

شبیه سازی سنگ گرانیتی زینتی به کمک مدل سازی آشکارساز HPGe و تعیین بازده آشکارساز با محاسبه ضخامت لایه مرده با استفاده از کد MCNPX

نگار عبدیانی، مریم حسنوند*

دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، صندوق پستی ۸۴۱۵۶۸۳۱۱۱، اصفهان، ایران

چکیده

تاکنون تحقیقات بسیاری در کشورهای مختلف از جمله ایران در زمینه تابش های پرتوزا ناشی از عناصر پرتوزای محیطی مانند خاک، سنگ و... صورت گرفته است. ما به صورت روزانه در معرض این تابش ها قرار داریم که در صورت دریافت دوزی بیشتر از حد مجاز با مسمومیت و دیگر عوارض ناشی از آن مواجه خواهیم شد. با توجه به اینکه امروزه ما بیشتر زمان خود را در محیط بسته ساختمان ها سپری می کنیم، مطالعه پرتوزایی مصالح ساختمانی ضرورت پیدا می کند. در این مطالعه، به بررسی پرتوزایی عناصر ^{232}Th ، ^{238}U و ^{40}K در ۱۰ نمونه سنگ گرانیتی زینتی بازار اصفهان به وسیله آشکارساز HPGe، مدل GMX40P4-76 نوع n، ساخت شرکت ORTEC پرداخته شده است. با توجه به نتایج به دست آمده، تقریباً ۹۰٪ این نمونه ها دارای فعالیت بیشتر از حد مجاز می باشند. با توجه به زمان بردن اندازه گیری های تجربی و نیاز به چشمه های استاندارد، هم نوع و هم جنس برای آشکارسازی و کالیبره کردن چشمه پرتوزا، از روش شبیه سازی برای تخمین بازده آشکارساز استفاده شد. در این مطالعه از کد مونت کارلوی MCNPX2.6 برای شبیه سازی آشکارساز، چشمه استاندارد خاکی، نمونه سنگ گرانیتی و بررسی اثر تغییر ضخامت لایه مرده بر آشکارساز استفاده شد.

کلیدواژگان: پرتوزایی، سنگ های گرانیتی زینتی، آشکارساز HPGe، کد MCNPX، چشمه استاندارد خاکی.

Simulation of decorative Granite stones by modeling HPGe detector and determining detector efficiency by calculating dead layer thickness using MCNPX code

Negar Abdiani, Maryam Hassanvand*

Department of Physics, Isfahan University of Technology, 8415683111, Isfahan, Iran

Abstract

So far, there has been a lot of research in different countries, including Iran, on gamma radiation caused by radioactive elements in soil, rock, etc. We are exposed to these radiation sources; if we receive more than standard values we will face poisoning and other side effects. Since we spend most of our time indoors today, studying the radioactivity of building materials is important. In this study, we investigate the radioactivity of ^{232}Th , ^{238}U and ^{40}K in 10 decorative granite stones in Isfahan market by n-type HPGe detector GMX40P4-76, manufactured by ORTEC company. According to the results, almost 90% of these samples have exceeded permitted values. Since the experimental measurements are time-consuming and need standard sources for detection of radioactive sources and calibration of detectors, simulation method will be used to estimate the detector efficiency. To do this, we simulated the geometry of HPGe detector using the Monte Carlo MCNPX version 2.6 code, then changed the dead layer thickness of the detector so that the calculated and experimental efficiencies were comparable to each other. Then, the sample of decorative granite stones was simulated and the results compared to the experimental data. Regarding the results, we conclude that the detector is well simulated and the dead layer is accurately taken into account, so it can be applied in future studies.

Keywords: Radiation, Decorative Granite Stones, HPGe Detector, soil volume source.

Email: hassanvand@iut.ac.ir

۱. مقدمه

انسان همواره در معرض تابش‌های یونیزان محیطی قرار دارد که می‌تواند بسته به دوز دریافتی زیان‌آور باشد. پرتوهای ناشی از سنگ‌ها و خاک جز مهم‌ترین منابع تابش‌های یونیزان هستند. مصالح ساختمانی دارای هسته‌های پرتوزا، مهم‌ترین تاثیر را در ایجاد این تابش‌ها دارند. سنگ‌های گرانیته زینتی از جمله مصالح ساختمانی است که به‌طور گسترده در ساختمان‌ها و منازل مسکونی استفاده می‌شود. عمده‌ی پرتوگیری‌های محیطی، ناشی از سری‌های واپاشی عناصر پرتوزای طبیعی ^{238}U ، ^{232}Th و ایزوتوپ پرتوزای ^{40}K می‌باشد. آشکارساز HPGe ابزاری دقیق برای تعیین غلظت رادیونوکلوئیدهای پرتوزای ^{238}U ، ^{232}Th و ^{40}K در مصالح ساختمانی است [۱-۳]. بررسی نمونه‌های محیطی توسط آشکارساز HPGe نیاز به یک چشمه استاندارد هم جنس و هم شکل با نمونه دارد. با توجه به هزینه‌بر بودن تهیه‌ی چشمه استاندارد، می‌توان روش شبیه‌سازی را جایگزین آن کرد. در این مقاله، از کد MCNPX برای تعیین بازده یک آشکارساز HPGe استفاده شد. برای سازگاری نزدیکتر بازده شبیه‌سازی به بازده تجربی، لبه‌های کریستال ژرمانیوم گرد و رشد لایه‌ی مرده‌ی آشکارساز به صورت ناهمگن در نظر گرفته شد [۴]. در ادامه طیف تجربی ۱۰ نمونه سنگ‌گرانیته زینتی موجود در بازار اصفهان با استفاده از آشکارساز HPGe اندازه‌گیری شد. بازده آشکارساز HPGe به‌وسیله چشمه استاندارد خاکی به‌دست آمد. برای به‌دست آوردن نتیجه بهتر و بازده دقیق‌تر برای چشمه‌های مجهول گرانیته، آشکارساز HPGe به‌وسیله‌ی کد مونت کارلوی MCNPX شبیه‌سازی شد.

