



مطالعه‌ی خودجذبی نمونه‌های محیطی در طیف‌نمایی گاما

محبوبه لطفی^{*}، سیدمجتبی مستجاب‌الدعواتی^۲، بهزاد تیموری سیجانی^۳

۱. دانشکده‌ی علوم و فن آوری نوین، دانشگاه اصفهان، صندوق پستی: ۸۱۷۴۶-۷۳۴۴۱، اصفهان - ایران

۲. دانشکده‌ی فیزیک، دانشگاه اصفهان، صندوق پستی: ۸۱۷۴۶-۷۳۴۴۱، اصفهان - ایران

۳. پژوهشکده‌ی تحقیقات و توسعه‌ی رآکتورها و شتاب‌دهنده‌ها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، صندوق پستی: ۸۱۴۶۵-۱۵۸۹، اصفهان - ایران

چکیده: آشکارساز HPGe دانشگاه اصفهان به کمک کد محاسباتی MCNP شبیه‌سازی و تابع پاسخ آن تعیین شد. سپس برنامه‌ی شبیه‌سازی شده برای چشمه‌های حجمی مارینلی با ترکیب‌ها و چگالی‌های مختلف ($Z=10-90$, $\rho=0.8-2$ g/cm³) اجرا شد. هم‌چنین طیف‌نمایی با آشکارساز مذکور، در آزمایشگاه برای نمونه‌های حجمی مارینلی با درصدهای خودجذبی متفاوت به انجام رسید. سپس با جمع‌آوری و مقایسه‌ی نتایج، چگونگی اثرات چگالی و ترکیب نمونه‌ها بر میزان خودجذبی در طیف‌های گاما، برای چشمه‌های مارینلی بحث و بررسی و برای هر دو حالت تجربی و شبیه‌سازی، نمودار سطح بازده برحسب انرژی پرتو گاما و چگالی نمونه رسم شد. با مقایسه‌ی نتایج تجربی و شبیه‌سازی توانمندی روش شبیه‌سازی برای محاسبه‌ی بازده برحسب دو پارامتر انرژی و چگالی تأیید شد. این روند می‌تواند برای تولید منحنی بازده مناسب، برای هر چگالی نمونه به کار برده شده و سبب کاهش تعداد استاندارد مورد نیاز در آزمایشگاه و هزینه‌های مربوطه شود. علاوه بر آن مشاهده شد که در مسأله‌ی خودجذبی، چگالی نسبت به نوع ترکیب، اثر بیش‌تری دارد و بر خودجذبی کل گستره‌ی انرژی مورد مطالعه تأثیرگذار است، در حالی که تأثیر نوع ترکیب، تنها در گستره‌ی انرژی‌های کم‌تر از ۴۰۰ keV است.

کلیدواژه‌ها: طیف‌نمایی گاما، نمونه‌های محیطی، خودجذبی، HPGe MCNP

Study of Self-Absorption in Gamma-Ray Spectroscopy of Environmental Samples

M. Lotfi^{*1}, S.M. Mostajabodaavati², B.T. Sichani³

1. Faculty of Advanced Sciences & Technologies, University of Isfahan, P.O.Box: 81746-73441, Isfahan – Iran

2. Department of Physics, University of Isfahan, P.O.Box: 81746-73441, Isfahan – Iran

3. Reactor & Accelerator Research & Development School, Nuclear Science & Technology Research Institute, P.O.Box: 81465-1589, Tehran – Iran

Abstract: HPGe detector has been simulated by using MCNP code, and the detector response has been determined. Monte Carlo simulations have been performed for different elemental composition and density as environmental Marinelli samples ($Z=10-90$, $\rho=0.8-2$ g/cm³). Likewise, more experiments were carried out in the laboratory scale using five samples with different self-absorption albeit with the same detector described previously. The effects of source elemental composition and density on the self-absorption in gamma-ray spectroscopy of environmental Marinelli samples are discussed. For both cases of experimental and simulated studies a surface plot of the efficiency vs gamma-ray energy and sample density has been calculated for the said detector. By comparing the results upon applying, two methods show that the simulation method has been successful leading to efficiency as a function of both gamma-ray energy and sample density. The same surface can be used to derive an efficiency curve for any sample density within the calibrated range of densities. Also, it is possible to use this three-dimensional curve to reduce the number of calibration standards of different required densities, where it leads to reducing the laboratory operating costs. The results showed that the sample density was more important than the composition in self-absorption problem. In addition, the effects of the sample density on self-absorption in all range of the energy under the study are visible, but the chemical composition effects appear only for the $E<400$ keV condition.

Keywords: Gamma Spectroscopy, Environmental Samples, Self-Absorption, MCNP, HPGe

*email: M.Lotfi_Isfahan@yahoo.com

تاریخ دریافت مقاله: ۹۰/۸/۲۳ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۲/۹/۲۸

۱. مقدمه

امروزه مطالعه‌های زیادی در زمینه‌ی شناخت منابع پرتوزای طبیعی و تعیین فراوانی عناصر پرتوزا، در ایران و در سراسر جهان در حال اجرا است. یکی از اهداف این مطالعه‌ها، مشخص کردن نقاط آلوده به عناصر پرتوزا به منظور کنترل آلودگی‌های هسته‌ای و پی‌آمدهای ناشی از آن است [۱، ۲، ۳]. در مطالعه‌های مذکور، اطلاع از بازده دقیق آشکارساز، گامی تعیین‌کننده در راستای محاسبه‌ی هر چه دقیق‌تر پرتوایی نمونه‌های مجهول است [۴].

