

## اندازه‌گیری معادل دز محیطی با استفاده از روش طیف - دزیتر در آشکارساز یدور سدیم NaI(Tl)

سید مرتضی طاهری بالانجی<sup>۱</sup>، اکبر عبدی سرای<sup>۲\*</sup>، حسین ذکی دیزجی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری فیزیک هسته‌ای ۲- استادیار، دانشگاه ارومیه ۳- استادیار، دانشگاه جامع امام حسین (ع)

(دریافت: ۱۳۹۹/۰۷/۳۰، پذیرش: ۱۴۰۰/۰۱/۰۴)

### چکیده

آشکارسازی تابش در یک سطح حداقلی برای تعیین مقدار معادل دز تابش لازم است. به طور معمول، خروجی یک آشکارساز تابش‌های هسته‌ای به صورت مستقیم برای تعیین معادل دز تابش قابل استفاده نیست. با تغییر تابع پاسخ و یا خروجی آشکارساز، سعی می‌شود یک ارتباط منطقی بین خروجی آشکارساز با مقدار معادل دز ایجاد گردد. برای این منظور روش‌های متعدد سخت‌افزاری و نرم‌افزاری به کار برده می‌شود. در این تحقیق، معادل دز محیطی  $H^*(10)$  تابش گاما بر اساس روش طیف-دزیتر که بر پایه روش نرم‌افزاری است، تعیین می‌گردد. در این روش، داده‌های خروجی آشکارساز NaI(Tl) بر اساس ارتفاع پالس به چندین بازه انرژی تقسیم‌بندی شده و هر بازه انرژی یک ضریب تبدیل دارد. ضرایب تبدیل از طریق به‌کارگیری روش حذف گووسی به‌دست آمده است. معادل دز محیطی  $H^*(10)$  از خروجی آشکارساز NaI(Tl) بدون انجام واپیچیدگی طیف، تعیین می‌شود. با استفاده از شبیه‌سازی کد مونت کارلوی Geant4 تابع پاسخ و خروجی آشکارساز NaI(Tl) برای تابش گاما تعیین گردیده و سپس ضرایب تبدیل برای تعیین معادل دز محیطی محاسبه شده است. مابین داده‌های شبیه‌سازی و نتایج تجربی برای تابع پاسخ آشکارساز فوق توافق نسبتاً خوبی وجود دارد. نتایج حاصل نشان می‌دهد که با یافتن تابع ضرایب تبدیل در محدوده انرژی  $0.03-3$  مگا الکترون ولت در این روش دزیتری برای مقادیر معادل دز محیطی گاما مقدار درصد خطا حاصل از اندازه‌گیری کاهش و همچنین دقت در اندازه‌گیری افزایش می‌یابد.

**کلیدواژه‌ها:** آشکارساز NaI(Tl)، تابع پاسخ، روش طیف-دزیتر، معادل دز محیطی، ضریب تبدیل انرژی.

## The Ambient Dose Equivalent Measurement by the Spectro-Dosimeter Method in the NaI(Tl) Detector

S. M. Taheri Balanoji, A. Abdi Saray\*, H. Zaki Dizaji

Urmia University

(Received: 21/10/2020; Accepted: 24/03/2021)

### Abstract

A minimum level of radiation is needed to be detected for determining the value of the radiation dose equivalent. Typically, the output of a nuclear radiation detector cannot be used directly for determining the value of the radiation dose equivalent. Via changing the response function or the readout of the detector, effort is made to obtain a logical relation between the output of the detector and the dose equivalent. For this purpose, various hardware and software methods are used. In this research, the ambient dose equivalent  $H^*(10)$  of gamma radiation is determined by applying the spectro-dosimeter method, which is based on the software method. In this method, the readout of the NaI(Tl) detector is subdivided into several energy intervals based on the pulse height, thereby, each energy interval has its own conversion factor. Conversion coefficients are obtained by using the Gaussian elimination method. The ambient dose equivalent  $H^*(10)$  is determined from the detector readout without spectra deconvolution. Using the Geant4 Monte Carlo code simulation, the response function and the readout of the NaI(Tl) detector for gamma radiation are determined and then the conversion coefficients are calculated for obtaining the ambient dose equivalent. Fairly good agreement is observed between the simulation data and experimental results for the detector response function. The results show that by finding the conversion coefficients function in the energy range of 0.03-3 MeV in this dosimetric method for values equivalent to the ambient dose of gamma the measurement error percentage decreases and the measurement accuracy increases.

**Keywords:** NaI(Tl) Detector, Response Function, Spectro- Dosimeter Method, Ambient Dose Equivalent, Energy Conversion Coefficient

## ۱- مقدمه

امروزه تابش‌های هسته‌ای در بسیاری از جنبه‌های زندگی بشر اعم از دفاعی و غیردفاعی حضور اجتناب ناپذیر و بسیار تأثیرگذار دارد. لذا برای پایش و انجام اقدامات مربوط به حفاظت، ایمنی و سلامت افراد لازم است با بهره‌مندی از روش‌ها و یا ابزارهای متعدد اندازه‌گیری شاخص‌های مربوط به این میدان تابشی از میزان دز دریافتی تابش توسط افراد مطلع بود. این امر سبب توسعه ابزارها و روش‌های نوین دزیمتری گردیده است.

به طور کلی، برای اینکه از آشکارساز برای تعیین مقدار دز تابش استفاده شود، روش‌های متعدد سخت‌افزاری و نرم‌افزاری به کار برده می‌شود. در روش‌های سخت‌افزاری لایه‌هایی به عنوان تعدیل‌کننده، جبران‌کننده، کندکننده و غیره در پیرامون آشکارساز اضافه شده تا تغییری در تابع پاسخ آشکارساز داده شود [۱]. در روش‌های نرم‌افزاری نیز فرآیندهای داده‌برداری و پردازش آنها مانند بازیابی، پیچش، واپیچش و غیره استفاده می‌شود، تا خروجی مناسب برای دزیمتری حاصل گردد. در برخی دزیمترها به دلایل مختلف، امکان استفاده کافی از لایه‌هایی مانند تعدیل‌کننده و جبران‌کننده انرژی وجود نداشته و در نتیجه پاسخ دزیمتری تابش گاما در بازه گسترده انرژی، با خطای نسبتاً زیادی همراه است. از این رو با استفاده از یک عامل نرم‌افزاری می‌توان پاسخ دزیمتری را در انرژی‌های دلخواه بهینه کرد و دقت در اندازه‌گیری دز را افزایش داد [۴-۲].