۲. روش کار و مواد

۲-۱. روش تجربی

در این مطالعه ۱۰ نمونه سنگ‌گرانیته زینتی اصفهان، فروشگاه‌های سطح شهر تهیه شد. این نمونه‌ها پس از فرآوری در ظروف مارینلی نگهداری شد. به‌وسیله‌ی آشکارساز فوق خالص HPGe مدل GMX40P4-76 نوع n، ساخت شرکت ORTEC که بازده نسبی آن ۴۰٪ در انرژی ۱۳۳۲ keV برای ^{60}Co و قدرت تفکیک آشکارساز در انرژی ۵۹ keV برابر با ۷۶۰ eV و در ۱۳۳۲ keV برابر با ۲ keV است، پرتوهای گامای این نمونه‌ها اندازه‌گیری شد [۵]. بازده آشکارساز HPGe با استفاده از یک چشمه استاندارد خاکی استفاده شد. این چشمه به‌وسیله سه رادیونوکلوئید ^{241}Am ، ^{152}Eu و ^{137}Cs استاندارد شده است. مشخصات چشمه استاندارد خاکی در جدول ۱ آورده شده است. بازده مطلق آشکارساز با استفاده از رابطه‌ی ۱ محاسبه شد:

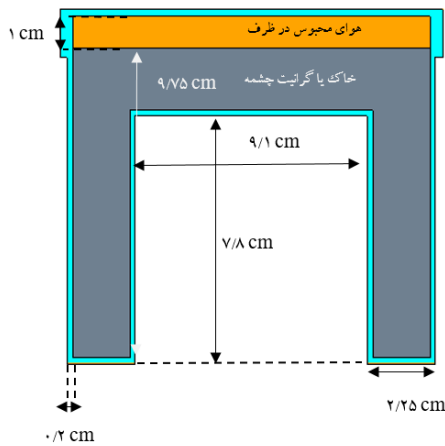
$$\varepsilon = \frac{N}{A I_{\gamma} T} \quad (1)$$

که در آن N شمارش خالص زیر قله تمام انرژی متناظر با انرژی E، فعالیت چشمه استاندارد در زمان طیف‌گیری، T مدت زمان طیف‌گیری به ثانیه و I_{γ} احتمال واپاشی اشعه گاما با انرژی E است. بازده آشکارساز به ازای طیف انرژی چشمه استاندارد به‌دست آمد و با استفاده از آن نمودار بازده - انرژی رسم شد. با برازش بهترین معادله لگاریتمی، بازده آشکارساز به ازای انرژی‌هایی که در چشمه استاندارد وجود ندارند، به‌دست آمد [۶]. معادله‌ی لگاریتمی برازش شده بر نمودار بازده-انرژی در معادله ۲ آورده شده است. ضریب رگرسیون، R^2 ، آن برابر با ۰/۹۹۴۷۶ و ε بازده به ازای انرژی خاص E است. [۶]:

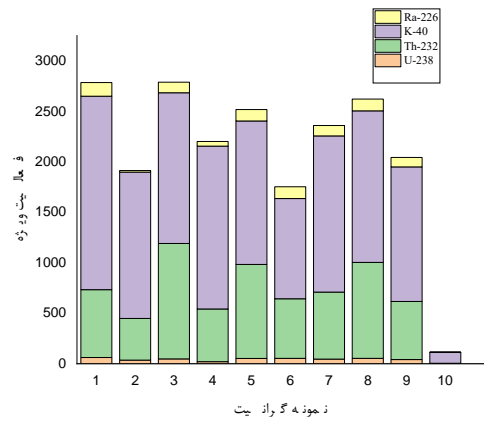
$$\varepsilon(E) = \exp(a + b(\ln E) - c(\ln E)^2 + d(\ln E)^3) - e(\ln E)^4 \quad (2)$$

جدول ۱. مشخصات چشمه استاندارد خاکی.

فعالیت در زمان طیف‌گیری بر حسب بکرل	تاریخ طیف‌گیری	فعالیت در زمان تولید بر حسب بکرل	تاریخ تولید	نیمه عمر بر حسب سال	نوع رادیوایزوتوپ
$1842/10244 \pm 37$	۳۰ ژوئن/۲۰۱۹	1850 ± 37	۱۳۱/۷ اکتبر/۲۰۱۶	۴۳۲/۶	^{241}Am
$645/311724 \pm 37$		740 ± 37		۱۳/۵۱۷	^{152}Eu
$2783/37224 \pm 37$		2690 ± 37		۳۰/۰۸	^{137}Cs



شکل ۲: ظرف مارینلی و چشمه شبیه‌سازی شده.



