مجله علوم و فنون هسته‌ای، جلد ۱۰۰، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۱

Journal of Nuclear Science and Technology
Vol. 100, No. 3, 2022

مطالعه پاسخ دزیمتری آشکارساز NaI(Tl) مبتنی بر روش طیف‌نگار- دزیمتری با استفاده از کد MCNPX

سید مرتضی طاهری بالانجی[۱]، حسین ذکی دیزجی[۲]، اکبر عبدی سرای[*۱]

۱. گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه ارومیه، صندوق پستی: ۱۶۵، ارومیه - ایران

۲. گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، صندوق پستی: ۱۶۹۸۷۱۵۴۶۱، تهران - ایران

*Email: ak.abdi@urmia.ac.ir

مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۱۲/۱۸ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۲/۷

چکیده

اندازه‌گیری پرتو گاما در زمینه‌های مختلف تحقیقاتی نیازمند آشکارسازهای کارآمد است. در زمینه دزیمتری فوتون آشکارساز جرقه‌ای NaI(Tl) به عنوان یکی از آشکارسازهای سوسوزن معدنی (غیرآلی)، به علت دارا بودن مقدار بالای نور خروجی بسیار حایز اهمیت است. در این پژوهش سعی گردیده است، با کمک کد مونت‌کارلو (MCNPX) مقدمات مشخصه‌یابی دزیمتری فوتون توسط آشکارساز NaI(Tl) و با بهره‌گیری از روش‌های متفاوت محاسبه دز (تالی‌های F۶، F۴*، F۶+ و F۸*) انجام شود. به طور معمول، خروجی یک آشکارساز تابش (شمارش تعداد پالس‌ها) برای تعیین مقدار دز تابش قابل استفاده نیست. بنابراین با استفاده از روش طیف‌نگار- دزیمتری مبتنی بر روش نرم‌افزاری، برای یافتن ضرایب تبدیل طیف آشکارساز به مقدار کرما هوا در این پژوهش ارایه شده است. در این روش برای یافتن پاسخ دزیمتری تابش با استفاده از شبیه‌سازی کد MCNPX تابع پاسخ یک آشکارساز سوسوزن NaI(Tl) 3"×3" برای چندین تابش مشخص گاما تعیین و سپس توابع ضرایب تبدیل وابسته به انرژی برای محاسبه دز محاسبه گردید. در نهایت، با مقایسه نتایج به دست آمده از داده‌های اندازه‌گیری شده و محاسبات شبیه‌سازی نشان داده شد که روش ارایه شده از دقت بالایی در دزیمتری فوتون برخوردار است.

کلیدواژه‌ها: آشکارسازهای سوسوزن، دزیمتری فوتون، کد MCNPX، ضرایب تبدیل

Study of NaI(Tl) detector dosimetry response based on Spector-Dosimetry method using MCNPX code

S.M. Taheri Balanoji[1], H. Zaki Dizaji[2], A. Abdi Saray*[1]

1. Physics Department, Faculty of Science, Urmia University, P.O.Box: 165, Urmia - Iran

2. Physics Department, Faculty of Science, Imam Hossein Comprehensive University, P.O.Box: 169871561, Tehran - Iran

Research Article

Received 8.3.2021, Accepted 27.4.2021

Abstract

Gamma ray measurement in various research fields requires high efficient detectors. In photon dosimetry, NaI(Tl) scintillation detector as one of the inorganic scintillation detector is noticeable, due to have the high amount of light output. In this study, the basics determination of photon dosimetry for the NaI(Tl) scintillation detector utilizing the Monte Carlo code (MCNPX) and using different methods of dose calculation (tally F6, * F4, + F6 and * F8) is studied. Regularly, the output of a radiation detector (counting the number of pulses) cannot be used to determine the radiation dose value. Therefore, in this study the spectro-dosimetry method based on software method is used to find out the value of the conversion coefficients to convert the detector spectrum to the value of air karma. In this method, the radiation dosimetry response is obtained with use of the MCNPX code simulation. The response function of the NaI(Tl) 3"×3" scintillation detector for several specific gamma rays was determined and then the functions of energy dependent conversion coefficients for calculating the dose values were obtained. Finally, with comparison of the measured data and simulation calculations results it is shown that the proposed method has a high accuracy in photon dosimetry.

Keywords: Scintillation detectors, Photon dosimetry, MCNPX code, Conversion coefficients

۱. مقدمه

امروزه آشکارسازهای تابشی به طور گسترده‌ای در زمینه‌های مختلف همچون پزشکی، صنعت، و فیزیک هسته‌ای برای شناسایی پرتوهای یون‌ساز و همچنین حفاظت در مقابل پرتو نقش اساسی را ایفا می‌کنند [۱-۵]. لذا برای پایش و مطلع بودن از میزان دز تابشی و انجام اقدامات مربوط به حفاظت، ایمنی و سلامت افراد، توسعه روش و ابزارهای دزیمتری برای اندازه‌گیری و نمایش میزان دز دریافتی این تابش‌ها لازم و ضروری می‌باشد.

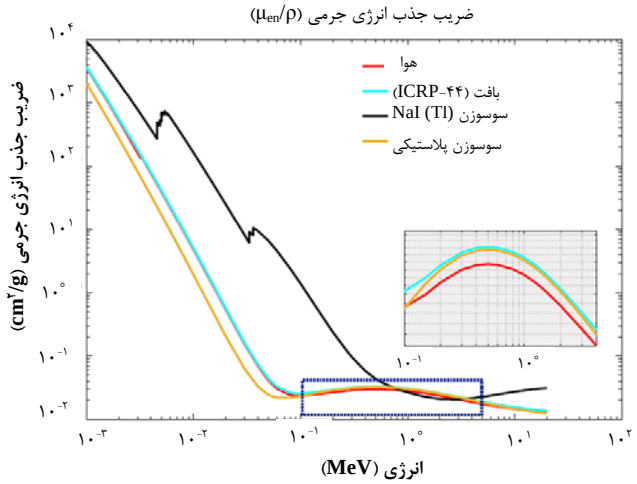
ابزارهای دزیمتری تابش از نوع دزیمترهای تجمعی (دزیمترهای فیلم بج و دزیمترهای ترمولومینسانس (TLD[1])) به دلیل عدم نمایش میزان دز تابش در زمان حقیقی، کم‌تر مورد استفاده قرار می‌گیرند. ولی دزیمترهای حالت پالسی هم چون شمارش‌گر گایگر، آشکارسازهای سوسوزن و آشکارسازهای نیمه‌هادی که با تفسیر سیگنال‌های خروجی آن‌ها توانایی محاسبه مقدار دز جذبی در زمان حقیقی امکان‌پذیر است [۶]. هر کدام از ابزارهای دزیمتری با وجود داشتن مزیت‌های زیاد، برخی معایب و محدودیت‌هایی نظیر عدم پاسخ دزیمتری مناسب در انرژی‌های مختلف را دارا هستند.