در حال حاضر دزیمترهای تابش بر اساس دو نوع مختلف: دزیمترهای تجمعی<sup>۱</sup> و دزیمترهای حالت-پالسی<sup>۲</sup> می‌باشند. دزیمترهای ترمولومینسانس (TLD) و دزیمترهای فیلم بیج از نوع دزیمترهای تجمعی هستند. این نوع دزیمترها به دلیل عدم نمایش مقدار دز در زمان واقعی و مخصوصاً مواقع اضطراری مناسب نیستند. در دزیمترهای حالت-پالسی نیز که بر پایه ابزارهایی همچون شمارشگر گایگر، آشکارسازهای سوسوزن و آشکارسازهای نیمه‌هادی هستند را می‌توان با تفسیر سیگنال‌های خروجی آنها مقدار دز جذبی در زمان واقعی را حساب کرد. آشکارسازهای گازی مثل شمارشگر گایگر-مولر و اتاقک یونیزاسیون به دلیل قیمت پایین و همچنین آشکارسازهای سوسوزن به دلیل نزدیک بودن جنس آن به معادل بافت انسان در دزیمتری مورد توجه هستند. آشکارسازهای سوسوزن معدنی، در قیاس با آشکارسازهای سوسوزن پلاستیکی و شمارشگر گایگر-مولر چگالی جرمی بیشتری داشته و در نتیجه دارای بازدهی بالاتری است. علاوه بر این، این نوع آشکارسازها توانایی اندازه‌گیری مقدار انرژی تابش گاما در یک محدوده بزرگی از طیف انرژی را دارند [۴-۲].

آشکارساز یدور سدیم با ناخالصی تالیوم NaI(Tl) یکی از معروف‌ترین نوع آشکارسازهای سوسوزن معدنی بوده و کاربردهای زیادی در بخش‌های مرتبط با تابش گاما دارد. این نوع آشکارساز به علت دارا بودن پاسخ بسیار خوب به پرتو گاما برای تجزیه و تحلیل طیف مواد پرتوزا، اندازه‌گیری آلودگی رادیواکتیو و تصویر برداری از بدن در تجهیزات پزشکی هسته‌ای از جمله دوربین‌های گاما CT و دستگاه PET به طور گسترده استفاده شده است [۵-۱۰].

در این آشکارساز، فوتون فرودی با بلور برهمکنش کرده و در نتیجه پدیده فوتوالکتریک، تولید زوج و پدیده کامپتون الکترون‌های ثانویه تولید می‌شود. بلور یدور سدیم بدون ناخالصی تالیوم، نور زیادی تولید نکرده ولی با حضور اندکی تالیوم (یک در میلیون)، نور گسیلی با ضریب ۱۰ یا بیشتر تقویت گردیده است. نورهای مرئی تولید شده در حجم حساس آشکارساز جمع‌آوری شده و سپس توسط تکثیر کننده فوتونی (PMT<sup>۳</sup>) به پالس‌های الکتریکی تبدیل می‌گردد. به منظور افزایش بازدهی در این نوع آشکارسازها از لایه بازتاب دهنده‌ای از جنس پودر  $Al_2O_3$  یا MgO استفاده شده است [۱۱].

در زمینه دزیمتری، اندازه‌گیری انرژی جذب شده از پرتو بسیار اهمیت دارد. برای استفاده از این انرژی پرتوهای جذب شده در دزیمتری، انجمن بین‌المللی واحدها و اندازه‌گیری‌های تابش (ICRU<sup>۴</sup>) مجموعه‌ای از کمیت‌های قابل اندازه‌گیری که برای سنجش دز در تابش دهی فردی یا محیطی مناسب هستند را معرفی کرده است [۱۲]. محاسبه معادل دز محیطی با استفاده از پایش تابش پرتو گاما محیطی<sup>۵</sup> نیازمند شار پرتو گامای محیطی است. برای یافتن مقدار دقیق دز از تمام پرتوهای گامای فرودی، دانستن بازده قله تمام انرژی از طیف انرژی چشمه‌های پرتوزا بسیار حائز اهمیت است. ضرایب تبدیل شار فوتونی به معادل دز محیطی مورد نیاز، توسط سازمان ICRU گردآوری و بیان شده است. معادل دز محیطی  $H^*(10)$ ، معادل دز ایجاد شده به وسیله‌ی میدان متناظر گسترده و همسو در عمق ۱۰ میلی‌متری کره ICRU به شعاع ۱۵ سانتی‌متر روی بردار شعاع در خلاف جهت میدان همسو شده است [۱۳].

برای یافتن تابع پاسخ آشکارساز و همچنین ضرایب تبدیل از نرم‌افزار Geant4 که در مرکز تحقیقاتی سرن (CERN) توسعه یافته است، استفاده شده است [۱۴]. این نرم‌افزار توانایی شبیه‌سازی غالب اندرکنش‌های فوتون با ماده در بازه انرژی keV ۱۰ تا GeV ۳ را دارا بوده و همچنین خود جذبی و پراکندگی فوتون در هر برخورد ممکن با بدنه آشکارساز و همچنین با بلور

<sup>۳</sup> Photomultiplier Tube<sup>۴</sup> International Commission on Radiation Units and Measurements<sup>۵</sup> Environmental Gamma-Radiation Monitoring<sup>۱</sup> Integrating Dosimeters<sup>۲</sup> Pulse-Mode Dosimeters

سطر یا ستون متوالی ماتریس تابع پاسخ آشکارساز یکسان یا ضربی از یک دیگر خواهد شد و در نتیجه دترمینان ماتریس تابع پاسخ آشکارساز صفر و محاسبه معکوس ماتریس امکان پذیر نخواهد شد. بنابراین برای یافتن معکوس ماتریس باید ابعاد ماتریس پاسخ تا جایی که محاسبه دترمینان آن غیر صفر بوده کوچک شود، این امر سبب کاهش تعداد کانال انرژی یا افزایش فاصله بازه انرژی خواهد شد [۱۸]. لذا مقدار خطا در یافتن معادل دز محیطی در این روش برای آشکارساز بسیار بالا خواهد بود.