شکل ۱. فعالیت ۱۰ نمونه سنگ گرانیتی

۲-۲. اندازه‌گیری ویژه فعالیت هسته‌های پرتوزا در نمونه‌های گرانیتی

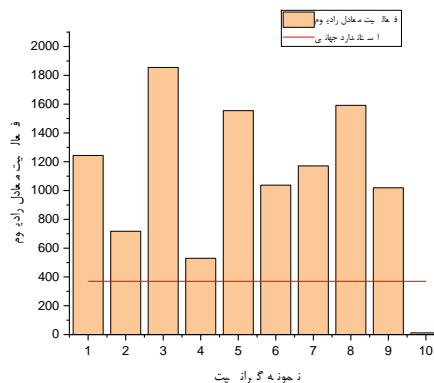
ویژه فعالیت هسته‌های پرتوزای ^{232}Th ، ^{238}U ، ^{226}Ra و ^{40}K با استفاده از رابطه‌ی زیر محاسبه شد:

$$A(\text{BqKg}^{-1}) = \frac{N}{\varepsilon I_{\gamma} T m} \quad (۳)$$

در این رابطه N تعداد شمارش خالص زیر قله تمام انرژی، ε بازده آشکارساز به ازای یک انرژی معلوم، I_{γ} احتمال واپاشی اشعه گاما، T کل زمان شمارش برحسب ثانیه و m جرم نمونه‌ها به کیلوگرم است. برای محاسبه ویژه فعالیت ^{232}Th ، از پرتوی گامای ^{208}Tl با انرژی 2614.5 keV و 583.5 keV و ^{228}Ac در انرژی 911.1 keV ، برای ^{238}U از دو خط پرتوی گامای ^{214}Bi با انرژی 609.3 keV و 214Pb با انرژی 351.9 keV و ویژه فعالیت ^{40}K با استفاده از خط گامای این هسته با انرژی 1460.83 keV به دست آمد. فعالیت ویژه این هسته‌ها در جدول ۲ و شکل ۱ نشان داده شده است [۷-۹]. برای ارزیابی خطرات ناشی از تشعشعات مربوط به مصالح ساختمانی Ra_{eq} محاسبه شد. از Ra_{eq} به عنوان یک شاخص مشترک برای به دست آوردن مجموع فعالیت‌های ^{232}Th ، ^{238}U و ^{40}K استفاده می‌شود که از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید [۱۰]:

$$Ra_{\text{eq}} = A_{\text{Ra}} + 1/43A_{\text{Th}} + 0/077A_{\text{K}} \quad (۴)$$

که A_{K} و A_{Th} ، A_{Ra} فعالیت ویژه این عناصر برحسب BqKg^{-1} است. برای تمام مصالح ساختمانی Ra_{eq} باید از 370 BqKg^{-1} کمتر باشد [۱۱]. در جدول ۲ فعالیت معادل رادیوم و در شکل ۳ مقایسه فعالیت معادل این عناصر با استاندارد جهانی آورده شده است.



شکل ۳. فعالیت معادل رادیوم نمونه‌های گرانیتی در مقایسه با استاندارد جهانی.

جدول ۲. میانگین فعالیت ویژه هسته‌های پرتوزای طبیعی ^{238}U ، ^{226}Ra ، ^{232}Th و ^{40}K در نمونه سنگ‌های گرانیتی زینتی

شماره	$^{238}\text{U}(\text{BqKg}^{-1})$	$^{232}\text{Th}(\text{BqKg}^{-1})$	$^{40}\text{K}(\text{BqKg}^{-1})$	$^{226}\text{Ra}(\text{BqKg}^{-1})$	$\text{Ra}_{\text{eq}}(\text{BqKg}^{-1})$
۱	$61/34 \pm 0/23$	$671/82 \pm 4/19$	$1916/25 \pm 5/35$	$135/26 \pm 1/34$	۱۲۴۳/۵۱
۲	$35/62 \pm 0/18$	$413/03 \pm 3/35$	$1449/61 \pm 4/74$	$15/21 \pm 0/46$	۷۱۷/۶۱
۳	$48/09 \pm 0/22$	$1143/34 \pm 5/77$	$1492/57 \pm 4/99$	$104/68 \pm 1/24$	۱۸۵۴/۵۹
۴	$20/09 \pm 0/14$	$251/78 \pm 2/66$	$1613/53 \pm 5/08$	$45/65 \pm 0/81$	۵۲۹/۹۴
۵	$51/94 \pm 0/22$	$931/47 \pm 5/19$	$1420/63 \pm 4/85$	$113/36 \pm 1/29$	۱۵۵۴/۷۵
۶	$52/96 \pm 0/22$	$590/54 \pm 3/97$	$992/84 \pm 3/88$	$116/55 \pm 1/25$	۱۰۳۷/۴۷
۷	$46/04 \pm 0/20$	$663/65 \pm 4/16$	$1546/57 \pm 4/80$	$103/01 \pm 1/17$	۱۱۷۱/۱۲
۸	$53/00 \pm 0/21$	$950/33 \pm 4/99$	$1501/54 \pm 4/73$	$116/89 \pm 1/24$	۱۵۹۱/۴۸
۹	$41/60 \pm 0/18$	$575/11 \pm 3/74$	$1333/02 \pm 4/03$	$93/79 \pm 1/08$	۱۰۱۸/۸۴
۱۰	$0/409 \pm 0/02$	$4/35 \pm 0/34$	$109/02 \pm 1/10$	$0/86 \pm 0/09$	۱۲/۰۷