دقیق‌ترین راه برای تعیین بازده آشکارساز، اندازه‌گیری تجربی با استفاده از چشمه‌های استاندارد، برای هر پیکربندی^(۱) چشمه-آشکارساز معین است؛ از آنجایی که این چشمه‌های استاندارد می‌باید از نظر فیزیکی و شیمیایی و هم‌چنین توزیع پرتوایی در حجم آن‌ها مشابه نمونه‌های تحت تجزیه باشند، بنابراین پیاده‌سازی این روش، مشکل، خسته‌کننده و زمان‌بر است [۵].

در روش تعیین بازده آشکارساز براساس اندازه‌گیری تجربی و استفاده از چشمه‌های استاندارد خاص، یکی از معضلات، تهیه‌ی نمونه‌های استاندارد متعدد است [۴، ۵]. به دلیل وجود مشکلات در تولید این نمونه‌ها، تهیه‌ی نمونه‌های استاندارد با محدودیت مواجه است [۶]. این محدودیت باعث می‌شود برای نمونه‌های با چگالی و ترکیب‌های مختلف، یک نمونه‌ی استاندارد با یک چگالی مشخص به کار برده شود. به این ترتیب، در اکثر تجزیه‌ها از عامل خودجذبی در انرژی‌های پایین‌تر تا حد زیادی چشم‌پوشی می‌شود که به طور حتم در محاسبات پرتوایی خطا ایجاد خواهد کرد.

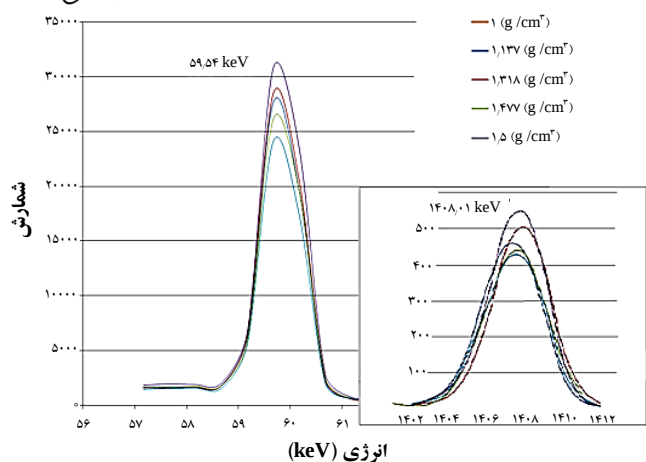
به دنبال مطرح شدن چنین مشکلاتی، تلاش‌های زیادی برای تصحیح خودجذبی در محاسبات پرتوایی مطرح شده است [۵، ۷، ۸، ۹، ۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۳]. یکی از راه‌کارهای معمول برای کم اثر کردن عامل خودجذبی در مباحث طیف‌نگاری گامای چشمه‌های حجیم، این است که به جای اکتفا کردن به یک منحنی بازده-انرژی برای چندین چشمه‌ی استاندارد، که یک گستره‌ی چگالی را پوشش می‌دهند، بازده-انرژی محاسبه و با جمع‌آوری این بازده-انرژی‌ها برحسب چگالی چشمه‌ها در یک نمودار، یک منحنی سطح به دست آورده شود که متغیرهای آن بازده، چگالی و انرژی هستند [۵]. این منحنی سطح در یک چگالی ثابت همانند منحنی دو بعدی بازده-انرژی رفتار خواهد کرد. واضح است که استفاده از یک منحنی سطح بازده-انرژی-

چگالی، نتایج دقیق‌تری را نسبت به حالتی که به یک منحنی دوبعدی بازده-انرژی بسنده می‌کنیم به دست خواهد داد. این روش قبلاً در آزمایشگاه انجام و تأیید شده است [۵]. در این روش وجود ۶ نمونه‌ی استاندارد کفایت می‌کند [۵]، اما با بودن مشکلاتی که در تهیه‌ی چشمه‌های استاندارد عنوان شد، عموماً این تعداد استاندارد در یک هندسه‌ی معین، در آزمایشگاه موجود نیست. بنابراین این نیازمندی یکی از جنبه‌های منفی و محدودیت‌زای این روش محسوب می‌شود. چنان‌چه روش مذکور به کمک شبیه‌سازی نتایج مطلوبی ارایه کند، محدودیت این روش (نیاز به یک مجموعه از چشمه‌های استاندارد) برداشته خواهد شد. بنابراین در این مطالعه، به بررسی میزان کارایی کد محاسباتی MCNP، در روش مذکور پرداخته شد. برای این منظور، روش فوق در یک کار آزمایشگاهی برای ۵ چشمه‌ی استاندارد در گستره‌ی چگالی ۱/۰ تا ۱/۵ g/cm^۳ به کار گرفته شد. سپس شرایط آزمایشگاه به کمک کد محاسباتی MCNP، شبیه‌سازی و روش مورد نظر برای همان شرایط از طریق شبیه‌سازی تکرار شد. نتایج حاصل از روش تجربی، معیاری برای بررسی میزان صحت و کارایی روش به شیوه‌ی شبیه‌سازی قرار گرفت. سپس با استفاده از مقایسه‌ی نتایج تجربی و شبیه‌سازی تابع اصلاح‌کننده‌ای برای نتایج شبیه‌سازی به دست آمد که نتایج محاسبات MCNP را در حد آرمانی بر نتایج تجربی تطبیق داد. بنابراین کارایی MCNP در محاسبه‌های رویه‌ی سه‌بعدی بازده، تأیید شد. نهایتاً با استفاده از شبیه‌سازی، رویه‌ی سه بعدی برای ۹ نمونه و در گستره‌ی وسیع‌تری از چگالی (۱ تا ۲ g/cm^۳) برای آشکارساز و هندسه‌ی مورد مطالعه محاسبه شد.