در یک دزیتر ایده آل، تابع پاسخ آشکارساز برابر با معادل تابع تبدیل شار به معادل دز است. ولی به دلیل یکسان نبودن جنس آشکارساز با بافت انسان، تابع پاسخ آشکارساز معادل با تابع تبدیل شار به معادل دز نخواهد بود. با توجه به پژوهش‌های انجام یافته در زمینه مطالعه بهبود تابع پاسخ انرژی در دزیتری [۱۹،۲۰] و همچنین روش طیف-دزیتر [۲۱] با اعمال داده برداری از خروجی آشکارساز پاسخ ذاتی آشکارساز تغییر یافته و پاسخ اصلاح شده آشکارساز متناسب با تابع تبدیل شار به معادل دز خواهد شد. به دلیل اهمیت ضریب جرمی انرژی-جذبی فوتون در دزیتری [۲۲]، می‌توان عبارت  $(w_i \cdot E_i)$  را جایگزین اجزاء بردار  $\vec{V}$  در رابطه (۲) نمود. دلیل این جایگزینی به خاطر وجود یک رابطه خطی بین تعداد شمارش شده از طیف اندازه‌گیری شده و مقدار کرما هوا ایجاد شده از این تعداد است. استفاده از یک ضریب تبدیل منحصر به فرد بین انرژی ذخیره شده در آشکارساز و کرما در هوا نیازمند وجود یک رابطه خطی بین ضرایب جرمی انرژی-جذبی در هوا و در بلور است. با توجه به شکل (۴-ب) این اصل در انرژی‌های بالا صادق است، اما در انرژی‌های پایین به دلیل غالب بودن پدیده فوتوالکتریک صادق نیست، برای حل این مشکل طیف به چندین بازه انرژی تقسیم شده و برای هر منطقه از ضریب تبدیل کالیبره شده استفاده می‌شود پس معادل دز محیطی با توجه به طیف بدست آمده توسط آشکارساز برابر:

$$H^*(10) = \vec{V} \cdot \vec{N} \quad (3)$$

$$= w_1 \cdot E_1 \cdot n_1 + w_2 \cdot E_2 \cdot n_2 + \dots + w_n \cdot E_n \cdot n_n$$

در این رابطه،  $w_n$  ضریب تبدیل انرژی در بازه انرژی  $n$  و  $(E_n \cdot n_n)$  انرژی ذخیره شده مربوط به ناحیه  $n$  است، به طوری که هر ناحیه انرژی شامل چندین کانال انرژی از طیف ارتفاع پالس حاصل شده از آشکارساز است. لازم به ذکر است، هنگام تعریف ناحیه‌های انرژی باید 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 طیف سنجی باشد، اولین ضریب تبدیل انرژی  $(w_1)$  به دست خواهد آمد، هنگام محاسبه  $w_n$  بعدی در بازه انرژی بالاتر  $w_n$  اندازه‌گیری شده قبلی را نیز باید در نظر گرفت، زیرا برخی از فوتون‌ها تنها بخشی از انرژی خود را در آشکارسازها به دلیل فرآیندهای مختلف پراکندگی ذخیره می‌کنند. بنابراین باید معادل دز محیطی از قسمت انرژی پایین

را محاسبه می‌نماید. اهمیت و کارایی تابع پاسخ آشکارساز در بدست آوردن و تفسیر داده‌ها بسیار برجسته و مهم است. عواملی مثل، ابعاد آشکارساز و مواد تشکیل دهنده آشکارساز بر تابع پاسخ آشکارساز تأثیرگذار هستند. پیکربندی آشکارساز از عوامل بسیار مهم برای بهبود بازه آشکارساز است [۱۵ و ۱۶].

در این مطالعه تابع پاسخ آشکارساز سوسوزن  $\text{NaI(Tl)}$  و طیف خروجی آشکارساز برای چشمه‌های مختلف پرتوزا شبیه‌سازی و با نتایج تجربی مقایسه و اعتبارسنجی گردید. در ادامه با روش تجزیه و تحلیل پالسی و تقسیم کردن خروجی آشکارساز به چندین بازه انرژی و همچنین ایجاد ارتباط منطقی بین داده آشکارساز و مقدار دز به کمک روش حذف گوسی، ضرایب تبدیل انرژی ذخیره شده  $(W_i)$  با یافتن تابع ضرایب تبدیل معادل دز محیطی در بازه انرژی  $0.3$  تا  $3 \text{ MeV}$  و بازه اندازه‌گیری معادل دز محیطی در این روش بین  $120 \mu\text{Sv h}^{-1}$  تا  $30 \text{ nSv h}^{-1}$  برای آشکارساز فوق تعیین گردید.

## ۲- روش تحقیق

تابع پاسخ هر آشکارسازی به شرایط محیطی و انرژی فوتون بستگی دارد. در شبیه‌سازی تابع پاسخ آشکارساز  $\text{NaI(Tl)}$ ، انرژی ذخیره شده الکترون‌های ثانویه که توسط اندرکنش فوتون‌ها با اجزای تشکیل دهنده آشکارساز تولید شده‌اند و همچنین احتمال انتشار فلورسانس‌های بعدی برای هر فوتون با توجه به پدیده‌های فیزیکی همچون فوتوالکتریک، پراکندگی کامپتون و تولید نابودی زوج محاسبه شد. رابطه بین طیف اندازه‌گیری شده از شار میدان تابشی چشمه گسیل دهنده گاما توسط آشکارساز را می‌توان به صورت زیر در نظر گرفت:

$$\vec{N} = \mathbf{R} \cdot \vec{\varphi} \quad (1)$$

در این رابطه،  $\vec{\varphi}$  شار میدان تابشی چشمه،  $N$  خروجی آشکارساز و  $R$  تابع پاسخ آشکارساز می‌باشند. حال با توجه به رابطه معادل در محیطی  $H^*(10)$  که حاصل ضرب طیف چشمه  $\vec{\varphi}$  و ضریب تبدیل شار به معادل دز محیطی  $\vec{F}_H$  است، مقدار  $H^*(10)$  با استفاده از رابطه (۲) قابل محاسبه است.