فرایند سوسوزنی یکی از مفیدترین روش‌های موجود برای آشکارسازی و طیف‌نگاری مجموعه بزرگی از تابش‌ها می‌باشد [۱، ۷]. در سوسوزن توزیع انرژی فوتون‌ها به طور غیرمستقیم از طریق توزیع ارتفاع پالس حاصل از نور خروجی برهم‌کنش‌های گاما در داخل آشکارساز به دست می‌آید. برآورد مناسب از برهم کنش تابش‌های گاما با مواد سوسوزنی و تولید ذرات ثانویه باردار و متعاقب آن تولید نور در انرژی‌های مختلف گاما یک عامل مهم در محاسبه تابع پاسخ سوسوزنی است [۵]. بنابراین، طیف انرژی این نوع آشکارسازها توانایی برآورد کمیت‌های دزیمتری (مانند: کرمای هوا (K) و معادل دز محیطی ((۱۰)*H)) از طریق یک فرایند تبدیل را دارا هستند.

وقتی صحبت از اندازه‌گیری دز جذبی در معادل بافت انسان است، سوسوزن‌های پلاستیکی (آلی) که غالباً داری ترکیب هیدروژن و کربن هستند، به دلیل ضریب جذب انرژی جرمی مشابه با بافت انسان در مقایسه با سوسوزن‌های غیرآلی مواد مناسبی برای دزیمتری حالت پالسی هستند. ولی به دلیل پایین بودن نور خروجی سوسوزن‌های پلاستیکی و بازدهی کم در انرژی‌های بالا یا اندازه‌گیری مقدار نرخ دزهای کم، به حجم بزرگی از این نوع سوسوزن نیاز است [۸].

آشکارسازهای سوسوزن معدنی، مثل آشکارساز سوسوزن یدور سدیم با ناخالصی تالیم NaI(Tl) کاربردهای زیادی در بخش‌های صنعت و پزشکی دارد. آشکارساز NaI(Tl) به علت دارا بودن پاسخ بسیار خوب به پرتو گاما برای تجزیه و تحلیل طیف مواد پرتوزا [۹]، اندازه‌گیری آلودگی رادیواکتیو و تصویربرداری از بدن در تجهیزات پزشکی هسته‌ای و در زمینه‌هایی همچون حفاظت پرتو و دزیمتری به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۰-۱۲]. شکل ۱ ضرایب جذب انرژی جرمی[2] بافت انسان، سوسوزن پلاستیکی، سوسوزن معدنی NaI(Tl) و هوا بر گرفته از سند NIST را نشان می‌دهد [۱۳، ۱۴]. به دلیل اهمیت ضریب جذب انرژی جرمی فوتون در دزیمتری، رفتار سوسوزن NaI(Tl) فقط دربازه انرژی فوتون ۵۰۰ تا ۴۰۰۰ کیلو الکترون ولت مشابه معادل بافت انسان است.

سازمان بین‌المللی واحدها و اندازه‌گیری‌های تابش (ICRU[3]) مجموعه‌ای از کمیت‌های قابل اندازه‌گیری که برای سنجش دزیمتری در تابش‌دهی فردی یا محیطی مناسب هستند (مانند کرمای هوا، معادل دز محیطی یا فردی و غیره) را بیان نموده است [۱۵]. ضرایبی که برای تبدیل کرمای هوا به دز جذب شده اندام‌ها مورد نیاز است، توسط سند ICRP-۷۴ گردآوری و بیان گردیده است [۱۶]. چند نمونه از ضرایب تبدیل برای محاسبه دز جذبی اندام های مختلف بدن که در گزارش ICRP-۷۴ آورده شده، در شکل ۲ نشان داده شده است.

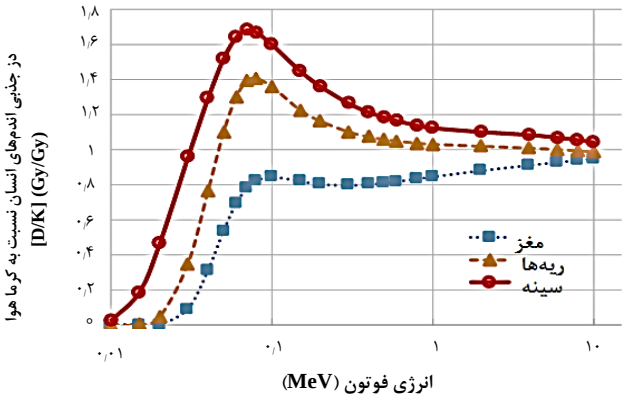


شکل ۱. ضریب جذب انرژی جرمی سوسوزن پلاستیکی، بافت انسان، هوا، و سوسوزن NaI(Tl) [۱۳، ۱۴].

1. Thermoluminescent Dosimeter

2. Mass Energy Absorption Coefficients

3. International Commission on Radiation Units and Measurements



شکل ۲. ضرایب تبدیل کرما برای محاسبه دز جذبی چند نمونه از اندام‌های انسان طبق سند ICRP-۷۴ در هندسه تابش AP [۱۶].

محاسبه دز جذبی اندام‌های انسان با استفاده از نمایش‌گر طیف‌سنجی پرتو گاما نیازمند شار پرتو گامای محیطی است، بنابراین، به دلیل وجود رابطه خطی بین تعداد شمارش شده از طیف اندازه‌گیری شده و مقدار کرمای هوا ایجاد شده از این تعداد [۱۷]، می‌توان مقدار کرمای هوا را توسط طیف خروجی آشکارساز محاسبه نمود.