۲-۳. شبیه‌سازی آشکارساز و ظرف مارینلی

شبیه‌سازی آشکارساز HPGe، به اطلاعاتی چون هندسه و جنس اجزای مختلف آن نیاز دارد. این اطلاعات از کاتالوگ مربوط به شرکت سازنده و چند مقاله و مطالعات دیگر به دست آورده شد [۹-۱۴]. در این مطالعه از کد مونت کارلوی MCNPX2.6 و نرم افزار Visual Editor با ورژن X-225-2 برای مشاهده هندسه استفاده شد. در طراحی آشکارساز، برای تعریف سطوح از استوانه استفاده شد. محور این استوانه در راستای محور X و مبدا مختصات در قسمت زیرین بلور ژرمانیوم فوق خالص در نظر گرفته شد به صورتی که صفحه $X=0$ قسمت کف این بلور را تعریف می‌کند. آشکارساز شامل قسمت‌های مختلف مانند، محافظ سربی و ... است که با استفاده از داده‌های کاتالوگ و دیگر مقالات شبیه‌سازی شد. چشمه مورد استفاده در این تحقیق یک چشمه استاندارد خاکی و نمونه‌ی گرانیتی مجهول است. برای شبیه‌سازی چشمه به ابعاد و ماده‌ی تشکیل دهنده ظرف مارینلی و جنس چشمه نیاز است. به این منظور ابعاد یک ظرف مارینلی خالی اندازه‌گیری شد [۱۲]. در طراحی ظرف مارینلی از دو استوانه هم مرکز استفاده شد: یک پوسته‌ی استوانه‌ای به طول ۹/۷۵ cm از ۰/۴۱۶ cm تا ۱۰/۱۶۶ cm و شعاع ۲/۲۵ cm از ۴/۵۵ cm تا ۷ cm. استوانه‌ی دیگر ارتفاعی به طول ۱/۹۵ cm از ۸/۲۱۶ cm تا ۱۰/۶۶ cm و شعاع ۴/۷۵ cm از مبدا مختصات تا ۴/۷۵ cm. در شکل ۲ ظرف مارینلی و ابعاد چشمه ذکر شده نشان داده شده است. برای شبیه‌سازی مواد تشکیل دهنده‌ی اجزای مختلف آشکارساز و چشمه استاندارد خاکی از راهنمای کد MCNPX استفاده شد [۱۵].

۲-۴. طیف شبیه‌سازی

طیف تجربی حاصل از طیف نگاری نمونه‌ها به صورت گاوسی است. از کارت GEB در کد MCNPX، برای شبیه‌سازی طیف گاوسی و پهن‌شدگی هر قله در طیف استفاده شد. برای محاسبه‌ی پهن‌شدگی یا FWHM در تالی F8 با استفاده از کارت GEB، FWHM‌های متناظر با هر قله از طیف تجربی کالیبره شده بدون طیف زمینه استخراج شد و نمودار FWHM بر حسب انرژی رسم شد، با برازش فرمول ۵ بر نمودار، ضرایب a، b و c به دست آمد. از نرم‌افزار Origin Pro برای برازش منحنی استفاده شد. ضریب a بر حسب MeV، b بر حسب $\text{MeV}^{1/2}$ و c بر حسب MeV^{-1} هستند.

$$\text{FWHM}(E) = a + b\sqrt{E} + cE^2 \quad (5)$$

مقادیر FWHM و انرژی مربوط به آن در جدول ۳ نشان داده شده است. ضرایب پهن‌شدگی که از برازش به دست آمده است، برابر با:

$$a = 1/05 \times 10^{-3} \text{MeV}, \quad b = 1/5 \times 10^{-3} \text{MeV}^{1/2}, \quad c = 0/07313 \text{MeV}^{-1} \text{ است.}$$

جدول ۳: مقادیر FWHM و انرژی مربوط به آن.

Energy(MeV)	۰/۱۲۱۸۶	۰/۲۴۴۷۸	۰/۳۴۴۳۲	۰/۶۶۱۶۸	۰/۷۷۸۹۱	۰/۹۶۴۰۵۷	۱/۰۸۵۸۳	۱/۱۱۲۰۷	۱/۴۰۸۰۳
FWHM(MeV)	۱/۱۲	۱/۲۶	۱/۳۴	۱/۵۷	۱/۶۷	۱/۸۶	۱/۹۳	۱/۹۵	۲/۲۱