$$H^*(10) = \vec{F}_H \cdot \vec{\varphi} = \vec{F}_H \cdot (\mathbf{R}^{-1} \cdot \vec{N}) \quad (2)$$

$$= (\vec{F}_H \cdot \mathbf{R}^{-1}) \cdot \vec{N} = \vec{V} \cdot \vec{N}$$

در رابطه (۲)،  $\vec{V}$  حاصل ضرب بردار  $\vec{F}_H$  و ماتریس  $\mathbf{R}^{-1}$  را می‌توان به طور مستقیم توسط روش شبیه‌سازی مونت کارلو به دست آورد. با توجه به پژوهش انجام شده برای یافتن معادل دز محیطی [۱۷] با استفاده از معکوس تابع پاسخ آشکارساز در رابطه (۲) به دلیل پایین بودن قدرت تفکیک انرژی آشکارساز  $\text{NaI(Tl)}$  و نیز پدیده کامپتون که باعث ایجاد پهن‌شدگی در طیف شده، دو

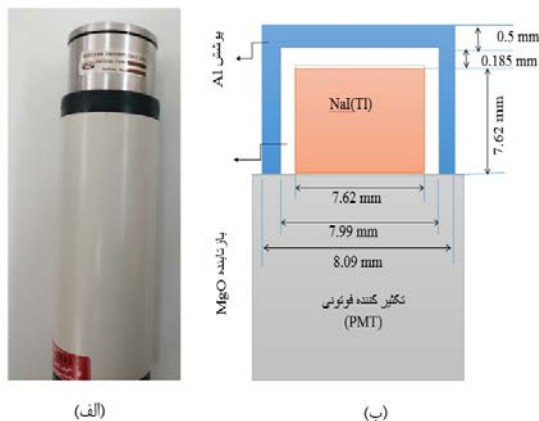
که نشان دهنده‌ی تعداد پرتوهای شمارش شده زیر سطح خالص قله نوری معین و  $N$  نیز تعداد کل پرتوها گسیل شده از چشمه قرار گرفته در فاصله معین از سطح آشکارساز است. همچنین معیار قدرت تفکیک انرژی ( $ER^2$ ) برابر:

$$ER = \frac{FWHM}{E_0} \quad (5)$$

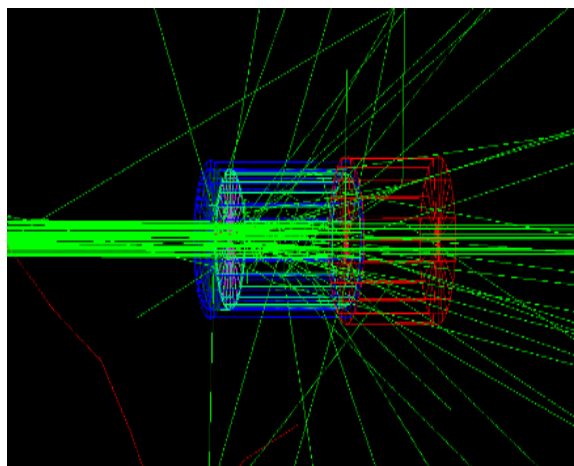
در رابطه (۵)، تمام پهنا در نیم بیشینه و  $E_0$  انرژی قله است. ( $FWHM^2$ ) نیز به صورت زیر تعریف شده است [۲۵]:

$$FWHM = a + b\sqrt{E} + cE^2 \quad (6)$$

که در این رابطه؛  $a$ ،  $b$  و  $c$  پارامترهای برازش داده‌های تجربی هستند. در نتیجه برای مقایسه طیف تجربی لازم است توزیع انرژی گاوسی در کد Geant4 برای گسترش آمار ذرات در فوتوپیک طیف داده‌های شبیه‌سازی با در نظر گرفتن متغیر برازش به مقدار  $a = -0.003 \text{ MeV}$ ،  $b = -0.058\sqrt{\text{MeV}}$  و  $c = -0.191 \text{ MeV}^{-1}$  برای پاسخ داده‌های شبیه‌سازی شده آشکارساز در نظر گرفته شود.



شکل ۱. نمایی از آشکارساز NaI(Tl): (الف) تجربی و (ب) شبیه‌سازی



شکل ۲. آشکارساز شبیه‌سازی شده همراه با چشمه پرتوزای در حال تابش در کد Geant4.

طیف که در آن  $w_n$  از قبل تعیین شده است محاسبه و از کل دز تابشی در آشکارساز کم گردد، در نتیجه برای یافتن ضرایب  $w_n$  در رابطه (۳) از روش حذف گوسی استفاده شده است [۲۳].

در این مطالعه ابتدا هندسه و مواد آشکارساز سوسوزن NaI(Tl) با ابعاد  $3 \times 3$  اینچ که محصول شرکت Canberra است، برای یافتن تابع پاسخ آشکارساز شبیه‌سازی و با داده‌های آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفت. سپس با داده برداری از خروجی آشکارساز و با اعمال ضرایب تبدیل انرژی که توسط شبیه‌سازی محاسبه شده است، یافتن مقدار دز محیطی  $H^*(10)$  امکان پذیر خواهد بود.

### ۳- شبیه‌سازی با کد Geant4

در این پژوهش از کد Geant4 به منظور محاسبه طیف خروجی چشمه تابشی گاما توسط آشکارساز NaI(Tl) محاسبه و برای تجزیه و تحلیل استفاده گردید. کد شبیه‌ساز Geant4 یک کد چند منظوره برای ترابرد تابش بر مبنای روش مونت کارلو است، که قادر به شبیه‌سازی برهمکنش تابش با هر ماده‌ای است. این بسته نرم‌افزاری با استفاده از مدل‌های فیزیکی، برهمکنش ذره مورد نظر را دنبال کرده و کمیت مورد نظر را با خطاهای معین به‌دست می‌آورد. فیزیک لیست مورد استفاده در تمامی مراحل این مطالعه از مدل G4LivermorephotoElectric، G4LivermoreCompton و G4LivermoreGammaConversion که برای تعداد  $10^7$  فوتون که در موقعیت مقابل سطح آشکارساز قرار گرفته و بعد از برخورد کافی با آشکارساز و با از دست دادن انرژی جنبشی اولیه خود متوقف شده‌اند، شبیه‌سازی گردیده است. همچنین از چشمه‌های گاما  $^{60}\text{Co}$ ،  $^{22}\text{Na}$  و  $^{137}\text{Cs}$  که به فاصله ۱۰ سانتی‌متری از آشکارساز بر روی محور تقارنی آشکارساز هستند، استفاده شده است. با توجه به پژوهش انجام یافته به دلیل مشکل بودن شبیه‌سازی لامپ تکثیر کننده فوتونی (PMT)، استوانه آلومینیومی جایگزین تکثیر کننده فوتونی در شبیه‌سازی شده است [۲۴].