در این مقاله، تعیین آهنگ کرمای هوا ناشی از چشمه‌های پرتوزا گاما با استفاده از توابع ضرایب تبدیل وابسته به انرژی، به منظور داشتن دقت بالا و کاهش مقدار خطا در محاسبات پاسخ دزیمتری با کمک روش نرم‌افزاری تعیین شد. به عنوان مثال در فیلم بج با قرار دادن فیلترهای مختلف سعی به بازه‌بندی انرژی و محاسبه ضریب هر بازه انرژی برای بهبود پاسخ دزیمتری با کمک روش سخت‌افزاری انجام گیرد. بدین‌منظور در این مطالعه با استفاده از کد MCNPX، به بررسی و نحوه محاسبه دز تابشی (تالی‌های مختلف) و پاسخ دزیمتری فوتونی در انرژی‌های مختلف برای سوسوزن‌های مختلف و هم‌چنین محاسبه تابع پاسخ آشکارساز سوسوزن NaI(Tl) با ابعاد "۳×"۳ به وسیله شبیه‌سازی طیف انرژی ذخیره شده در آشکارساز توسط چشمه‌های مختلف پرتوزا پرداخته شده است. روش ارایه شده در این مطالعه، دست‌یابی به پاسخ دزیمتری فوتون بر اساس روش طیف‌نگار- دزیمتری [۱۸]، مبتنی بر روش دزیمتری نرم‌افزاری برای تبدیل کردن طیف خروجی آشکارساز NaI(Tl) با کمک توابع ضرایب تبدیل ارتفاع پالس طیف که حاصل از برازش داده‌های محاسبه شده از ضرایب تبدیل در بازه انرژی ۴۰ تا ۳۰۰۰ الکترون ولت به منظور کاهش ضریب خطا محاسبه شده مقدار کرمای هوا است.

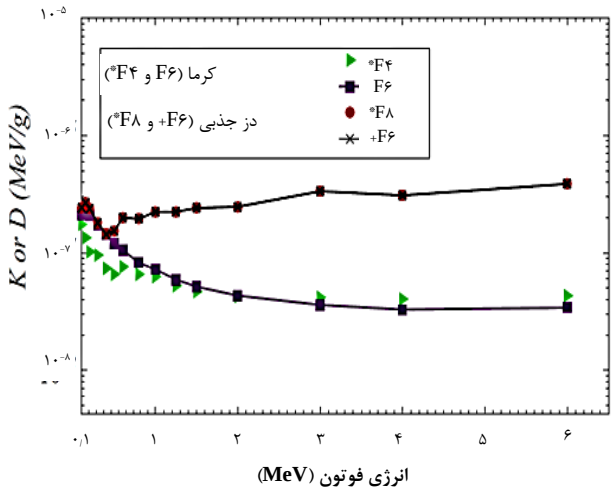
۲. مطالعات شبیه‌سازی

در این پژوهش از شبیه‌سازی کد مونت‌کارلو MCNPX برای انجام محاسبات استفاده گردید [۱۹]. با توجه به این که پاسخ دزیمترهای فوتون به طور قابل‌ملاحظه‌ای در گستره وسیع انرژی تغییر می‌یابد. تابع پاسخ دزیمتر فوتون به شکلی استخراج باید گردد که متناسب با ضرایب تبدیل شار به دز باشد. از مسایل مهم در تعریف دزسنج‌ها در کد مونت‌کارلو، انتخاب تالی مناسب و درست است. تالی‌های F۶ و F۴* در حالت فوتونی تخمین‌گر کرما[1] هستند نه دز جذبی[2]. ولی در صورت شرایط تعادل ذرات باردار (الکترون‌ها) و ناچیز بودن تابش ترمزی، کرما تخمین بسیار خوبی برای دز جذبی خواهد بود (انرژی‌های پایین). تالی F۴* تخمین‌گر شار انرژی فوتونی با استفاده از طول مسیر آن‌ها در سلول است که با استفاده از کارت‌های DE و DF نتایج آن در ضرایب جذب انرژی جرمی ماده ضرب می‌شود. نتایج این تالی به دلیل استفاده از محاسبات طول مسیر ذرات و هم‌چنین توان توقف ذرات در ماده با حجم‌های کوچک با نتایج تالی F ۶ ممکن است دارای کمی اختلاف باشد. تالی‌های F۶+ و F۸* دز جذبی الکترون (بدون تقریب کرما) را محاسبه می‌کنند. به طوری که نوع محاسبات در تالی F۶+ مشابه تالی F۶ بوده ولی تالی F۸* یک تخمین‌گر سطحی از انرژی ذخیره شده در سلول است، که با تقسیم نتایج این تالی بر جرم سلول دز جذبی حاصل می‌شود. برخلاف تالی‌های F۶ و F۶+ که به نوع برهم کنش وابسته هستند، این تالی فقط به انرژی ذره وابسته است. به همین منظور نتایج تالی‌های مختلف که قادر به محاسبه مقدار دز جذبی هستند، برای ماده سوسوزن NaI(Tl) به ابعاد ۱×۱×۱ سانتی‌متر با یک چشمه سطحی دایره‌ای موازی به شعاع ۱۵ سانتی‌متر و در فاصله ۵۰ سانتی‌متری از سطح ماده دزسنج، مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۳). تاریخچه ذرات تا جایی دنبال شده‌اند که خطای نسبی محاسبات MC برای پرتوهای موازی فوتونی که در فاصله ۵۰ سانتی‌متری از ماده دزسنج واقع شده‌اند، کم‌تر از ۰٫۲ درصد باشد (10^{8} ذره). مطابق انتظار نتایج تالی‌های برآورد کرما (F۶ و F۴*) و دز جذبی (F۶+ و F۸*) تقریباً در انرژی‌های پایین برهم منطبق هستند و با افزایش انرژی فوتون دیگر تقریب کرما برقرار نبوده و نتایج تالی‌ها از یک دیگر فاصله می‌گیرند. به عبارت دیگر در انرژی‌های بالا، فرضیه‌ی تعادل الکترونیکی و انتقال انرژی ذخیره شده در محل با ذرات ثانویه (تالی F۶) دقیق نیست و تقریب کرما پایین‌تر از

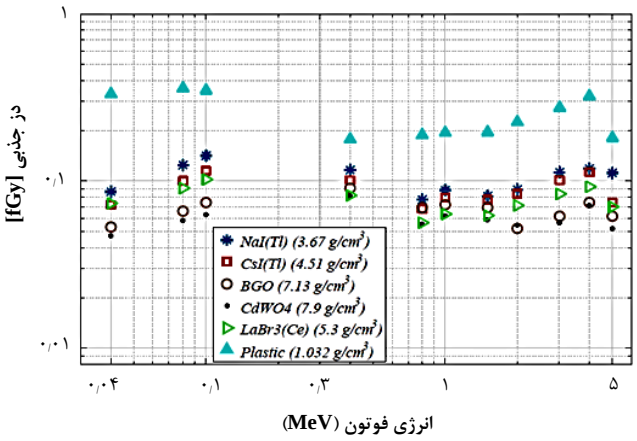
4. Kerma Approximation
2. Absorbed Dose Approximation

تقریب دز جذبی قرار می‌گیرد. استفاده از هر کدام از این تالی‌ها به انرژی چشمه وابسته بوده و اگر بازه انرژی چشمه در محدوده تقریب کرما باشد، استفاده از نتایج تالی‌های ذکر شده امکان‌پذیر است در غیر این صورت تنها می‌توان از دو تالی F۶+ و F۸* برای محاسبه دز جذبی استفاده نمود.

