبی نتایج شبیه‌سازی کدهای FLUKA، MCNPX و SCINFUL با نتایج تجربی نقوی و همکاران [۱۷] برای آشکارساز سوسونز NE ۱۰۲ استوانه‌ای به ارتفاع ۵ cm و شعاع ۶٫۲۵ cm که در معرض چشمه نوترونی تک انرژی

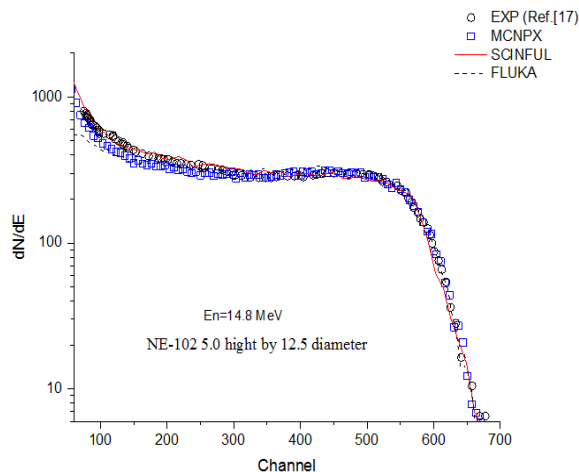


شکل ۶. (رنگی در نسخه الکترونیکی) مقایسه پاسخ شبیه‌سازی شده با استفاده از کدهای FLUKA، کد MCNPX و کد SCINFUL با نتایج تجربی برای آشکارساز سوسونز BC501A با هندسه استوانه‌ای به قطر ۴٫۶۵ cm و ارتفاع ۴٫۶۰ cm که در معرض چشمه نوترون‌های تک انرژی ۷٫۰۳ MeV قرار گرفته است.

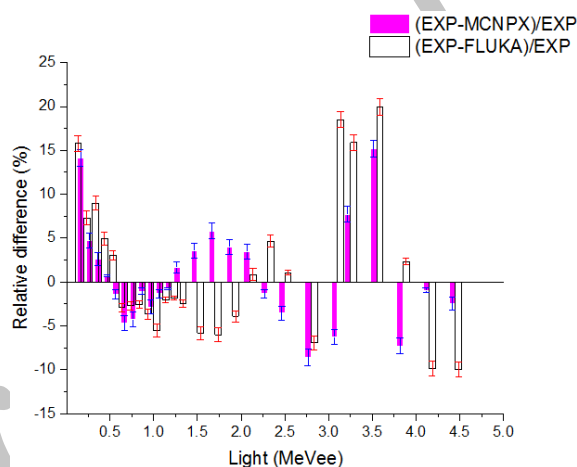
سوسونز BC501A به قطر ۵٫۰۸ cm و ارتفاع ۵٫۰۸ cm که در معرض چشمه نوترون‌های تک انرژی ۱، ۳، ۵، ۷، ۹ و ۱۰ مگا الکترون ولت قرار گرفته، با استفاده از کارت EVENTBIN کد FLUKA و کارت PTRAC کد MCNPX به دست آمده است. قسمت عمده انتهای بالای ارتفاع پالس تابع پاسخ مربوط به برخورد نوترون با اتم‌های هیدروژن است. در حالی که قسمت عمده انتهای پایین ارتفاع پالس تابع پاسخ مربوط به برخوردهای نوترون با کربن است، با افزایش انرژی نوترون به بالاتر از ۸ MeV، نور خروجی ناشی از واکنش‌های ناکشسان نوترون با کربن در ناحیه کم ارتفاع پالس تابع پاسخ مشارکت می‌کنند. برای انرژی‌های نوترون ارائه شده توافق خوبی میان توزیع ارتفاع پالس به دست آمده با استفاده از کدهای FLUKA و MCNPX وجود دارد. این نشان می‌دهد که مدل‌های فیزیکی مورد استفاده در کد FLUKA با مدل‌های فیزیکی کد MCNPX مشابه است. مقایسه نسبی طیف‌ها در شکل ۵ به طور کمی نشان می‌دهد که خطای نسبی نتایج شبیه‌سازی حاصل از دو کد در بازه انرژی نوترون ۱ MeV تا ۱۰ MeV، بین ۱٪ تا ۱۱٪ تغییر می‌کند.



شکل ۹. (رنگی در نسخه الکترونیکی) مقایسه پاسخ شبیه‌سازی شده با استفاده از کدهای FLUKA و MCNPX با نتایج تجربی برای آشکارساز سوسوزن A ۵۰۱ BC که در معرض چشمه نوترونی $^{241}\text{Am-Be}$ قرار گرفته است.