شکل (۱) نمایی از (الف) آشکارساز و (ب) شبیه‌سازی و نمایی از فرآیند پرتودهی شبیه‌سازی شده با استفاده از بسته نرم‌افزاری Geant4 در شکل (۲) نیز نمایش داده شده است. در ادامه نتایج طیف شبیه‌سازی را با نتایج تجربی مقایسه نموده‌ایم. طیف حاصل از نتایج شبیه‌سازی و نتایج تجربی چشمه‌های گاما  $^{60}\text{Co}$ ،  $^{22}\text{Na}$  و  $^{137}\text{Cs}$  در شکل (۳) نشان داده شده است. برای مقایسه نتایج تجربی با داده‌های شبیه‌سازی از معیار قدرت تفکیک انرژی (FEPE) استفاده گردید. معیار بازده مطلق زیر قله نوری (FEPE) آشکارساز برابر:

$$FEPE = \frac{N_{FEP}}{N} \quad (4)$$

<sup>2</sup> Energy Resolution  
<sup>3</sup> Full width at half maximum

<sup>1</sup> Full Energy Peak Efficiency

چشمه‌های فوتونی مختلف در محدوده ۰/۳ تا ۳ مگا الکترون ولت برای تابش استفاده شد. هر چشمه پرتوزا فوتونی دارای مقادیر خاص خود برای  $\bar{F}_H$  است که باید در معادله (۳) صدق کند. بنابراین، برای هر بازه انرژی فوتون، ضریب ثابت  $w_i$  با استفاده از شبیه سازی تراپد فوتون و نرمالیزه کردن طیف بر حسب شار فرودی بر سطح آشکارساز توسط چشمه تعیین گردید. همچنین به دلیل نویزهای الکتریکی حاصل از اندازه‌گیری توسط سیستم آشکارسازی، فوتون‌هایی با انرژی کمتر ۳۰ کیلو الکترون ولت در طیف تجربی انرژی فوتون در نظر گرفته نشده است.

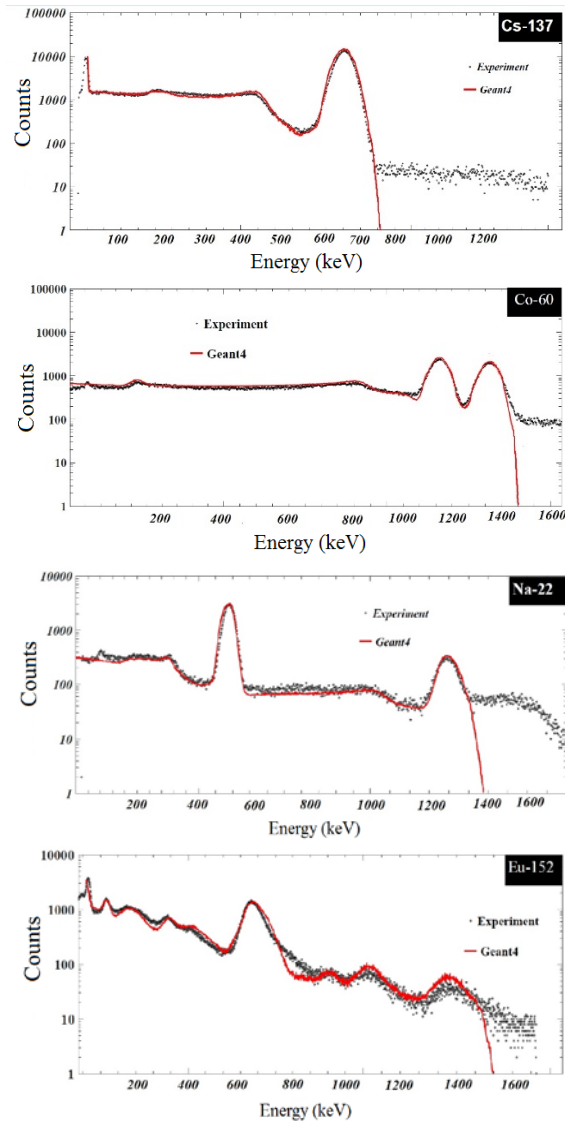
همان‌طور که در جدول (۲) نشان داده شده است، برای اندازه‌گیری دقیق‌تر معادل دز محیطی در روش طیف-دزیمتر از بازه‌های انرژی مختلف استفاده گردیده است.

جدول ۲. ضرایب تبدیل محاسبه شده برای بلور NaI(Tl).

$W (pSv/KeV)$	قله چشمه پرتوزا در شبیه‌سازی	بازه انرژی (کیلو الکترون ولت)
۰/۰۰۴۵	۶۰	۳۵-۸۰
۰/۰۰۳۵	۸۸	۸۰-۱۱۹
۰/۰۰۳۴	۱۲۲	۱۱۹-۱۶۱
۰/۰۰۳۵	۱۶۵	۱۶۱-۲۰۰
۰/۰۰۳۸	۳۲۰	۲۰۰-۳۹۳
۰/۰۰۴۴	۵۱۴	۳۹۳-۶۰۰
۰/۰۰۴۸	۶۶۲	۶۰۰-۷۶۷
۰/۰۰۵۱	۸۳۴	۷۶۷-۹۵۴
۰/۰۰۵۲	۱۲۷۴	۹۵۴-۱۴۱۹
۰/۰۰۵۲	۱۸۳۶	۱۴۱۹-۱۹۲۴
۰/۰۰۵۱	۲۲۵۰	۱۹۲۴-۳۰۰۵

شکل (۴) ضریب جرمی انرژی-جذبی هوا و بلور NaI(Tl) توسط شبیه‌سازی با استفاده از بسته نرم‌افزاری Geant4 و نسبت آنها را نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۴-ب) نسبت ضریب جرمی انرژی-جذبی هوا و بلور در محدوده ۰/۷ تا ۴ MeV ثابت و مقدار آن به طور تقریبی برابر یک است. در نتیجه کرما هوای ایجاد شده در این بازه انرژی فوتون‌ها متناسب با انرژی ذخیره شده در بلور است، پس استفاده از یک ضریب تبدیل منحصر به فرد برای یافتن دز محیطی امکان پذیر خواهد بود.