هم‌چنین در این پژوهش، اثر نادیده انگاشتن خودجذبی روی طیف حاصل از ^{۶۰}HPGe، میزان نقش چگالی و نوع ترکیب نمونه در عامل خودجذبی، رقابت این دو عامل و بازده‌ی انرژی که نقش مؤثرتری در آن ایفا می‌کنند، بررسی شد.

۲. تجهیزهای مورد استفاده

آشکارساز استفاده شده، HPGe نوع n، مدل GMX_10180 ساخت شرکت آرتک، با بازده نسبی ۱۰٪ و قدرت تفکیک ۱/۸ keV در انرژی ۱۳۳۲/۵ keV پرتو گامای کبالت-۶۰ بود. آشکارساز مذکور از طریق یک سیستم تقویت‌کننده‌ی الکتریکی به یک تحلیل‌گر بس کاناله‌ی تهیه شده از انستیتو فیزیک کاربردی (IAP) متصل می‌شد. سپس طیف‌های ثبت شده، با



شکل ۱. مقطع طیف‌های حاصل از چشمه‌های مارینلی با هندسه و پرتوزایی‌های یکسان ولی با چگالی‌ها و خودجذبی‌های متفاوت در انرژی‌های ۵۹ و ۱۴۰٫۸۰۱ keV، تهیه شده با آشکارساز HPGe. بیان‌گر تفاوت ناشی از خودجذبی متفاوت چشمه‌های حجیم در مساحت سطح زیر قله‌ها است.

بازده به دست آمده مبنای محاسبات پرتوزایی برای سایر چشمه‌ها قرار گرفت و خطای نسبی در محاسبه‌ی فعالیت پرتوزایی‌ها برای حالت‌های متفاوت محاسبه شد. روند مذکور با مرجع قرار دادن هر یک از چشمه‌های استاندارد، تکرار شد. نتایج محاسبات، بیان‌گر خطای میانگین ۱۷/۸، ۸/۷ و ۷/۹٪، به ترتیب، برای گستره‌های انرژی: $E < 100$ ، $100 < E < 400$ ، $E > 400$ keV بود. از طرفی با داشتن بازده برای چگالی‌های مختلف، منحنی‌های سطح بازده-انرژی-چگالی برای چشمه‌های استاندارد به روش تجربی تعیین شد.

۴. شبیه‌سازی

شبیه‌سازی آشکارساز مطابق با مشخصات ارایه شده در مرجع [۱۴] و تصویر فلئوئورسانی پرتو ایکس (XRF) تهیه شده از آن، انجام شد (جدول ۱ و شکل ۲). پس از مشاهده‌ی اختلاف بین مقادیر محاسبه شده به وسیله‌ی کد محاسباتی مونت کارلو و داده‌های تجربی، با تغییر دادن ضخامت لایه‌ی مرده‌ی بلور به میزان خیلی کم و برآزش منحنی شبیه‌سازی شده با منحنی تجربی، حجم فعال بلور آشکارساز محاسبه شد و بدین ترتیب تطابق نتایج تجربی و محاسباتی در حد مطلوب حاصل شد [۱۵، ۱۶، ۱۷، ۱۸]. سپس چشمه‌های مارینلی موجود در آزمایشگاه با مشخصات ارایه شده در بخش ۲ به این شبیه‌سازی اضافه شد (دانستن ترکیب عنصری هر یک از چشمه‌های استاندارد برای شبیه‌سازی ضروری بود که از طریق تجزیه‌ی فلئوئورسانی پرتو ایکس برای هر نمونه تعیین شد [۱۸، ۱۹]).

استفاده از نرم‌افزار Maestro مقیاس‌بندی و در ادامه به کمک نرم‌افزار Omnigam سطح زیر قله‌های تمام انرژی تعیین می‌شد. وسایل و تجهیزهای مورد نیاز آزمایش‌ها شامل: چشمه‌های نقطه‌ای استاندارد، نظیر کبالت-۶۰، سزیم-۱۳۷، اروپیم-۱۵۲ و امرسیم-۲۴۱ بود که طیف آن‌ها برای ارزیابی تطابق بین نتایج تجربی و محاسبات MCNP، و به منظور اطمینان از صحت خروجی‌های کد استفاده شد. چشمه‌های مارینلی استاندارد استفاده شده در این پژوهش شامل: امرسیم-۲۴۱ (با فعالیت پرتوزایی 1.75 ± 0.02 kBq)، سزیم-۱۳۷ (4.03 ± 0.06 kBq) و اروپیم-۱۵۲ (1.81 ± 0.02 kBq) بودند که به لحاظ هندسه، پرتوزایی و زمان ساخت یکسان بوده و تنها تفاوتشان در خودجذبی متفاوت ناشی از خاک متفاوت تشکیل‌دهنده‌ی آن‌ها بود. خاک درون این ظروف مارینلی خاک معمولی نوشهر، خاک مزرعه، خاک کوه، شن ساحل و سنگ تراورتن، با چگالی‌های به ترتیب، ۱، ۱٫۱۳۷، ۱٫۳۱۸، ۱٫۴۷۷ و ۱٫۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب بود.