۲-۵. بازده شبیه‌سازی

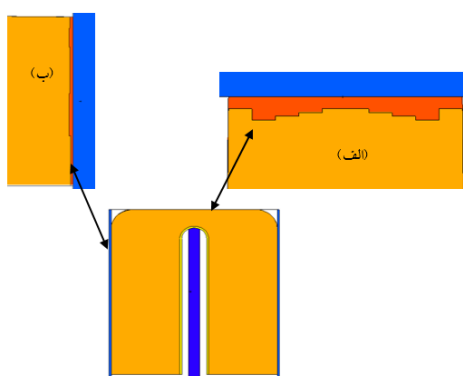
بازده یکی از پارامترهای مهم در آشکارساز است. از این رو برای مقایسه‌ی درستی شبیه‌سازی و اعتبارسنجی آن از مقایسه بازده انرژی شبیه‌سازی و تجربی استفاده شد. از خروجی کد MCNPX می‌توان اطلاعات مختلفی به دست آورد. از جمله این اطلاعات مقدار تالی به ازای هر پیک انرژی است. در این شبیه‌سازی از تالی F8 برای محاسبه‌ی مقدار ذرات ثبت شده در هر سلول استفاده شد [۱۶]. عدد تالی، مقدار $\frac{N}{A}$ به ازای هر انرژی است که N تعداد ذره‌ی ثبت شده به ازای یک انرژی خاص و A فعالیت کل یا به عبارتی تعداد ذراتی است که برنامه به ازای آن اجرا شده است. خروجی کد MCNPX مقدار تالی برای هر انرژی به ازای یک ذره را نشان می‌دهد، بنابراین مقدار A برابر با یک و N مقدار تالی خواهد بود. با در اختیار داشتن مقدار $\frac{N}{A}$ به ازای هر انرژی می‌توان بازده مطلق را برای چشمه استاندارد خاکی با استفاده از عبارت ۶ محاسبه کرد:

$$\varepsilon = \frac{N}{AI_{\gamma}} \quad (6)$$

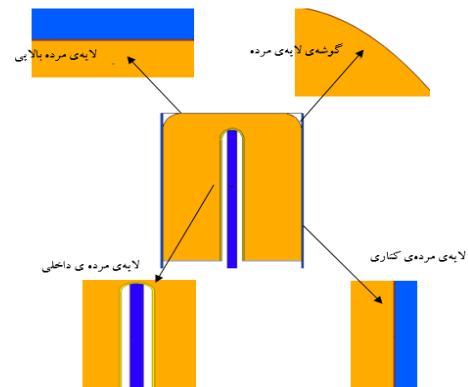
در عبارت فوق، I_{γ} احتمال واپاشی ذره به ازای انرژی مورد نظر است. به طور معمول مجموع درصد احتمال در هر رادیونکلئید کمتر یا بیشتر از ۱ است. رادیونکلئیدهای موجود در چشمه استاندارد خاکی شامل ^{137}Cs ، ^{152}Eu و ^{241}Am که در این بین ^{137}Cs یک قله‌ی انرژی دارد و ^{152}Eu دارای ۱۷۳ گامای گسیلی می‌باشد، از آنجا که کد MCNPX احتمال‌های واپاشی را به یک بهنجار می‌کند، برای محاسبه‌ی بازده شبیه‌سازی باید از احتمال بهنجار شده استفاده کرد.

جدول ۴: بازده تجربی و شبیه‌سازی مطالعه حاضر و مرجع (۱۲).

انرژی	مرجع (۱۲)		مطالعه‌ی حاضر		درصد اختلاف
	بازده تجربی	بازده شبیه‌سازی	بازده تجربی	بازده شبیه‌سازی	
۱۲۱/۷۸۱	0.0479 ± 0.0036	۰/۰۵۴۸	0.0484 ± 0.002	۰/۰۴۵	۶/۲
۲۴۴/۶۷۹	0.0327 ± 0.0024	۰/۰۴۷۹	0.0322 ± 0.0026	۰/۰۳۶	۱۱/۸
۳۴۴/۲۷۸	0.0288 ± 0.0026	۰/۰۳۰۲	0.0279 ± 0.001	۰/۰۲۸۶	۲/۵
۷۷۸/۹۰۴	0.0149 ± 0.0012	۰/۰۱۷۸	0.0145 ± 0.003	۰/۰۱۶۷	۱۵/۱
۹۶۴/۰۵۷	0.0131 ± 0.0009	۰/۰۱۴۸	0.0128 ± 0.0005	۰/۰۱۴۶	۱۴/۱
۱۰۸۵/۸۳	0.0134 ± 0.0009	۰/۰۱۳۸	0.0130 ± 0.001	۰/۰۱۳۶	۴/۶
۱۱۱۲/۰۷	0.0119 ± 0.0009	۰/۰۱۳۵	0.0116 ± 0.0005	۰/۰۱۳۲	۱۳/۷
۱۴۰۸/۰۱	0.0101 ± 0.0007	۰/۰۱۰۵	0.00966 ± 0.0001	۰/۰۱۰۹	۱۲/۸



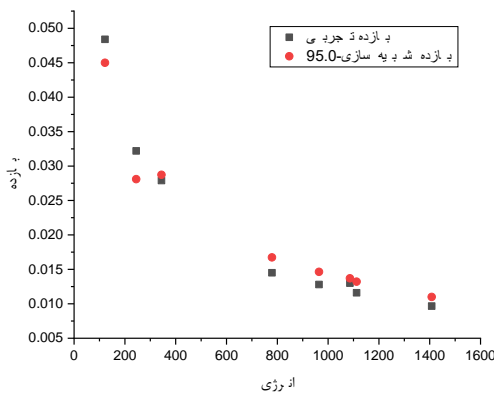
شکل ۴-ب. لایه مرده‌ی فوقانی و لایه مرده کناری با ضخامت‌های ناهمگن.