شکل ۴ پاسخ دزیمتری فوتون (تالی F۶+) در بازه انرژی ۴۰ تا ۵۰۰۰ کیلو الکترون ولت برای تخمین دز جذبی توسط دزسنج‌های سوسوزن با فانتوم مشابه (مکعبی با حجم یک سانتی‌متر مکعب) را نشان می‌دهد. منحنی پاسخ دزیمتری فوتون در انرژی‌های مختلف برای تمام دزسنج‌های سوسوزن تقریباً مشابه بوده و این اختلاف به دلیل متفاوت بودن چگالی جرمی مواد دزسنج‌ها حاصل شده است.



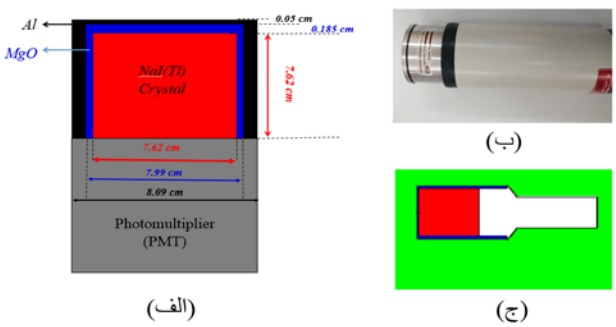
شکل ۳. مقایسه بین نتایج تالی‌های مختلف در کد MCNPX که قادر به تخمین دز برای دزسنج NaI(Tl) هستند.



شکل ۴. پاسخ دزیمتری فوتون (تالی F۶+) در انرژی‌های مختلف برای مواد مختلف دزسنج سوسوزن [۱، ۳، ۸، ۱۲].

در یک دزیمتر ایده‌آل تابع پاسخ آشکارساز متناسب با تابع تبدیل شار به معادل دز است. تابع پاسخ آشکارساز مفهوم مهمی است که باید برای اندازه‌گیری طیف انرژی در نظر گرفته شود. برای شبیه‌سازی تابع پاسخ سوسوزن‌ها باید نور سوسوزنی حاصل از برهم‌کنش ذرات باردار ثانویه تولید شده و به ازای هر ذره ورودی به آشکارساز محاسبه شود. با توجه به رابطه خطی میان انرژی الکترون و نور آن در سوسوزن‌ها، انرژی به جا گذشته از ذرات باردار در سوسوزن معادل نور الکترون آن است. بنابراین، دیگر برای محاسبه دز جذبی از طریق انرژی ذخیره شده در حجم حساس آشکارساز از تالی F۸* استفاده ننموده بلکه از تخمین‌گر تالی F۸ که برای شبیه‌سازی پالس‌های تولید شده در طیف خروجی آشکارساز، که از شمارش‌های ثبت شده در هر کانال متناظر با انرژی‌های مختلف به ازای یک پرتو منفرد گامای ورودی محاسبه می‌شود، استفاده خواهیم نمود و در نهایت به صورت طیف انرژی که توزیع آن‌ها بر اساس ارتفاع پالس است (انرژی ذخیره شده)، تعیین می‌گردد.

مطالعات بسیاری به منظور شبیه‌سازی تابع پاسخ آشکارساز سوسوزن NaI(Tl) توسط کدهای مختلف مونت کارلویی انجام گرفته است [۲۰-۲۲]. در این پژوهش، دزیمتری فوتون بر پایه‌ی تجزیه و تحلیل پالس‌های الکترون‌های ثانویه‌ی ناشی از برهم‌کنش گامای فرودی با ماده (اثرات فوتوالکتریک، کامپتون، و تولید زوج) در حجم حساس آشکارساز "۳×۳" NaI(Tl) توسط انرژی ذخیره شده، که متناسب با ارتفاع پالس هستند به کار گرفته شده است. هندسه شبیه‌سازی شده در کد MCNPX و آشکارساز مورد استفاده در آزمایشگاه که استوانه‌ی NaI(Tl) با چگالی (g/cm³) ۳٫۶۷ به عنوان حجم حساس و احاطه شده توسط لایه MgO با چگالی (g/cm³) ۳٫۵۸ و Al با چگالی (g/cm³) ۳٫۶۷، در شکل ۵ نشان داده شده است.

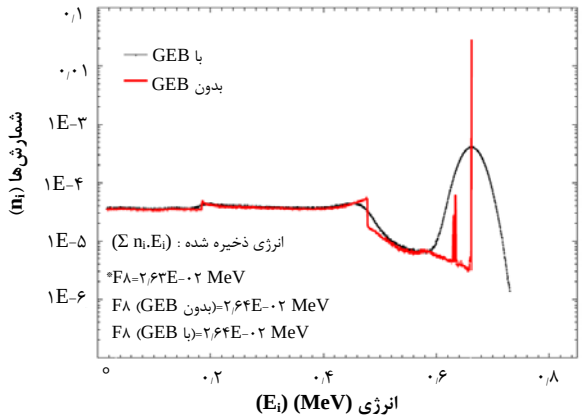


شکل ۵. طرح‌واری از سطح مقطع آشکارساز NaI(Tl) به صورت، الف) دو بعدی، ب) تجربی و ج) شبیه‌سازی شده توسط کد MCNPX.

به دلیل مشکل و پیچیده بودن شبیه‌سازی تکثیرکننده فوتونی، از استوانه‌ی تو خالی از جنس Al استفاده گردید [۲۳]. از آن‌جایی که بازده نوری در آشکارساز سوسوزن NaI(Tl) کاملاً یکنواخت نبوده، بنابراین دامنه پالس خروجی ایجاد شده توسط آشکارساز سوسوزن باعث پهن‌شدگی فوتوپیک طیف اندازه‌گیری شده خواهد شد. این گسترش با توجه به نوسانات آماری در هر مرحله از فرایندهای ایجاد پالس از جمله: نوسانات آماری در نور تولید شده در بلور برای پرتو گاما در همان انرژی (تضعیف فوتون در سوسوزن)، نوسانات آماری تعداد بارهای جمع‌آوری شده در آند تکثیرکننده فوتونی (نایکنواختی سطح فوتوکاتد و تکثیر الکترون در زنجیره داینودی)، و هم‌چنین اثرات نوفه (نویز) الکتریکی حاصل از دستگاه‌های الکترونیکی باعث تغییر نتایج فرایند طیف در شکل‌گیری قله طیف می‌شود، را می‌توان با عملکرد تابع گوسی با اندازه‌گیری پهنای کامل در نیم‌بیشینه (FWHM) فوتوپیک طیف اندازه‌گیری شده تخمین زد. لازم به ذکر است که کد مونت‌کارلو (MCNPX) قادر به شبیه‌سازی عواملی که باعث گسترش انرژی گوسی هستند را نمی‌باشد، ولی با این وجود گسترش انرژی را می‌توان با انتخاب کارت شبیه‌سازی انرژی گوسی (GEB) برای بازیابی نوسانات آماری در فوتوپیک با محوریت انرژی و پیچش یک تابع گوسی در طیف خروجی شبیه‌سازی نمود. در کد MCNPX، این گسترش توسط تابع FWHM تعریف می‌شود [۲۴]:

$$FWHM = a + b\sqrt{E + cE^{2}} \qquad (۱)$$

در این‌جا a، b و c پارامترهای برازش رابطه (۱) با داده‌های تجربی هستند. در نتیجه برای مقایسه طیف تجربی لازم است توزیع گاوسی در داده‌های شبیه‌سازی با در نظر گرفتن متغیر برازش با مقادیر a= -۰٫۰۰۳ MeV، b= -۰٫۰۵۸$\sqrt{MeV}$ و c= -۰٫۱۹۱MeV^{-1} برای پاسخ داده‌های شبیه‌سازی شده آشکارساز در نظر گرفته شود. تأثیرات گسترش فوتوپیک برای توزیع ارتفاع پالسی چشمه نقطه‌ای ^{137}Cs برای آشکارساز سوسوزن NaI(Tl) با در نظر گرفتن و نگرفتن کارت GEB در شکل ۶ نشان داده شده است. خط طیف در انرژی ۶۶۲ کیلو الکترون ولت نشان‌دهنده قله انرژی کامل و خط طیف در انرژی ۶۳۴ کیلو الکترون ولت مربوط به فرار اشعه ایکس ید موجود در ساختار بلور است [۱].



شکل ۶. توزیع ارتفاع پالس چشمه نقطه‌ای ^{137}Cs در کد MCNPX با در نظر گرفتن تابع گسترش انرژی گوسی (GEB).

۳. تئوری روش دزیمتری

پاسخ دزیمترهای فوتونی به طور قابل‌ملاحظه‌ای در بازه‌های انرژی تغییر می‌یابد (شکل ۴). لذا پاسخ شار آشکارساز متفاوت از پاسخ دز فوتون آن می‌باشد، به همین دلیل روش‌های مختلف سخت‌افزاری و نرم‌افزاری برای دست‌یابی به پاسخ دزیمتری مناسب برای تعیین مقدار دز تابشی توسط آشکارسازها به کار برده می‌شوند [۲۵، ۲۶]. در روش‌های سخت‌افزاری لایه‌هایی به عنوان تعدیل‌کننده، جبران‌کننده، کندکننده، و غیره [۲۷، ۲۸] در پیرامون آشکارساز اضافه می‌گردد تا تغییری در تابع پاسخ آشکارساز داده شود. ولی در برخی از دزیمترها به دلیل محدودیت در حجم و وزن، استفاده از این لایه‌ها وجود نداشته و باعث خطا نسبتاً زیادی در نتیجه پاسخ دزیمتری می‌شود. در روش‌های نرم‌افزاری نیز فرایندهای داده‌برداری و پردازش آن‌ها مانند بازیابی [۲۹]، تهی کردن [۳۰]، واپیچش [۳۱]، داده برداری گزینشی [۲۵] و غیره استفاده می‌شود. روش طیف‌نگار- دزیمتری [۱۸] با اعمال داده‌برداری از خروجی آشکارساز باعث تغییر در پاسخ ذاتی آشکارساز و پاسخ اصلاح شده آشکارساز متناسب با تابع تبدیل شار به معادل دز می‌شود، که در نهایت باعث ایجاد یک ارتباط منطقی بین خروجی آشکارساز با مقدار معادل دز تابشی خواهد شد.

در زمینه دزیمتری، اندازه‌گیری انرژی جذب شده از پرتو، بسیار اهمیت دارد. شدت کرمای هوا که معیاری از شدت چشمه پرتوزا گاما است، بر حسب نرخ کرمای هوا در راستای محور عمود بر چشمه در فضای آزاد مشخص می‌شود. از آن‌جایی که این پژوهش بر پایه روش طیف‌نگار- دزیمتری، تجزیه و تحلیل اطلاعات طیف تابش گاما برای یافتن نرخ مقدار کرما هوا استوار است، پس آشکارساز سوسوزنی که برای این روش دزیمتری

مورد استفاده قرار می‌گیرد، هم‌چون آشکارساز سوسوزن NaI(Tl)، باید زمان واپاشی کم، بازده انرژی خوب، قدرت تفکیک بالا و قیمت مقرون به صرفه‌ای را داشته باشد.

اساس روش طیف‌نگار- دزیمتری، تقسیم کردن طیف خروجی آشکارساز به چندین بازه انرژی برای محاسبه ضرایب تبدیل (w_i) است. در این روش با توجه به نسبت تقریباً ثابت بین انرژی جذبی جرمی بلور NaI(Tl) و هوا در بازه انرژی ۵۰۰ تا ۳۰۰۰ کیلو الکترون ولت (شکل ۱)، کل انرژی ذخیره شده در آشکارساز با یک ضریب ثابت منحصر به فرد متناسب با کرمای هوا خواهد بود. ولی در انرژی‌های پایین به دلیل اثر فوتوالکتریک بلور، دیگر این نسبت ثابت نبوده و دیگر این ضریب ثابت تبدیل بین انرژی ذخیره شده در آشکارساز و کرما در هوا قابل استفاده نخواهد بود. برای حل این مشکل، طیف خروجی آشکارساز به چندین بازه انرژی تقسیم شده و برای هر بازه، ضریب تبدیل کالیبره‌شده‌ای اعمال می‌شود. در نهایت ارتباط بین کرمای هوا و انرژی ذخیره شده در آشکارساز به صورت رابطه زیر بیان می‌شود [۱۸]:

$$K = \sum_{i=1}^{b} \omega_i n_i E_i \qquad (۲)$$

در این رابطه، b تعداد بازه انرژی، w_i ضریب تبدیل در بازه انرژی i و $(E_i.n_i)$ انرژی ذخیره شده مربوط به ناحیه i است، به طوری که هر بازه انرژی شامل چندین کانال انرژی از طیف ارتفاع پالس حاصل شده از آشکارساز است. با توجه به ضرایب تبدیل کرمای هوا برای فوتون‌های تک انرژی پیشنهاد شده توسط سند ICRP-۷۴، این ضرایب تبدیل w_i توسط شبیه‌سازی مونت‌کارلو قابل محاسبه هستند.