۳. محاسبات

طیف چشمه‌های مارینلی با خودجذبی‌های متفاوت در یک نمودار گنجانده شد که برشی از آن در شکل ۱ آمده است. با توجه به مشخصات یکسان چشمه‌های مذکور، تفاوت مشاهده شده در طیف‌های خروجی، تنها ناشی از خودجذبی‌های متفاوت این نمونه‌ها است. همان‌گونه که از شکل پیدا است خودجذبی، مساحت سطح زیر قله‌ها را تغییر می‌دهد و منجر به خطا در محاسبه‌ی بازده و در نتیجه فعالیت پرتوزایی‌ها می‌شود.

به منظور برآورد مقدار خطای ناشی از این امر، یکی از این نمونه‌ها به عنوان استاندارد فرض شد. سپس بازده در گستره‌ی انرژی مورد نظر، برای چشمه‌ی استاندارد مذکور محاسبه شد [۲]

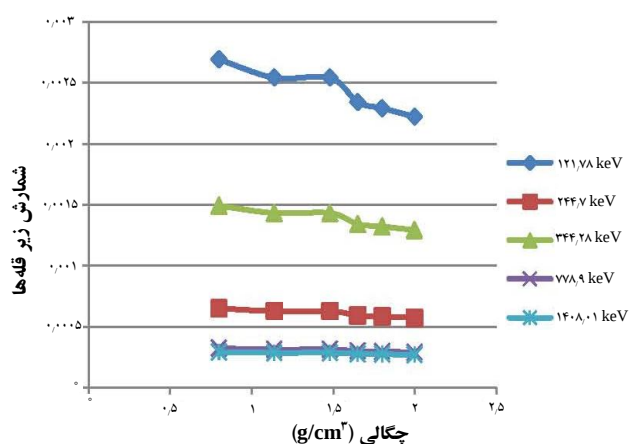
$$\varepsilon_{\gamma}(E) = \frac{N}{A T P_{\gamma}} \quad (1)$$

که در آن، N سطح زیر قله‌ی تمام انرژی E ، T زمان شمارش، P_{γ} احتمال گسیل ذره با انرژی E ، A فعالیت پرتوزایی چشمه در طول زمان شمارش است.

قابل قبولی برهم منطبق بودند. به منظور تحلیل دقیق‌تر تأثیر پارامتر چگالی، در قله‌هایی با انرژی ۱۲۱/۷۸، ۲۴۴/۷۰، ۳۴۴/۲۸، ۷۷۸/۹۰ و ۱۴۰۸/۰۱ keV شمارش زیر قله‌ها در طیف‌های متناظر با چگالی‌های ۰/۸ تا ۲ g/cm^۳ محاسبه شد. نتایج این محاسبه در شکل ۳ ارائه شده است. شکل ۳ گویای این مطلب است که اولاً با افزایش چگالی شمارش زیر قله در یک انرژی معین کاهش می‌یابد. بنابراین چگالی، باعث تغییر در مساحت سطح زیر قله‌ها می‌شود و نادیده انگاشتن آن منجر به خطا در محاسبه‌ی فعالیت‌های پرتوزایی خواهد شد. ثانیاً تأثیر چگالی بر روی مساحت سطح زیر قله‌ها با افزایش انرژی کاهش می‌یابد. در ادامه باید تأثیر چگالی بر مساحت سطح زیر قله‌ها در انرژی‌های مختلف، دقیق‌تر بررسی می‌شد تا بتوان در رابطه با چشم‌پوشی یا لحاظ کردن این پارامتر در محاسبات پرتوزایی نظر قطعی داد؛ برای این منظور تغییرات شیب منحنی‌های شکل ۳ بر حسب انرژی، رسم و از برازش آن‌ها، رابطه‌ی (۲)، برای توصیف تأثیر چگالی بر روی مساحت سطح زیر قله‌ها در برابر انرژی به دست آمد.

$$y = 0.104E^{-1/20} \quad R^2 = 0.84 \quad (2)$$

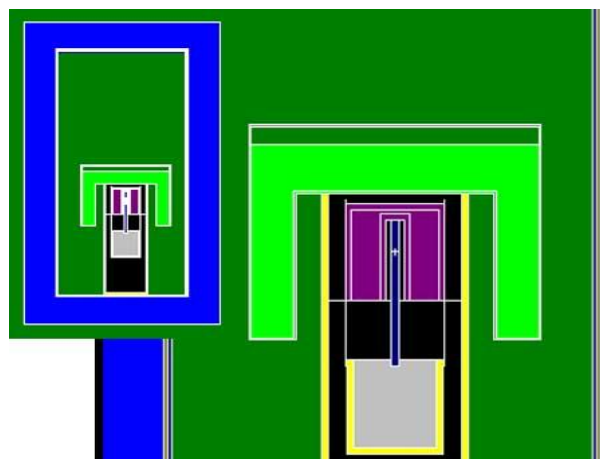
که در آن، E انرژی بر حسب keV و y پارامتر توصیف‌کننده‌ی میزان تأثیر چگالی بر مساحت سطح زیر قله است. بنابراین رابطه، شیب تغییر مساحت سطح زیر قله با افزایش انرژی کاهش می‌یابد. این رابطه بیان‌گر کم رنگ شدن تأثیر چگالی در انرژی‌های بالا است و آزمایش‌گر می‌تواند بنابر دقت مورد نظرش و گستره‌ی انرژی تحت مطالعه‌اش، در رابطه با چشم‌پوشی از این پارامتر تصمیم‌گیری کند.