مرحله بعدی در محاسبه میزان معادل دز محیطی، استخراج تابع پیوسته به جای مقادیر ضریب تبدیل انرژی گسسته مربوط به هر یک از مناطق انرژی است. با دانستن تابع پیوسته ضرایب تبدیل انرژی از طیف ارتفاع پالس ثبت شده، نرخ معادل دز محیطی قابل محاسبه خواهد بود. تابع برازش  $h(E)$ ، از رابطه (۷) به دست می‌آید [۲۸].



شکل ۳. طیف حاصل از نتایج شبیه‌سازی و تجربی چشمه‌های گاما

در جدول (۱) نتایج شبیه‌سازی و تجربی از معیار بازده مطلق زیر قله نوری آشکارساز و معیار قدرت تفکیک انرژی آورده شده است که در مقایسه با پژوهش‌های انجام شده توسط سایر پژوهشگران همخوانی بسیار خوبی دارد [۲۶، ۲۷].

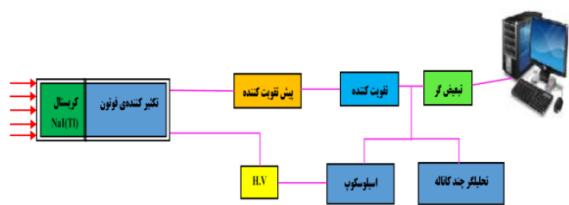
جدول ۱. مقادیر ER و FEPE برای هر یک از حالت‌های مورد بررسی در شکل (۲).

Exp	FEPE × 10 <sup>-3</sup>		Rd	Exp	ER		انرژی چشمه (keV)
	Geant4	Rd			Geant4	Rd	
۳/۹۸	۳/۶۸	۵/۰۲	۷/۱۳	۷/۰۹	۰/۵۶	<sup>22</sup> Na (۵۵۱)	
۳/۲۴	۲/۹۵	۸/۹۵	۶/۸۲	۶/۹۲	۱/۵	<sup>137</sup> Cs (۶۶۱/۶۵)	
۲/۰۸	۱/۹۱	۸/۱۷	۵/۴۸	۵/۵۱	۰/۵۴	<sup>60</sup> Co (۱۱۷۳/۲۲)	
۱/۹۷	۱/۸۵	۶/۰۹	۴/۳۴	۴/۳۹	۱/۱۵	<sup>22</sup> Na (۱۲۷۴/۵۳)	
۱/۹۱	۱/۷۹	۶/۲۸	۴/۲۷	۴/۲۹	۰/۴۶	<sup>60</sup> Co (۱۳۳۲/۴۹)	

نسبت ضریب جرمی-انرژی جذبی بین NaI(Tl) و هوا مطابقت دارد.

#### ۴- آزمایش تجربی

برای پیاده‌سازی آزمایش تجربی روش دزیمتری، چیدمان دستگاه آشکارساز و زنجیره الکترونیک مربوطه بدین صورت است که چشمه‌های تابشی گاما به فاصله ۱۰ سانتی‌متری از سطح آشکارساز سوسوزن قرار گرفت، خروجی آشکارساز به یک پیش تقویت‌کننده وصل شده و سپس خروجی آن به تقویت‌کننده متصل گردید، انتهای خروجی تقویت‌کننده مستقیماً به تحلیل‌گر چند کاناله برای به دست آوردن طیف انرژی هر چشمه گاما متصل گردیده است (شکل ۶). در این مطالعه برای بررسی و صحت سنجی نتایج حاصل از بخش شبیه‌سازی طیف چشمه‌های پرتوزا و بخش تجربی آن، از معیار بازده قله تمام انرژی و قدرت تفکیک انرژی (FEPE) استفاده گردید. با توجه به نتایج گردآوری شده در جدول (۱) مشاهده شد که نتایج حاصل از شبیه‌سازی تطابق بسیار خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارند.



شکل ۶. روندنمای یک سیستم آشکارساز با سوسوزن

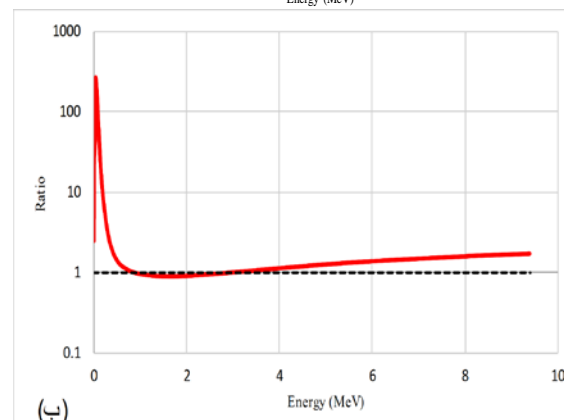
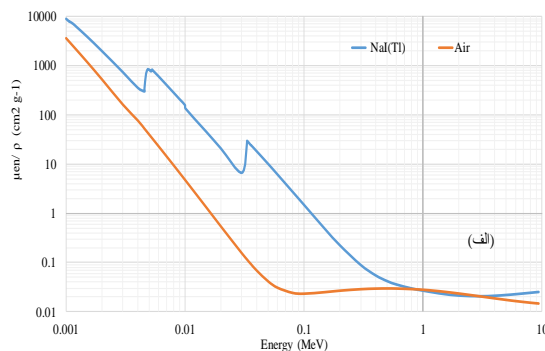
با توجه به متفاوت بودن پاسخ دزیمتری برای چشمه‌های فوتونی مختلف، معادل دز محیطی برای چشمه‌های فوتونی استاندارد که بر اساس چیدمان تجربی، طیف خروجی آشکارساز اندازه‌گیری شده و پس از طی مراحل تثبیت طیف، کالیبراسیون طیف و حذف طیف انرژی زمینه از طیف خروجی آشکارساز و با استفاده از رابطه (۷) مقدار تجربی مقدار معادل دز محیطی محاسبه و با داده‌های شبیه‌سازی که توسط تعریف آشکارساز نقطه‌ای در کد Geant4 برای چشمه‌های نقطه‌ای استفاده شده در آزمایشگاه، مقدار معادل دز در عمق ۱۰ میلی‌متری کره ICRU شبیه‌سازی و در جدول (۳) و شکل (۷) مقایسه شده است. این اندازه‌گیری با میانگین خطای کمتر از ۱۰٪ قابل قبول است.