رابطه‌ی (۲)، مجموعه‌ای از معادلات خطی است، هنگام محاسبه w_i بعدی در بازه انرژی بالاتر w_i اندازه‌گیری شده قبلی را نیز باید در نظر گرفت، زیرا برخی از فوتون‌ها تنها بخشی از انرژی خود را در آشکارساز به دلیل فرایندهای مختلف پراکندگی ذخیره می‌کنند. برای حل آن از روش تجزیه چولسکی[1] استفاده شده است [۳۲]. بنابراین، راه حل کلی برابر:

$$\omega_i = \frac{K_i - \sum_{j=1}^{i-1} n_{ij} E_j \omega_j}{n_{ii} E_i} \qquad (۳)$$

در مورد رابطه‌ی (۳) لازم به ذکر است، K_i ضرایب تبدیل کرمای هوا مربوط به فوتون‌های تک انرژی پیشنهاد شده توسط سند ICRP-۷۴ است. انتخاب این بازه‌های انرژی باید طوری باشد که در هر ناحیه انرژی، حداقل یک خط انتشار قوی وجود داشته باشد. اگر چشمه‌ای با خط انتشار در کم‌ترین انرژی تابش شده، توسط آشکارساز قابل طیف‌سنجی باشد، اولین ضریب تبدیل انرژی (w_1) به دست خواهد آمد. بنابراین برای محاسبه w_i های بعدی، باید مقدار کرما هوا از قسمت انرژی پایین طیف که در آن w_i از قبل تعیین شده است محاسبه و از کل دز تابشی در آشکارساز کم گردد. هم‌چنین لازم به ذکر است، این روش نرم‌افزاری دزیمتری به دلیل سهولت و عدم پیچیدگی نسبت به روش‌های دیگر نرم‌افزاری در زمینه دزیمتری مورد توجه قرار می‌گیرد.

مقادیر ضرایب تبدیل (w_i) محاسبه شده برای آشکارساز سوسوزن NaI(Tl) با ابعاد "۳×"۳ در جدول ۱ آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تعداد ضرایب تبدیل، یا به عبارت دیگر تعداد بازه‌های انرژی انتخابی برابر با تعداد چشمه‌های فوتونی استفاده شده است.

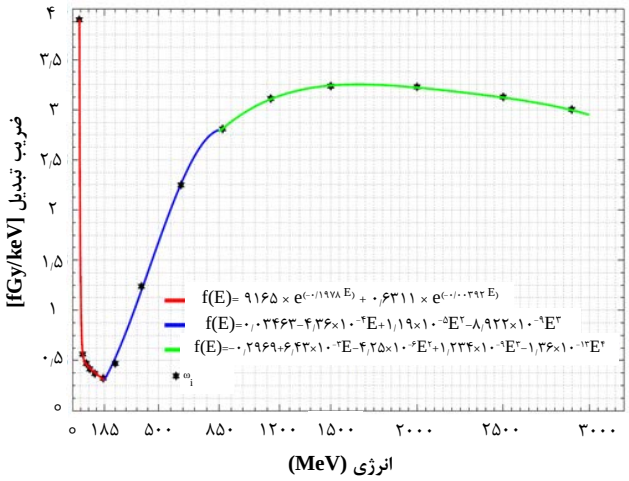
شکل ۷ نشان‌دهنده توابع مختلف برازش در سه بازه انرژی: کم‌تر از ۱۸۵ کیلو الکترون ولت، از ۱۸۵ تا ۸۵۰ کیلو الکترون ولت، و بالاتر از ۸۵۰ کیلو الکترون ولت که توسط مقادیر محاسبه شده ضرایب تبدیل (w_i) برای آشکارساز سوسوزن NaI(Tl)، محاسبه و معرفی گردیده است. با استفاده از توابع برازش، رابطه‌ی (۲) را می‌توان به صورت زیر بازنویسی نمود:

$$K = \sum_{i=1}^{b} \omega_i (E_i) n_i E_i \qquad (۴)$$

جدول ۱. ضرایب تبدیل (w_i) محاسبه شده برای آشکارساز سوسوزن NaI(Tl)

انرژی فوتون (keV)	بازه انرژی (keV)	ضرایب تبدیل (w_i) (pGy/keV)
۴۰	۲۵-۵۵	۳٫۸۹×۱۰$^{-3}$
۶۰	۵۵-۶۵	۵٫۶۲×۱۰$^{-4}$
۸۰	۶۵-۹۵	۴٫۷۲×۱۰$^{-4}$
۱۰۰	۹۵-۱۰۵	۴٫۱۹×۱۰$^{-4}$
۱۳۰	۱۰۵-۱۵۵	۳٫۶۷×۱۰$^{-4}$
۱۸۰	۱۵۵-۲۰۵	۳٫۲۰×۱۰$^{-4}$
۲۵۰	۲۰۵-۲۹۵	۴٫۷۳×۱۰$^{-4}$
۴۰۰	۲۹۵-۵۰۵	۱٫۲۳×۱۰$^{-3}$
۶۳۰	۵۰۵-۷۵۵	۲٫۲۴×۱۰$^{-3}$
۸۷۰	۷۵۵-۹۸۵	۲٫۸۰×۱۰$^{-3}$
۱۱۵۰	۹۸۵-۱۳۱۵	۳٫۱۰×۱۰$^{-3}$
۱۵۰۰	۱۳۱۵-۱۶۸۵	۳٫۲۳×۱۰$^{-3}$
۲۰۰	۱۶۸۵-۲۳۱۵	۳٫۲۲×۱۰$^{-3}$
۲۵۰۰	۲۳۱۵-۲۶۸۵	۳٫۱۲×۱۰$^{-3}$
۲۹۰۰	۲۶۸۵-۳۱۱۵	۳٫۰۱×۱۰$^{-3}$

1. Cholesky Decomposition



شکل ۷. توابع ضرایب تبدیل وابسته به انرژی (w(E)) برای آشکارساز سوسوزن NaI(Tl).

با استفاده از روش طیف‌نگار- دزیمتری، با داده‌برداری از تابع پاسخ آشکارساز، ضرایب وزنی برای تبدیل انرژی ذخیره شده در ناحیه خاص از طیف به کرمای هوا بسیار مؤثر می‌باشد. هم‌چنین اصول اندازه‌گیری معادل دز محیطی با استفاده از انرژی ذخیره شده در آشکارساز با استفاده از ضرایب مختلف تبدیل، یکسان است. بنابراین، انرژی ذخیره شده در آشکارساز برای محاسبه کرمای هوا و معادل دز محیطی امکان‌پذیر و با افزایش ضریب وزنی جداسازی از داده‌های اندازه‌گیری شده با استفاده از توابع ضرایب تبدیل وابسته به انرژی در ناحیه‌های مختلف انرژی باعث افزایش دقت اندازه‌گیری دز فوتون خواهد شد.