شکل ۳. شمارش زیر قله برای چشمه‌های مارینلی با ترکیب یکسان و چگالی‌های متفاوت در گستره‌ی انرژی ۱۲۱/۷۸ تا ۱۴۰۸/۰۱ keV به دست آمده از محاسبات با کد MCNP.

جدول ۱. جزئیات مربوط به شبیه‌سازی

مدل آشکارساز	
هندسه‌ی آشکارساز	GMX-10180
شکل‌بندی آشکارساز	هم‌محور ته بسته
مواد آشکارساز	افقی
قطر بلور	نوع ۲-ژرمانیم
طول بلور	۴۸ mm
مواد پنجره	۴۹ mm
ضخامت پنجره	Be
فاصله‌ی بلور تا پنجره	۰.۰۳ μm
شعاع الکتروود مسی	۵.۴ mm
شعاع ستون خلا اطراف الکتروود مسی	۲ mm
ضخامت درپوش آلومینیومی	۴.۲۵ mm
تالی مورد استفاده	۳ mm
	F8
تعریف چشمه	چشمه‌ی متعارف (SDEF) با توزیع یکنواخت پرتوزایی در مارینلی
حفاظ اطراف آشکارساز به ترتیب از داخل	مس - آهن - سرب
مس	۲ mm
آهن	۲ mm
سرب	۵۰ mm

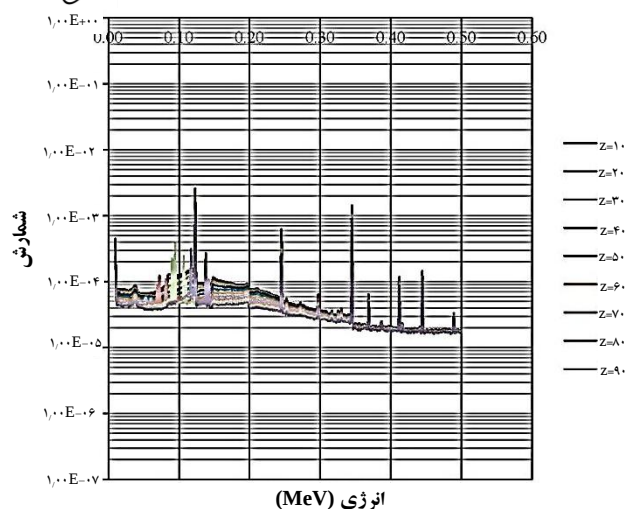


شکل ۲. نمای نزدیک و دور آشکارساز شبیه‌سازی شده به همراه حفاظ اطراف آن و چشمه‌ی مارینلی.

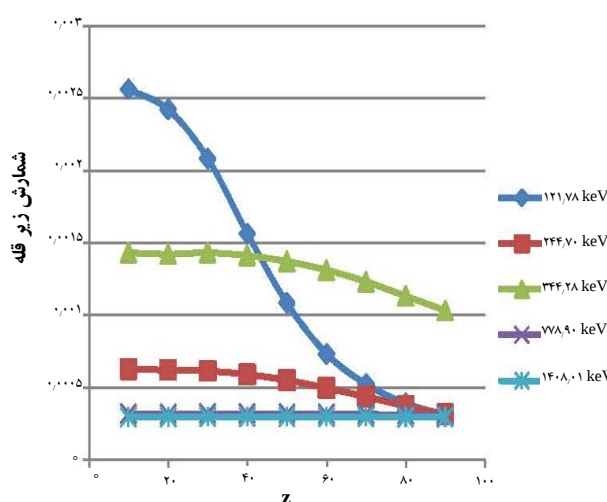
بعد از اطمینان از صحت خروجی‌های آشکارساز شبیه‌سازی شده، طیف‌های موردنظر جمع‌آوری شد. هم‌چنین بازده آشکارسازی برای هر یک از این چشمه‌ها به کمک کد، محاسبه شد [۲۰]. به این ترتیب منحنی‌های سطح (بازده-انرژی-چگالی) براساس داده‌های خروجی کد محاسباتی MCNP به دست آمد.

۱.۴. شبیه‌سازی چشمه‌های با چگالی‌های مختلف

چشمه‌های مارینلی با موادی با چگالی‌های مختلف ۲، ۱/۸، ۱/۶۵، ۱/۱۴، ۱/۴۸ و ۰/۸ g/cm^۳ و ترکیب‌های یکسان شبیه‌سازی، و مجموعه طیف‌های به دست آمده در این حالت در یک نمودار گردآوری شد. اختلاف بین طیف‌ها در انرژی‌های کم‌تر از ۴۰۰ keV نمایان بود ولی در انرژی‌های بالاتر، طیف‌ها تا حد



شکل ۴. طیف‌های حاصل از محاسبات MCNP برای چشمه‌های مارینلی با چگالی یکسان 1.137 g/cm^3 و Z متفاوت ($Z=10-90$).