شکل ۸. (رنگی در نسخه الکترونیکی) مقایسه تابع پاسخ شبیه‌سازی شده با استفاده از کدهای FLUKA، MCNPX و SCINFUL با نتایج تجربی، برای آشکارساز سوسوزن NE ۱۰۲ استوانه‌ای به ارتفاع ۵ cm و شعاع ۶٫۲۵ cm که در معرض چشمه نوترون تک انرژی $^{241}\text{Am-Be}$ قرار گرفته است.



شکل ۱۰. (رنگی در نسخه الکترونیکی) اختلاف نسبی داده‌های شبیه‌سازی کدهای FLUKA، MCNPX با داده‌های تجربی، برای آشکارساز سوسوزن A ۵۰۱ BC با هندسه استوانه‌ای و ابعاد $2'' \times 2''$ که در معرض چشمه نوترونی $^{241}\text{Am-Be}$ قرار گرفته است.

کد SCINFUL در حدود ۱٫۵٪ است. در شکل ۹، مقادیر اندازه‌گیری شده با نتایج شبیه‌سازی کد MCNPX و کد FLUKA برای آشکارساز سوسوزن استوانه‌ای A ۵۰۱ BC با قطر و ارتفاع ۵٫۰۸ cm در معرض چشمه نوترون $^{241}\text{Am-Be}$ قرار گرفته، مقایسه نسبی شده است. این مقایسه نشان می‌دهد که نتایج شبیه‌سازی با نتایج تجربی همخوانی قابل قبولی دارد. با توجه به شکل‌های ۹ و ۱۰ و داده‌های شبیه‌سازی

$^{241}\text{Am-Be}$ قرار گرفته است، نشان داده شده است. این مقایسه‌های نسبی نشان می‌دهد که در اکثر نواحی طیف‌های تابع پاسخ هر سه کد توافق خوبی با یکدیگر و با نتایج تجربی دارند، اما در نواحی پایین طیف (ارتفاع پالس‌های کوچک) با یکدیگر و نتایج تجربی اختلاف دارند. بر اساس داده‌های شکل ۸ و جدول ۲، اختلاف نسبی مابین تابع پاسخ تجربی و شبیه‌سازی برای کد MCNPX و کد FLUKA تقریباً ۴٪ و برای

صورت تفاوت در اندازه (شدت) دو چشمه نظری و آزمایشگاهی Am-Be، خطای نسبی بیشتری به ویژه در ناحیه کم ارتفاع پالس طیف خروجی آشکارساز، ایجاد خواهد شد. با توجه به همخوانی خوب نتایج شبیه‌سازی با نتایج تجربی در اکثر نواحی طیف نورخروجی، می‌توان برای شبیه‌سازی تابع پاسخ سوسوزن‌های آلی از دو کد MCNPX و FLUKA استفاده کرد. کد FLUKA به صورت یک کد متن باز و قابل دسترس می‌باشد و انعطاف پذیری بیشتری نسبت به کد MCNPX دارد اما با توجه به قالب خروجی کارت EVENTBIN، استخراج تابع پاسخ نوترونی از این خروجی نسبت به کارت PTRAC کد MCNPX مشکل‌تر و زمان‌برتر است.

۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله ارتفاع پالس فوتونی و نوترونی سوسوزن‌های آلی پلاستیک NE۱۰۲ و مایع BC۵۰۱A با استفاده از کد MCNPX نسخه ۲/۶/۰ و کد FLUKA نسخه ۲/۳/۲۰۱۱ محاسبه شده است. هر دو کد توانمندی شبیه‌سازی برهم‌کنش‌های تابش‌های گاما و نوترون را با هسته‌های هدف به صورت رویداد به رویداد دارند از اینرو می‌توانند برای بررسی پارامترهای مؤثر بر آشکارسازی سوسوزن‌ها مورد استفاده واقع شوند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج تجربی مقایسه شده است. اختلاف نسبی بین پاسخ نوترونی تجربی و شبیه‌سازی برای کد MCNPX کمتر از ۴٪، برای کد FLUKA کمتر از ۶٪ و برای کد SCINFUL کمتر از ۴٪ است. در کارهای آینده با استفاده از کد FLUKA ترابرد فوتون‌های سوسوزنی تولید شده در داخل سوسوزن را انجام خواهیم داد.