شکل ۴-الف. لایه‌های مرده‌ی آشکارساز HPGe.

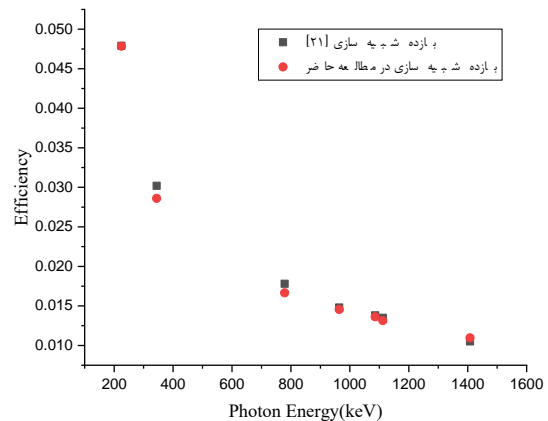
۶-۲. شبیه‌سازی لایه مرده آشکارساز

آشکارساز HPGe یک آشکارساز نیم‌رسانا است که از پیوند p-n تحت بایاس معکوس ساخته شده است. اتصال p-n می‌تواند یک ضخامت قابل مشاهده داشته باشد که نشان‌دهنده یک لایه مرده بر روی سطح بلور ژرمانیوم است. لایه مرده کریستال را می‌توان به لایه مرده داخلی و لایه مرده بیرونی تقسیم‌بندی کرد. لایه مرده بیرونی خود شامل قسمت لایه مرده بالایی، لایه مرده کناری و گوشه‌ها می‌شود (شکل ۴-الف). گوشه‌های کریستال ژرمانیوم و لایه مرده برای جلوگیری اثرات ناشی از میدان الکتریکی، با استفاده از چنبره با مقطع دایره، گرد در نظر گرفته شد [۴]. برای تعیین ضخامت لایه مرده آشکارساز از دو چنبره با شعاع های ۰/۷۹ cm و ۰/۸ cm استفاده شد. ضخامت لایه مرده آشکارساز با گذشت زمان و کارکرد آشکارساز تغییر می‌کند [۱۷]. در این مقاله سعی شد تاثیر لایه مرده بر بازده آشکارساز بررسی شود. به این منظور با استفاده از مطالعات قبلی در این زمینه، لایه مرده آشکارساز HPGe در حدود $0.3 \mu\text{m}$ تخمین زده شد [۱۲ و ۱۷ و ۱۸]. در مرحله اول، برنامه به ازای ضخامت $0.3 \mu\text{m}$ اجرا و با مطالعات قبلی مقایسه شد [۱۲ و ۱۸]. نتیجه این مقایسه در جدول ۴ نشان داده شده است. همانطور که در این جدول ملاحظه می‌شود، درصد اختلافی میان بازده تجربی و شبیه‌سازی چشمه استاندارد خاکی وجود دارد. از علل این اختلاف می‌توان به اثر قله مجموع در گامای هم فرودی، در اختیار نداشتن آنالیز دقیق خاک چشمه و پیکربندی داخلی آشکارساز اشاره کرد. بازده تجربی و شبیه‌سازی به دست آمده در این مطالعه سازگاری خوبی با بازدهی مطالعه مشابه داشت [۱۲]. شکل ۵ مقایسه بازده شبیه‌سازی مطالعه حاضر و مرجع ۱۲ را نشان می‌دهد. سپس لایه مرده در بازه های $0.3 - 0.9 \mu\text{m}$ میکرومتر تغییر داده شد. بازده شبیه‌سازی به ازای ضخامت $0.59 \mu\text{m}$ نسبت به دیگر ضخامت‌ها، به بازدهی تجربی نزدیکتر بود. در شکل ۶ بازده شبیه‌سازی به ازای این ضخامت و بازده تجربی مقایسه شده است. این ضخامت به عنوان ضخامت لایه مرده در نظر گرفته شد. در مطالعه‌ای مشابه ضخامت $0.57 \mu\text{m}$ برای لایه مرده آشکارساز مورد مطالعه به دست آمد [۱۸]. ممکن است که لایه مرده آشکارساز به صورت یکنواخت در قسمت‌های مختلف رشد نکند [۱ و ۲۰]. با استفاده از نتایج قبل لایه مرده کناری و فوقانی به استوانه‌هایی هم مرکز با شعاع و ارتفاع متفاوت تقسیم‌بندی شد [۶]. در شکل ۴-ب این لایه‌های مرده نشان داده شده است. نتایج حاصل از این ضخامت‌های نامتقارن، تفاوت محسوسی با حالت همسان و متقارن آن نشان نداد.



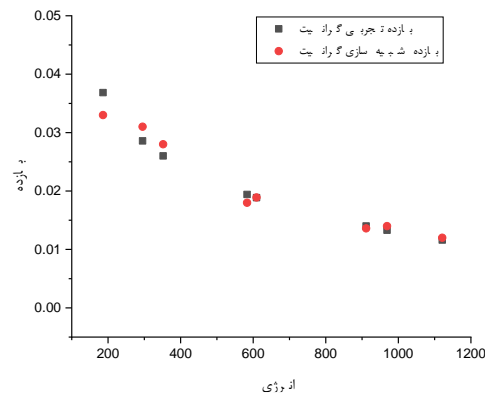
شکل ۶: مقایسه بازده تجربی و بازده شبیه‌سازی به ازای ضخامت

لایه مرده $0.59 \mu\text{m}$.