شکل ۵. شمارش زیر قله برای چشمه‌های مارینلی با چگالی یکسان 1.137 g/cm^3 و ترکیب متفاوت ($Z=10-90$) در گستره‌ی انرژی $121.78-1408.01 \text{ keV}$ به دست آمده از شبیه‌سازی با کد MCNP.

۵. یافته‌ها و بحث

۱.۵ اثر چگالی و ترکیب بر میزان خودجذبی نمونه‌های محیطی همان‌سان که از شکل ۳ پیدا است، پارامتر چگالی در کل گستره‌ی انرژی تأثیرگذار است. خطای ناشی از نادیده انگاشتن این پارامتر، در حالتی که اختلاف چگالی نمونه‌ی استاندارد و مجهول 1.137 g/cm^3 بود، در انرژی‌های پایین ۲۱٪ بود که در انرژی‌های بالا به ۸.۲٪ کاهش یافت و برای حالتی با اختلاف چگالی نمونه‌ی استاندارد و مجهول 0.2 g/cm^3 خطا از ۳.۱٪ در انرژی‌های پایین به ۱.۴۹٪ در انرژی‌های بالا کاهش یافت. قابل ذکر است که اختلاف چگالی نمونه‌ی مجهول با استاندارد برای

۲.۴ شبیه‌سازی چشمه‌های با ترکیب‌های مختلف و چگالی یکسان چشمه‌های مارینلی با موادی با چگالی یکسان 1.137 g/cm^3 و ترکیب‌های متفاوت در گستره‌ی $Z=10-90$ شبیه‌سازی شد. در مجموعه طیف‌های جمع‌آوری شده، اختلاف بین طیف‌ها در انرژی‌های کم‌تر از 400 keV قابل مشاهده بود ولی در انرژی‌های بالاتر طیف‌ها تا حد قابل قبولی برهم منطبق بودند (شکل ۴). به منظور تحلیل دقیق‌تر تأثیر پارامتر Z ، در قله‌هایی با انرژی 121.78 ، 244.70 ، 344.78 ، 778.90 و 1408.01 keV شمارش زیر قله‌ها در طیف‌های متناظر با $Z=10-90$ محاسبه و نتایج آن در شکل ۵ ارائه شده است. شکل ۵ گویای این مطلب است که اولاً با افزایش Z شمارش زیر قله در هر انرژی کاهش می‌یابد. بنابراین Z نیز مانند چگالی باعث تغییر در مساحت سطح زیر قله‌ها می‌شود و نادیده انگاشتن آن منجر به خطا در محاسبه‌ی فعالیت پرتوزایی خواهد شد. ثانیاً تأثیر Z بر روی مساحت سطح زیر قله‌ها با افزایش انرژی کاهش می‌یابد. به منظور بررسی دقیق‌تر تأثیر Z بر مساحت سطح زیر قله‌ها در انرژی‌های مختلف، تغییرات شیب منحنی‌های شکل ۵ برحسب انرژی رسم شد و از برازش آن‌ها، رابطه‌ی (۳)، برای توصیف تأثیر Z بر مساحت سطح زیر قله‌ها در برابر انرژی به دست آمد

$$y' = 20.10 E^{-3.74} \quad R^2 = 0.95 \quad (3)$$

که در آن، E انرژی برحسب keV و y' پارامتر توصیف‌کننده‌ی میزان تأثیر Z بر مساحت سطح زیر قله است. بنابراین رابطه، شیب تغییر مساحت سطح زیر قله در انرژی 121.78 از مرتبه‌ی 10^{-5} و در انرژی 244.70 از مرتبه‌ی 10^{-6} و در انرژی 778.90 از مرتبه‌ی 10^{-9} خواهد شد. بنابراین، رابطه، بیان‌گر تأثیر کاهش سریع تأثیر Z با افزایش انرژی است به گونه‌ای که در مواردی که با انرژی‌های بالاتر از 400 keV سروکار داریم می‌توانیم بدون دغدغه از اثر Z چشم‌پوشی کنیم.