جدول ۳. مقایسه  $H^*(10)$  به دست آمده از طیف آشکارساز NaI(Tl) و نتایج حاصل از شبیه‌سازی.

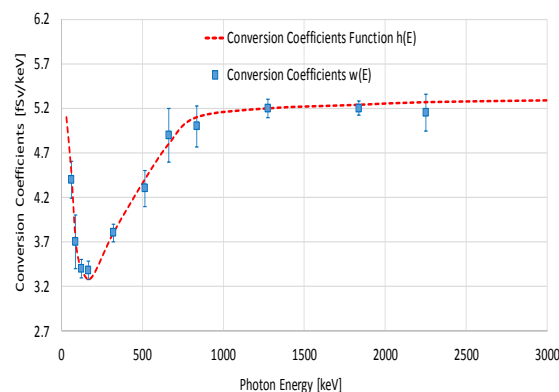
خطا (%) $(Rd = \frac{ Exp - Simulation }{Exp} \times 100)$	$H^*(10)$ شبیه‌سازی ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	$H^*(10)$ تجربی ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ )	چشمه
۵/۸	۰/۳۲	۰/۳۰ ± ۰/۰۴	$^{137}\text{Cs}$
۹/۲	۰/۸۶	۰/۸۱ ± ۰/۰۳	$^{60}\text{Co}$
۷/۳	۰/۱۶	۰/۱۵ ± ۰/۰۳	$^{22}\text{Na}$

$$h(E) = a \times e^{-b \times E} + c \times (1 - e^{-d \times E^2}) \quad (7)$$

در این رابطه  $a$ ،  $b$ ،  $c$  و  $d$  پارامترهای برازش و  $E$  انرژی فوتون ضبط شده است، این پارامترها متناسب با عملکرد داده‌های ضرایب تبدیل بدست می‌آیند. شکل (۵) تابع پیوسته ضرایب تبدیل برای آشکارساز NaI(Tl) را که حاصل برازش داده‌های جدول (۲) است را نشان می‌دهد.



شکل ۴. الف) ضریب جرمی انرژی-جذبی بر اساس تابع انرژی فوتون برای بلور NaI(Tl) و هوا، ب) نسبت ضرایب جرمی انرژی-جذبی هوا و NaI(Tl) بلور

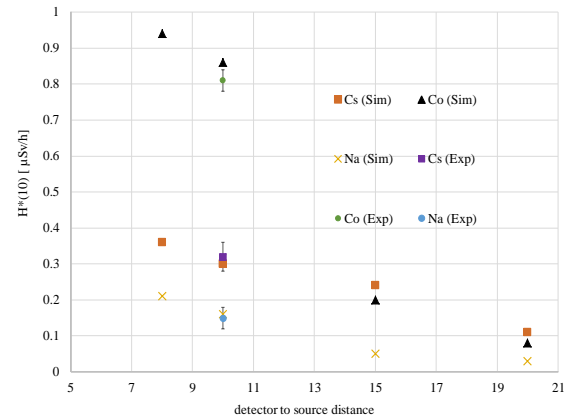


شکل ۵. تابع ضرایب تبدیل به معادل دز محیطی

با توجه به شکل (۵) این نکته قابل بیان است، مقادیر  $w_i$  توصیف شده با رفتار نسبت ضریب جرمی-انرژی جذبی بین NaI(Tl) و هوا (شکل ۴-ب) ارتباط مستقیم دارد. به عبارت دیگر سقوط ناگهانی تابع ضرایب تبدیل  $w_i$  در انرژی‌های پایین با صعود

- [3] Wang, A.; Zhou, R.; Yang, C. "Verification of The Method of Average Angular Response for Dose Measurement on Different Detectors"; J. Instrum. 2015, 47, 701-708.
- [4] Buzhan, P.; Karakash, A.; Teverovskiy, Y. "Silicon Photomultiplier and CsI (TI) Scintillator in Application to Portable H\*(10) Dosimeter"; Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A. 2018, 912, 245-249.
- [5] Knoll, G. "Radiation Detection and Measurement"; 3<sup>rd</sup> Edition, Wiley, New York, 1999.
- [6] Wear, J. A.; Karp, J. S.; Haigh, A. T.; Freifelder, R. "Evaluation of Moderately Cooled Pure NaI as a Scintillator for Position-Sensitive PET Detectors"; IEEE Trans. Nucl. Sci. 1996, 43, 1945-1951.
- [7] Thanh, T.; Nguyen, V.; Chuong, H.; Tran, L.; Tam, H.; Thi Binh, N.; Tao, C. "Verification of Compton Scattering Spectrum of a 662 keV Photon Beam Scattered on a Cylindrical Steel Target using MCNP5 Code"; Appl. Radiat. Isot. 2015, 105, 294-298.
- [8] Kin, T.; Goto, J.; Oshima, M. "Machine Learning Approach for Gamma-ray Spectra Identification for Radioactivity Analysis"; IEEE Trans. Nucl. Sci. 2019, 4, 1-2.
- [9] Kleinknecht, K. "Detectors for Particle Radiation"; 2<sup>ed</sup> Ed. Cambridge, U.K, 1998.
- [10] Balcezyk, M.; Moszyński, M.; Kapusta, M. "Comparison of LaCl<sub>3</sub>: Ce and NaI (TI) Scintillators in Gamma-ray Spectroscopy"; Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A. 2005, 537, 50-56.
- [11] Eissa, M.; Arafa, H. "Improve the Efficiency of Scintillation Detectors Using Reflectors Based on Photonic Crystals Array"; J. Electromag. Anal. Appl. 2014, 6, 25-29.
- [12] Sharp, P.; Barber, D. C.; Brown, D. G.; Burgess, A. E.; Metz, C. E.; Myers, K. J.; Taylor, C. J.; Wagner, R. F.; Brooks, R.; Hill, C. R.; Kuhl, D. E.; Smith, M. A.; Wells, P.; Worthington, B. "International Commission on Radiation Units and Measurements"; Report 54, Quantities and Units in Radiation Protection Dosimetry, 1996.
- [13] ICRU. "Measurement of Dose Equivalents from External Photon and Electron Radiation"; Report 47, 1992.
- [14] Agostinelli, S.; Allison, J.; Amako, K.; Apostolakis, J.; Araujo, H.; Arce, P.; Asai, M.; Axen, D.; Banerjee, S.; Barrand, G.; Behner, F.; Bellagamba, L.; Boudreau, J. "Geant4-a Simulation Toolkit"; Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2003, 506, 250-303.
- [15] Iddings, F. A.; Lieber, T. J.; Williams, O. W. "Counting Yield Calibration of NaI(Tl) Detectors for Complex Geometry Samples by Use of Californium-252"; J. Radioanal. Nucl. Chem. 1979, 50, 125-131.
- [16] Conway, J. T. "Analytical Solution for the Solid Angle Subtended at any Point by an Ellipse Via a Point Source Radiation Vector Potential"; Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A. 2010, 604, 17-27.
- [17] Casanovas, R.; Morant, J. J.; Salvadó, M. "Development and Calibration of a Real-time Airborne Radioactivity Monitor Using Direct Gamma-ray Spectrometry with Two Scintillation Detectors"; Appl. Radiat. Isot. 2014, 89, 102-108.
- [18] Rahman, M. S.; Gyuseong, C. "Unfolding Low-Energy Gamma-ray Spectrum Obtained with NaI(Tl) in Air Using Matrix Inversion Method"; J. Sci. Res. 2010, 2, 221-226.
- [19] Dizaji, H. Z. "Energy Response Improvement for Photon Dosimetry Using Pulse Analysis"; Chinese Phys. C 2016, 40, 026203.
- [20] Lotfi, Y.; Dizaji, H. Z.; Davani, F. A. "Detection and Dosimetry Studies on the Response of Silicon Diodes to a <sup>241</sup>Am-Be Source"; J. Instrum. 2014, 9, 06023.
- [21] Dombrowski, H. "Area Dose Rate Values Derived from NaI or LaBr<sub>3</sub> Spectra"; Radiat. Prot. Dosimetry 2014, 160, 269-276.