شکل ۵: نمودار مقایسه بازده شبیه‌سازی چشمه استاندارد خاکی

در مطالعه حاضر و مرجع [۱۲].



شکل ۸: نمودار مقایسه بازده تجربی و بازده شبیه سازی سنگ گرانیت زینتی.

۲-۷. شبیه سازی نمونه گرانیتی

برای اندازه‌گیری پرتوزایی نمونه‌های سنگ گرانیت زینتی با استفاده از آشکارساز HPGe به چشمه‌ی استاندارد از جنس گرانیت نیاز است. به علت در دسترس نبودن چشمه استاندارد مورد نظر، از چشمه استاندارد خاکی که از نظر چگالی نزدیک به چگالی گرانیت است، استفاده شد. برای بررسی از نتایج به دست آمده، چشمه گرانیتی به وسیله‌ی کد MCNPX شبیه‌سازی شد. شبیه‌سازی با استفاده از هندسه‌ی بدست‌آمده در قسمت قبل و طیف انرژی و احتمال واپاشی عناصر پرتوزای ^{232}Th ، ^{238}U و ^{40}K انجام شد. با استفاده از طیف‌های تجربی نمونه گرانیتی انرژی مربوط به هر کانال به دست آمد. برای شبیه‌سازی جنس ماده چشمه گرانیتی از درصد عناصر سنگ گرانیت که در مقاله و راهنمای کد MCNPX به کار رفته بود، استفاده شد [۱۵ و ۲۱]. بازده تجربی و شبیه‌سازی به دست آمده، در جدول ۵ آورده شده است. از مقایسه نتایج بازده شبیه‌سازی با بازده تجربی سنگ گرانیت، سازگاری خوبی به دست آمد. نمودار مقایسه‌ی بازده تجربی و شبیه‌سازی در شکل ۸ آورده شده است.

جدول ۵: بازده تجربی و بازده شبیه سازی نمونه سنگ گرانیتی زینتی

انرژی	بازده تجربی	بازده شبیه سازی	درصد اختلاف
۱۸۶/۲۱	0.036 ± 0.003	۰/۰۳۳	۸/۳
۲۹۵/۲۲	0.029 ± 0.0025	۰/۰۳۱	۶/۹
۳۵۱/۹۳	0.026 ± 0.0003	۰/۰۲۸	۷/۷
۵۸۳/۱۹	0.019 ± 0.004	۰/۰۱۸	۵/۲
۶۰۹/۳۱	0.019 ± 0.0021	۰/۰۱۹	.
۹۱۱/۲	0.014 ± 0.0007	۰/۰۱۴	.
۹۶۸/۹۷	0.013 ± 0.005	۰/۰۱۴	۷/۷
۱۱۲۱/۰۲۶	0.012 ± 0.0036	۰/۰۱۲	.

۳. نتیجه‌گیری

در این مطالعه با استفاده از آشکارساز HPGe نوع n و کد مونت کارلو mcnp پرتوزایی ۱۰ نمونه سنگ گرانیتی به دو روش تجربی و شبیه‌سازی اندازه‌گیری شد. ویژه فعالیت‌های مربوط به هسته‌های پرتوزای طبیعی ^{232}Th ، ^{238}U و ^{40}K موجود در نمونه‌های گرانیتی، به ترتیب بین مقادیر، $4.11-34.96/34 \text{ BqKg}^{-1}$ ، $0.41-61/34 \text{ BqKg}^{-1}$ و $1916/25-109/02 \text{ BqKg}^{-1}$ متغیر است. در این بین، کم‌ترین غلظت ^{232}Th ، ^{238}U و ^{40}K مربوط به نمونه شماره ۱۰ است. بیشترین غلظت ^{238}U و ^{40}K مربوط به نمونه شماره ۱ و بیشترین ^{232}Th متعلق به نمونه شماره ۳ می‌باشد. در قسمت شبیه‌سازی با استفاده از چشمه استاندارد خاکی موجود در آزمایشگاه دانشکده فیزیک دانشگاه صنعتی اصفهان، هندسه تقریبی آشکارساز HPGe شبیه‌سازی و با استفاده از نتایج آن به شبیه‌سازی سنگ‌های گرانیتی پرداخته شد. نتایج شبیه‌سازی چشمه استاندارد خاکی سازگاری خوبی با نتایج تجربی داشت که نشان می‌دهد روش شبیه‌سازی می‌تواند

جایگزین روش‌های تجربی زمان‌گیر و پرهزینه باشد. نتایج شبیه‌سازی در چشمه‌های گرانیته‌ای نیز سازگاری خوبی با نتایج تجربی داشت. این سازگاری نشان می‌دهد که در نبود چشمه استاندارد مطابق با نمونه مجهول می‌توان از چشمه مشابه از نظر جنس و چگالی استفاده کرد. که این امر موجب صرفه‌جویی در وقت و هزینه‌ها می‌شود و سهولت در اندازه‌گیری چشمه‌های مجهول را به ارمغان می‌آورد.