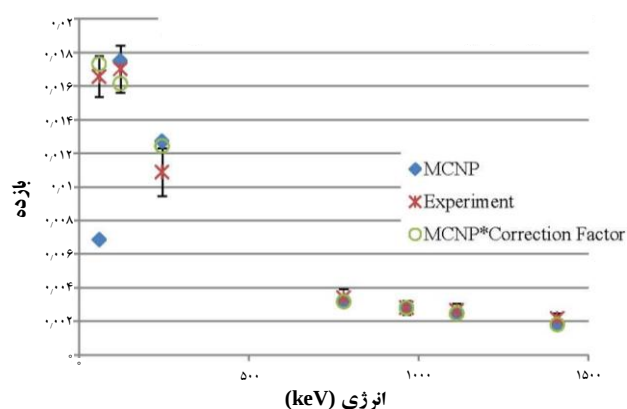


۲.۵ راه کاری برای تصحیح خودجذبی براساس کد MCNP

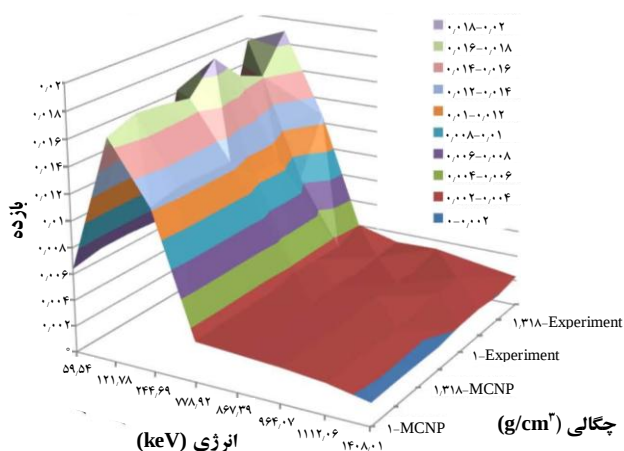
منحنی‌های سطح بازده-انرژی-چگالی تجربی و حاصل از محاسبات با کد MCNP با هم مقایسه شدند. به منظور مقایسه‌ی بهتر، در شکل ۶ بازده تجربی و محاسبه شده برای یکی از نمونه‌ها و در شکل ۷ هر دو منحنی سطح بازده-انرژی-چگالی در یک چارچوب آورده شده‌اند. هم چنین برای بررسی دقیق‌تر، مقدارهای خطای بازده محاسبه شده از طریق کد محاسباتی MCNP نسبت به مقدارهای تجربی برای یکی از نمونه‌ها (نمونه‌ی حاوی خاک مزرعه) در انرژی‌های مختلف چنین محاسبه شد

(۴) بازده تجربی / ۱۰۰ * (بازده تجربی - بازده موردنظر) = %خطای نسبی

مقدارهای خطا برای نمونه‌ی مذکور در جدول ۲ گزارش شده است.



شکل ۶. مقایسه‌ی بازده تجربی نمونه‌ی حاوی خاک مزرعه با بازده محاسبه شده و بازده محاسبه شده‌ی اصلاح شده.



شکل ۷. منحنی‌های سطح بازده-انرژی-چگالی تجربی و حاصل از شبیه‌سازی با کد MCNP.

نمونه‌های محیطی بین صفر تا ۲ گزارش شده است [۹]. بنابراین چشم‌پوشی از خطای ناشی از چگالی توصیه نمی‌شود هر چند که با افزایش انرژی خطا به سرعت افت می‌کند به گونه‌ای که در انرژی‌های بالاتر از ۴۰۰ keV اختلاف چندانی در طیف‌ها مشاهده نمی‌شود (شکل ۵). خطای ناشی از نادیده انگاشتن نوع ترکیب‌ها در محاسبه‌ی مساحت سطح زیر قله‌ها در بدترین حالت برای وضعیتی که Z چشمه‌ی استاندارد ۹۰ و Z چشمه‌ی مجهول ۱۰ است در انرژی‌های پایین ۸۸٪ و در انرژی‌های بالا ۱٫۴٪ محاسبه شد که بیان گر این است که اگر تفاوت چشم‌گیری در نوع ترکیب چشمه‌ی استاندارد و مجهول وجود دارد صرف نظر کردن از خطای حاصل از Z منطقی نیست. البته در این جا ما به شکل اغراق آمیزی بین Z نمونه‌ی استاندارد و نمونه‌ی مجهول تفاوت قایل شدیم. لیکن برای اختلاف ۲۰ در Z، که گستره‌ی تغییرات Z در نمونه‌های محیطی است [۸]، خطا را محاسبه کردیم. خطا در انرژی‌های ۱۲۱٫۷۸، ۲۴۴٫۷۰، ۳۴۴٫۲۸، ۷۷۸٫۷۹۰، ۱۴۰۸٫۰۱ keV به ترتیب، برابر با ۴۷٫۴، ۱۸٫۰۶، ۶٫۹، ۱٫۰۴ و ۰٫۵۷٪ به دست آمد؛ کاهش خطا با افزایش انرژی کاملاً مشهود است. بنابراین آزمایش گر در گستره‌ی انرژی‌های بالا، بسته به دقت مطلوب مورد نظرش می‌تواند در رابطه با چشم‌پوشی از اثرات نوع ترکیب تصمیم‌گیری کند.

هم چنین از مقایسه‌ی رابطه‌های (۲) و (۳) استخراج شده برای دو حالت مورد بررسی، نتایج زیر استنباط شد:

- چگالی در مسأله‌ی خودجذبی نسبت به نوع ترکیب نقش مهم‌تری را بازی می‌کند.
- عمده تأثیر این دو پارامتر بر روی طیف در هر دو مورد تا انرژی ۴۰۰ keV است.
- تأثیر نوع ترکیب بر مساحت سطح زیر قله‌ها با افزایش انرژی، با شیب تندتری نسبت به چگالی کاهش می‌یابد.
- در انرژی‌های بالای ۴۰۰ keV تأثیر نوع ترکیب تقریباً صفر و قابل چشم‌پوشی است، اما چگالی هم‌چنان تأثیرگذار است و بسته به دقت مورد نظر آزمایش گر می‌توان در مورد تصحیح آن تصمیم‌گیری کرد.

پیشنهاد می‌شود که آزمایش گر حتی المقدور قله‌هایی با انرژی بالا را در محاسبات پرتوزایی وارد کند تا خطای ناشی از خودجذبی را به حداقل ممکن برساند.