با توجه به بازدهی و قدرت تفکیک آشکارساز و طیف‌های اندازه‌گیری شده از چشمه‌های مختلف پرتوزا گاما در فاصله‌های مختلف از سطح آشکارساز و همچنین طیف و مقدار دز محیطی زمینه، حدود بازه اندازه‌گیری معادل دز محیطی در این روش بین  $120 \mu\text{Sv h}^{-1}$  تا  $30 \text{ nSv h}^{-1}$  به دست آورده شد.



شکل ۷. نسبت دز حاصل از شبیه‌سازی و تجربی برای چشمه‌های گاما

## ۵- نتیجه‌گیری

در این مطالعه نشان داده شده است که آشکارساز سوسوزن یدور سدیم با ناخالصی تالیوم NaI(Tl) علاوه بر توان طیف‌سنجی انرژی و تشخیص رادیویزوتوپ با استفاده از روش طیف-دزیمتر بر پایه روش نرم‌افزاری، با تقسیم کردن طیف خروجی آشکارساز به چندین ناحیه انرژی می‌توان معادل دز محیطی فوتون در انرژی‌های مختلف را تعیین کرد. به عبارت دیگر، تقسیم کردن طیف در محدوده انرژی  $3-0.3$  مگا الکترون ولت به ۱۰ ناحیه انرژی مختلف برای محاسبه مقادیر میزان دز محیطی در دقتی که مشابه یا حتی بهتر از دزیمتر معمولی باشد، کافی است. با افزایش تعداد بازه‌های انرژی در روش چند کاناله طیف-دزیمتر به دلیل پایین بودن قدرت تفکیک انرژی آشکارساز و همچنین بالا رفتن احتمال یافتن ضرایب تبدیل می‌توان خطای حاصل از اندازه‌گیری معادل دز محیطی را کاهش داد. نتایج به دست آمده، نشان می‌دهد روش طیف-دزیمتر ارائه شده برای اندازه‌گیری نرخ معادل دز محیطی با ضریب خطای کمتر از ۱۰٪ قابل محاسبه است. برای کاهش خطای روش داده برداری گزینشی بهره‌گیری کرد و کانال‌هایی در بازه دلخواه انرژی را انتخاب نمود که شامل تعداد زیادی از شمارش یا توزیع ارتفاع پالس برای استفاده از ضرایب تبدیل گردد.

## ۶- مراجع‌ها

- [1] Saray, A. A.; Dizaji, H. Z. "Simulation and Measurement of Cadmium Ratio Parameter in the Polyethylene Pile"; J. Passive Defence Sci. & Technol. 2017, 8, 321-328.
- [2] Attix, F. H. "Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry"; Wiley, 2008.

- [26] Karabekir, K.; Bilimler, T.; Yüksekokulu, M.; Bölümü, E. "A Study on Calculation of Full Energy Peak Efficiency of NaI (TI) Detectors using Point Source"; *J. Theor. Appl. Phys.* 2019, 6, 28-36.
- [27] Moszynski, M.; Nassalski, A.; Syntfeld-Kazuch, A.; Swiderski, L.; Szczecnsniak, T. "Energy Resolution of Scintillation Detectors- New Observations"; *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 2008, 55, 1062-1068.
- [28] Röttger, A.; Kessler, P. "Uncertainties and Characteristic Limits of Counting and Spectrometric Dosimetry Systems"; *J. Environ. Radioact.* 2019, 205, 48-54.
- [22] Crewson, C.; Rangacharyulu, C. "Photon Mass Attenuation Coefficients of Importance to Dosimetry"; *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 2011, 6, 626-931.
- [23] Pan, V. Y.; Zhao, L. "Numerically Safe Gaussian Elimination with no Pivoting"; *Linear Algebra Appl.* 2017, 527, 349-383.
- [24] Shi, H. X.; Chen, B. X.; Li, T. Z.; Yun, D.; "Precise Monte Carlo Simulation of Gamma-Ray Response Functions for an NaI(Tl) Detector"; *Appl. Radiat. Isot.* 2002, 57, 517 – 524.
- [25] Salgado, C. M.; Brandão, L. E. B.; Schirru, R. "Validation of a NaI(Tl) Detector's Model Developed with MCNP-X Code"; *Prog. Nucl. Energy* 2012, 59, 19–25.