و تجربی در اکثر نواحی طیف همخوانی خوبی با هم دارند به جز در نواحی کم ارتفاع پالس (نورهای خروجی کمتر)؛ حداکثر خطای نسبی در این نواحی کمتر از ۱۶٪ است. در اکثر نواحی طیف این خطای نسبی برای کد MCNPX کمتر از ۲٪ و برای کد FLUKA کمتر از ۵٪ است. میزان اختلاف نسبی میانگین نور خروجی (بازدهی نوری) تجربی و شبیه‌سازی برای سوسوزن مایع BC ۵۰۱ A در جدول ۲ ارائه شده است. بر اساس داده‌های جدول ۲ و شکل ۱۰ اختلاف نسبی بازدهی نور خروجی مابین نتایج شبیه‌سازی و تجربی برای کد MCNPX کمتر از ۳٪ و برای کد FLUKA کمتر ۶٪ است. این مقایسه‌های نسبی نشان می‌دهند که هر دو کد MCNPX و FLUKA برای چشمه‌های تک انرژی نوترون و چشمه Am-Be، در ناحیه کم ارتفاع طیف تابع پاسخ شبیه‌سازی شده، همخوانی کمتری با نتایج تجربی دارند که این می‌تواند ناشی از عوامل زیر باشد:

۱. قسمت عمده انتهای پایین ارتفاع پالس تابع پاسخ مربوط به واکنش‌های نوترون با کربن (ذرات آلفا ناشی از واکنش‌های (n, α) ، (n, α) و کربن‌های پس زده) می‌باشد [۱۴]. این واکنش‌های نوترون با کربن در شبیه‌سازی با کد FLUKA در نظر گرفته نشده‌اند و در کد MCNPX به درستی مدل نشده‌اند.
۲. طیف انرژی چشمه Am-Be با تغییراندازه چشمه تغییر می‌کند، به طوری که شدت نوترون‌های با انرژی کمتر از ۹ MeV برای چشمه بزرگ‌تر، بیشتر است. این طیف در انرژی‌های بالاتر از ۹ MeV، با تغییر اندازه چشمه تغییر نمی‌کند، به جز در حوالی قله‌ای با انرژی ۳/۲ MeV که شدت (فراوانی) این قله برای چشمه با اندازه بزرگ‌تر، کمتر است [۱۲]. نوترون‌های با انرژی کمتر از ۹ MeV می‌توانند حداکثر ۲ MeV نور تولید کنند. بنابراین در

مراجع

3. R E Textor, V V Verbinski, O5S: a Monte Carlo code for calculating the pulse-height distributions due to mono-energetic neutrons on organic scintillators, Oak Ridge National Laboratory, ORNL-4160 (1968).
4. A Borio di Tigliole, A Cesana, R Dolfini, A Ferrari,
1. G F Knoll, "Radiation Detection and Measurement", John Wiley & Sons (2000).
2. J K Dickens, SCINFUL: A Monte Carlo based computer program to determine a scintillator full energy response to neutron, Report ORNL-6463, Oak Ridge (1988).

- International Organization for Standardization; ISO-8529-1 (2001).
12. J W Marsh, D J Thomas, and M Burke, *Nucl. Instr. Meth.*, A **366** (1995) 340.
 13. G Battistoni *et al.*, The FLUKA code: Description and benchmarking, AIP Conference Proceeding. **896** (2007) 31.
 14. J S Hendricks *et al.*, MCNPX 2.6.0 Extensions, Los Alamos National Laboratory, Report LA-UR, 08-2216, (2008).
 15. M Tajik, N Ghal-Eh, G R Etaati, and H Afarideh., *Nucl. Instr. Meth.*, A **704** (2013) 104.
 16. H H Knox and T G Miller., *Nucl. Instrum. Meth.*, **101** (1972) 519.
 17. A A Naqvi *et al.*, *Nucl. Instr. and Meth.*, A **345** (1994) 514.
 - G L Raselli, P Sala, and M Terrani, *Nucl. Instrum. Meth.*, A **469** (2001) 347.
 5. K Schweda and D Schmidt, *Nucl. Instrum. Meth.*, A **476** (2002) 155.
 6. M Gohil *et al.*, *Nucl. Instrum. Meth.*, A **664** (2012) 304.
 7. S Naeem *et al.*, *Nucl. Instrum. Meth.*, A **714** (2013) 98.
 8. ZHANG Su-Ya-La-Tu *et al.*, *Chinese Physics C* **37** (2013) 12.
 9. V V Verbinski *et al.*, *Nucl. Instr. Meth.*, **65** (1968) 8
 10. R A Cecil, B D Anderson, and R Madey, *Nucl. Instr. and Meth.* **161** (1979).
 11. International Standards Organization. Reference neutron radiations-Part I: Characteristics and methods of production. Geneva, Switzerland:

Archive of SID