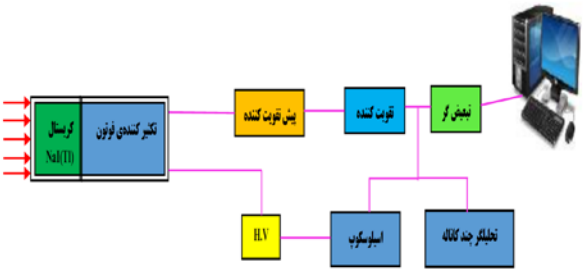
۴. آزمایش تجربی

به منظور اعتبارسنجی نتایج این مطالعه، پاسخ تجربی آشکارساز سوسوزن NaI(Tl) که در معرض چشمه‌های پرتوزا گاما استاندارد ^{137}Cs و ^{60}Co قرار گرفته اندازه‌گیری شده است. مطابق شکل ۸، چشمه‌های تابشی گاما قرار گرفته در فاصله ۱۰ سانتی‌متری از سطح آشکارساز سوسوزن و سامانه‌های الکترونیکی وصل شده آن برای اندازه‌گیری توزیع طیف ارتفاع پالس حاصل از چشمه‌های پرتوزا گاما نشان داده شده است. در این پیکربندی خروجی آشکارساز به یک پیش‌تقویت‌کننده فرستاده و سپس خروجی آن به یک خط تأخیری تقویت‌کننده متصل بوده، این تقویت‌کننده برای جلوگیری از تغییر شیفت خط پایه مورد استفاده قرار گرفته است. انتهای خروجی خط تأخیری تقویت‌کننده مستقیماً به تحلیل‌گر چند کاناله برای به دست آوردن طیف انرژی هر چشمه گاما متصل گردیده است.

برای اندازه‌گیری مقدار کرمای هوا حاصل از چشمه‌های فوتونی استاندارد بر اساس چیدمان تجربی، پس از طی مراحل تثبت طیف، کالیبراسیون طیف و حذف طیف انرژی زمینه از طیف خروجی آشکارساز و با استفاده از رابطه‌ی (۴) مقدار تجربی مقدار کرمای هوا محاسبه و با داده‌های شبیه‌سازی در کد MCNPX که طبق تعریف چشمه‌های نقطه‌ای فوتونی و طیف آن در آزمایشگاه به ترتیب از دستورهای SDEF، SI و SP استفاده شد، مقدار کرما در فاصله معین شبیه‌سازی و برای مقایسه این دو مقدار محاسبه شده به روش تجربی و شبیه‌سازی در جدول ۲ آورده شده است.

۵. بحث و نتیجه‌گیری

در این مقاله بعد از بررسی تالی‌های مختلف برآورد دز جذبی و پاسخ دزیمتری فوتون برای دزسنج‌های مختلف سوسوزن توسط کد MCNPX در انرژی‌های مختلف، نشان داده شد که آشکارساز سوسوزن یدور سدیم با ناخالصی تالیم NaI(Tl) علاوه بر توان طیف‌سنجی انرژی و تشخیص رادیوایزوتوپ با کمک روش طیف‌نگار- دزیمتری مبتنی بر روش نرم‌افزاری، با تقسیم نمودن طیف خروجی آشکارساز به چندین ناحیه انرژی می‌توان نرخ کرمای هوا و یا معادل دز محیطی فوتون در انرژی‌های مختلف را مستقیماً از طیف خروجی آشکارساز تعیین کرد.



شکل ۸. طرح‌نمای سامانه اندازه‌گیری برای آشکارساز سوسوزن NaI(Tl).

جدول ۲. مقایسه بین نرخ کرمای هوا شبیه‌سازی شده و نتایج به دست آمده توسط آشکارساز NaI(Tl) با استفاده از توابع ضرایب تبدیل

چشمه‌های پرتوزا گاما	شبیه‌سازی (μGy.h^{-1})	تجربی NaI(Tl) (μGy.h^{-1})
^{137}Cs	۰/۲۶۲±۰/۰۱	۰/۲۴۸±۰/۰۲
^{60}Co	۰/۱۷۲±۰/۰۱	۰/۱۶۸±۰/۰۲

تابع پاسخ هر آشکارسازی در اثر تابش‌دهی پرتو گاما، به شرایط محیطی و انرژی فوتون وابسته هستند. در شبیه‌سازی تابع پاسخ آشکارساز NaI(Tl) سعی شده است، انرژی ذخیره شده الکترون‌های ثانویه که توسط برخورد فوتون‌ها با اجزای تشکیل‌دهنده آشکارساز تولید می‌شوند و هم‌چنین احتمال انتشار بعدی برای هر فوتون با توجه به پدیده‌های فیزیکی هم چون فوتوالکتریک، پراکندگی کامپتون و تولید زوج محاسبه گردد.

بازه‌های انتخابی از توزیع طیف ارتفاع پالس آشکارساز یدور سدیم با ناخالصی تالیم نواحی از انرژی است که در آن‌ها تعداد شمارش یا توزیع ارتفاع پالس بیش‌تری را شامل شود. هم‌چنین نتایج تغییرات در تعداد بازه دزیمتری به صورت زیر حاصل می‌شود:

- در انرژی‌های بالا تابع پاسخ آشکارساز سوسوزن NaI(Tl) به دلیل پرواز مستقیم فوتون‌های پر انرژی، همانند تابعی برای یک دزیمتر ایده‌ال عمل می‌نماید.
- با افزایش تعداد بازه‌های انرژی در روش طیف‌نگاری دز به دلیل بالا رفتن احتمال یافتن ضرایب تبدیل کالیبراسیون می‌توان خطای حاصل از اندازه‌گیری میزان کرمای هوا را با افزایش ضرایب وزنی کاهش داد.

نتایج به دست آمده، نشان می‌دهد روش طیف‌نگار-دزیمتری ارایه شده برای اندازه‌گیری نرخ کرمای هوا با ضریب خطای کم‌تر از ۱۰٪ قابل محاسبه است (جدول ۲). برای کاهش خطای محاسباتی ضرایب تبدیل، به دلیل پایین بودن قدرت تفکیک انرژی می‌توان از روش داده‌برداری گزینشی یا افزایش تعداد بازه‌های انرژی بهره برد. به طوری که کانال‌هایی در بازه دلخواه انرژی را انتخاب نمود که شامل تعداد زیادی از شمارش یا توزیع ارتفاع پالس برای استفاده از ضرایب تبدیل باشند.