منابع:

- 1- Darwish, D.A.E., Abul-Nasr, K.T.M., El-Khayatt, A.M., "The assessment of natural radioactivity and its associated radiological hazards and dose parameters in granite samples from South Sinai, Egypt", Journal of Radiation Research and Applied Sciences, 8, 17-25, 2015.
- 2- Raghu, Y., Ravisankar, R., Chandrasekaran, A., Vijayagopal, P., Venkatraman, B., "Assessment of natural radioactivity and radiological hazards in building materials used in the Tiruvannamalai District, Tamilnadu, India, using a statistical approach", Journal of Taibah University for Science, 11, 523-533, 2017.
- 3- Al -Zahrani, J.H., "Estimation of natural radioactivity in local and imported polished granite used as building materials in Saudi Arabia", Journal of Radiation Research and Applied Sciences, 10, 241-245, 2017.
- 4- Azli, T., Chaoui, Z., "Performance reevaluation of a N-type coaxial HPGe detector with front edges crystal using MCNPX", Applied Radiation and Isotopes, 97, 106-112, 2015.
- 5- Järvelill, J.I. Koch, R. Raukas, A. and Vaasma, T. 2018. Hazardous radioactivity levels and heavy mineral concentrations in beach sediments of Lake Peipsi, northeastern Estonia, Geologos 24, 1: 1-12
- 6- Guerra, J. G. Rubiano, J. G. Winter, G. Guerra, A. G. Alonso, H. Arnedo, M.A. Tejera, A. Gil, J.M. Rodríguez, R. Martel, P. and Bolivar, J.P. 2015. A simple methodology for characterization of germanium coaxial detectors by using Monte Carlo simulation and evolutionary algorithms, Journal of Environmental Radioactivity 149: 8-18
- 7- Raghu, Y. Ravisankar, R. Chandrasekaran, A. Vijayagopal, P. and Venkatraman, B. 2017. Assessment of natural radioactivity and radiological hazards in building materials used in the Tiruvannamalai District, Tamilnadu, India, using a statistical approach, Journal of Taibah University for Science 11 (2017) 523-533.
- 8- Prakash, M.M. Kaliprasad, C.S. and Narayana, Y. 2017. Studies on natural radioactivity in rocks of Coorg district, Karnataka state, India, Journal of Radiation Research and Applied Sciences xxx: 1-7.
- 9- Al-Zahrani, J. H., "Estimation of natural radioactivity in local and imported polished granite used as building materials in Saudi Arabia", Journal of Radiation Research and Applied Sciences, 10, 241-245, 2017.
- 10-Khabaz, R. and Hassanvand, M. 2017. Radioactivity concentrations and dose characteristics of granite stones, Nuclear Technology & Radiation Protection, 32: 275-280.
- 11- UNSCEAR. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Ionizing Radiation: Sources and Biological Effects. UN (1982).
- ۱۲- صافی، م، شیرانی، الف، رحمانی، خ، ۱۳۹۸. محاسبه‌ی بازده آشکارساز HPGe به دو روش تجربی و شبیه‌سازی برای چشمه‌ی حجیم خاکی، مجله سنجش ایمنی و پرتو، جلد ۷، شماره ۳، تابستان ۱۳۹۸، صفحه ۱۹-۲۸. (In Persian)
- 13- Dokania. N., Singh. V., Mathimaalr. S., Nahal. V., Pal. S., Pillay. R.G., "Characterization and modeling of a low background HPGe detector", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 745, 119-127, 2014.
- 14-GMX Series Coaxial HPGe Detector Product Configuration Guide, ORTEC.
- 15-Williams III, R.G., Gesh, C.J., Pagh, R.T., McConn Jr, R.J., Rucker, RA., Compendium of Material Composition Data for Radiation Transport Modeling, U.S. Department of Energy, 2011.
- ۱۶- کاسه‌ساز، ی، حسن‌زاده، مصطفی، آموزش کد MCNPX، تهران، ۱۳۹۴. (In Persian)
- 17-Chham, E., Pinero Garacia, F., Bardouni, T.El., Angeles Ferro-Gracia, M., Azhahra, M., Benaalilou, K., Krikiz, M., Elyaakoubi, H., Bakkali, J. El., Kaddour, M., "Monte Carlo analysis of the influence of germanium dead layer thickness on the HPGe gamma detector experimental efficiency measured by use of extended sources", Applied Radiation and Isotopes, 97, 30-35, 2015.



۱۸- تعیین لایه‌مرده و بازده قله تمام- انرژی آشکارساز HPGe با استفاده از کد MCNP و نتایج تجربی، مجله پژوهش فیزیک ایران، جلد ۶، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۵. (In Persian)

19- Markovic, N., Roos, P., Hou, X., Nielsen, S., “Calibration of HPGe–HPGe coincidence spectrometer through performing standardization of 125I activity by X-ray-gamma coincidence spectrometry using two HPGe detectors”, Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, 880,194–200, 2018.

20 -Dokania. N., Singh. V., Mathimaalr. S., Nahal. V., Pal. S., Pillay. R.G., “Characterization and modeling of a low background HPGe detector”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 745, 119-127, 2014.

۲۱- عباسی، الف، حسن زاده، م، شبیه‌سازی و محاسبه دز گامای ناشی از کف پوش‌های گرانیتی در منازل مسکونی با استفاده از کد MCNPX، بیست و دومین کنفرانس هسته‌ای ایران، دانشگاه یزد، اسفند ۱۳۹۴. (In Persian)