مراجع

1. G. Knoll, *Radiation Detection and Measurement*, 3rd Ed. (Wiley, New York, 1999).
2. J.A. Wear, et al., *Evaluation of Moderately Cooled Pure NaI as a Scintillator for Position-sensitive PET Detectors*, IEEE Trans. Nucl. Sci., **43**, 1996 (1943).
3. N. Tsoulfanidis, S. Landsberger, *Measurement & Detection of Radiation*, Fourth Ed. (Taylor Francis, 2016).
4. T. Kin, J. Goto, M. Oshima, *Machine Learning Approach for Gamma-ray Spectra Identification for Radioactivity Analysis*, IEEE Trans. Nucl. Sci, **4**, 1 (2019).
5. K. Kleinknecht, *Detectors for Particle Radiation*, 2ed Ed. (Cambridge, U.K, 1998).
6. F.H. Attix, *Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry*. (John Wiley Sons, Ltd, 2007).
7. H. Cember, E. Johnson, *Introduction to health physics*, 4th Ed. (McGraw-Hill Companies, 2009).
8. P. Buzhan, A. Karakash, Yu. Teverovskiy, *Silicon photomultiplier and CsI(Tl) scintillator in application to portable H*(10) dosimeter*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrom. Detect. Assoc. Equip., **912**, 245 (2018).
9. A. Martin, S. Harbison, *An introduction to radiation protection*, Fourth Ed. (Chapman and Hall USA, 1996).
10. T. Thanh, et al., *Verification of Compton Scattering Spectrum of a 662 keV Photon Beam Scattered on a Cylindrical Steel Target using MCNP5 Code*, Appl. Radiat. Isot., **105**, 294 (2015).
11. T. Kin, J. Goto, M. Oshima, *Machine Learning Approach for Gamma-ray Spectra Identification for Radioactivity Analysis*, IEEE Trans. Nucl. Sci., **4**, 1 (2019).
12. M. Balcezyk, M. Moszyński, M. Kapusta, *Comparison of LaCl3: Ce and NaI(Tl) Scintillators in Gamma-ray Spectroscopy*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res Sect., A. **537**, 50 (2005).
13. J.H. Hubbell, S.M. Seltzer, *Tables of X-ray mass attenuation coefficients and mass energy-absorption coefficients 1 keV to 20 MeV for elements Z¼ 1 to 92 and 48 additional substances of dosimetric interest*, No. PB–95- 220539/XAB, NISTIR–5632. National Inst. of Standards and Technology-PL, Gaithersburg, MD (United States). Ionizing Radiation Div. (1995).
14. ICRP. *The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103*, (ICRP 37, 2007).
15. ICRU. *Measurement of Dose Equivalents from External Photon and Electron Radiation*, (Report 47, 1992).
16. ICRP. *Publication 74: Conversion Coefficients for use in Radiological Protection against External Radiation*, Annals of the ICRP, **74**. 26, 3 (1996).
17. M.W. Lowder, H.L. Beck, W.J. Condon, *Spectrometric determination of dose rates from natural and fall-out gamma-radiation in the united states*, Nature, **202**, 45749 (1964).

18. H. Dombrowski, *Area Dose Rate Values Derived from NaI or LaBr3 Spectra*, Radiation Prot Dosimetry., **160**, 269 (2014).
19. *Monte Carlo N-particle transport code system for multiparticle and high energy applications*, Version 2.4.0. LANL Report LA-CP-02-408, (Los Alamos U.S.A, 2002).
20. K. Schweda, D. Schmidt, *Improved response function calculations for scintillation detectors using an extended version of the MCNP code*, Nucl. Instrum. Meth. A, **476**, 155 (2002).
21. T. Hoang, et al., *Optimization of the Monte Carlo simulation model of NaI(Tl) detector by Geant4 code*, Applied Radiation and Isotopes, **130**, 75 (2017).
22. F. Waheed, H. Akyildirim, K. Gunoglu, *Monte Carlo simulation of a NaI(Tl) detector efficiency*, Radiation Physics and Chemistry, 176, (2020).
23. H.X. Shi, et al., *Precise Monte Carlo simulation of gamma-ray response functions for an NaI(Tl) detector*, Appl. Radiat. Isot. **57**, 517 (2002).
24. C.M. Salgado, L.E.B. Brandão, R. Schirru, *Validation of a NaI(Tl) detector's model developed with mcnp-x code*, Prog. Nucl.Energy, **59**, 19 (2012).
25. H.Z. Dizaji, *Energy Response Improvement for Photon Dosimetry Using Pulse Analysis*, CPC. 40, (2016).
26. Y. Lotfi, H.Z. Dizaji, F.A. Davani, *Detection and Dosimetry Studies on the Response of Silicon Diodes to an ^{241}Am-Be Source*, J. Instrum., 9, (2014).
27. R.A. Green, *Energy and angular anisotropy optimization of p- type diode for in vivo dosimetry in photon beam radiotherapy*, Radiat. Prot. Dosim., **116**, 152 (2005).
28. R.H. Olsher, Y. Eisen, *A filter technique for optimizing the photon energy response of a silicon pin diode dosimeter*, Radiat. Prot. Dosim, **67**, 271 (1996).
29. W. Yudong, et al., *Comparison of two spectrum-dose conversion methods based on NaI(Tl) scintillation detectors*, Journal of Instrumentation, **13**, T06004 (2018).
30. E. Almaz, A. Akyol, *Stripping of the NaI(Tl) detector response function for continuous energy photon spectrum by svd approach*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section, B. **474**, 1 (2020).
31. L.J. Meng, D. Ramsden, *An inter-comparison of three spectral deconvolution algorithms for gamma-ray spectroscopy*, IEEE Nuclear Science Symposium, **2**, 691 (1999).
32. V. Madar, *Direct formulation to Cholesky decomposition of a general nonsingular correlation matrix*, Statistics Probability Letters, **103**, 142 (2015).

استناد به این مقاله
سید مرتضی طاهری بالانجی، حسین ذکی دیزجی، اکبر عبدی سرای (۱۴۰۱)، مطالعه پاسخ دزیمتری آشکارساز NaI(Tl) مبتنی بر روش طیف‌نگار- دزیمتری با استفاده از کد MCNPX، ۱۰۰، ۵۲-۶۰

DOR: 20.1001.1.17351871.1401.43.2.6.1
Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1383.html