جدول ۲. خطای نسبی بین بازده تجربی و محاسبه شده برای چشمه‌ی حاوی خاک کوه در گستره‌ی انرژی ۱۰۰ keV تا ۱۵۰۰ keV

انرژی (keV)	بازده تجربی	بازده محاسبه شده	بازده محاسبه شده اصلاح شده	% خطا	% خطای بازده محاسبه شده اصلاح شده
۱۰۰	0.02013 ± 0.0094	0.02161 ± 0.0035	0.019598	۷٫۴	-۲٫۶
۲۰۰	0.01124 ± 0.0011	0.01142 ± 0.0045	0.010979	۱٫۶	-۲٫۳
۳۰۰	0.008 ± 0.0012	0.00786 ± 0.0018	0.007823	۱٫۶	-۲٫۲
۴۰۰	0.00628 ± 0.0013	0.00604 ± 0.0005	0.00615	۳٫۹	-۲٫۱
۵۰۰	0.00521 ± 0.0013	0.00492 ± 0.0005	0.005104	۵٫۶	-۱٫۹۶
۶۰۰	0.00447 ± 0.0014	0.00416 ± 0.0007	0.004382	۶٫۹	-۱٫۹
۷۰۰	0.00392 ± 0.0014	0.00361 ± 0.0003	0.003852	۸٫۱	-۱٫۸
۸۰۰	0.00351 ± 0.0015	0.00319 ± 0.0004	0.003445	۹٫۱	-۱٫۸
۹۰۰	0.00318 ± 0.0015	0.00286 ± 0.0004	0.003122	۹٫۹	۱٫۷
۱۰۰۰	0.00291 ± 0.0015	0.0026 ± 0.0005	0.002859	۱۰٫۷	۱٫۷
۱۱۰۰	0.00268 ± 0.0016	0.00238 ± 0.0006	0.00264	۱۱٫۳	۱٫۷
۱۲۰۰	0.0025 ± 0.0016	0.0022 ± 0.0007	0.002455	۱۱٫۹	۱٫۶
۱۳۰۰	0.00233 ± 0.0016	0.00204 ± 0.0013	0.002296	۱۲٫۵	۱٫۶
۱۴۰۰	0.00219 ± 0.0016	0.0019 ± 0.0024	0.002158	۱۳٫۰	۱٫۶
۱۵۰۰	0.00207 ± 0.0017	0.00179 ± 0.0051	0.002037	۱۳٫۵	۱٫۵
$1500 < E < 1000$	-----	-----	-----	۸٫۵	۱٫۶۸

شبه‌سازی تأیید کرد. بنابراین می‌توان نتایج را برای تعداد بیش‌تری چشمه‌ی استاندارد و گستره‌ی بزرگ‌تری از چگالی تعمیم داد. در این راستا، مشابه بخش ۳ عمل شد منتهی به پنج چشمه‌ی استاندارد موجود در آزمایشگاه اکتفا نشده و برای چشمه‌های متعدد مارینلی با همان هندسه اما خاک‌هایی با خودجذبی‌های متفاوت، برنامه‌ی شبه‌سازی اجرا و به این ترتیب، یک رویه‌ی سه بعدی (بازده-انرژی-چگالی) براساس داده‌های MCNP برای تعداد زیادی چشمه‌ی استاندارد استخراج شد. سپس با ضرایبی که در مرحله‌ی قبل استخراج شده بود این رویه اصلاح شد. رویه‌ی اصلاح شده در اختیار آزمایش‌گر قرار گرفت تا با مراجعه با آن بتواند تا حدود زیادتری سهم خودجذبی را در محاسبات پرتوزایی اصلاح کند. در شکل ۱۰ رویه‌ی اصلاح شده‌ی نهایی که گستره‌ی چگالی ۱ تا 2 g/cm^3 را پوشش می‌دهد آمده است. رابطه‌ی حاکم بر رویه‌ی مذکور توسط نرم‌افزار MATLAB 2009 محاسبه شد

$$\varepsilon(E, \rho) = \left[\sum_{i=0}^6 \alpha_i \left(\frac{1}{E} \right) (\text{Log}(E))^i \right] (b - c\rho) \quad (6)$$

ضرایب (با حد اطمینان ۹۵٪):

$$\alpha_0 = -0.009417, \quad \alpha_1 = 0.8525, \quad \alpha_2 = -0.948, \quad \alpha_3 = 0.102, \\ \alpha_4 = 0.0834, \quad \alpha_5 = -0.2111, \quad \alpha_6 = 0.01457 \\ c = 0.167, \quad b = 3.052$$

خطای نسبی بازده محاسبه شده در مقایسه با بازده تجربی با استفاده از تابع‌های برازش یافته بر نقاط، در انرژی 121.78 keV ، 5.72% و در انرژی 1408.01 keV ، 13.08% محاسبه شد. از آنجا که عدم تطبیق بازده تجربی و محاسبه شده‌ی به دست آمده در مطالعه‌ی مذکور، هدف مورد نظر این پژوهش (اصلاحات خودجذبی) را تأمین نمی‌کند، لذا برای دست‌یابی به رویه‌ی آرمانی، یک تابع تصحیح‌گر نیاز است. برای این منظور ضرایب بین دو حالت (تجربی و محاسبه)، برای تک‌تک نمونه‌ها در انرژی‌های متفاوت استخراج شد و با برازش منحنی بر اطلاعات جمع‌آوری شده تابع اصلاحی، برای تصحیح رویه در گستره‌ی انرژی ۱۰۰ تا 1500 keV به دست آمد (شکل ۸)

$$Z = 0.616 E^{1/84} \quad R^2 = 0.93 \quad (5)$$

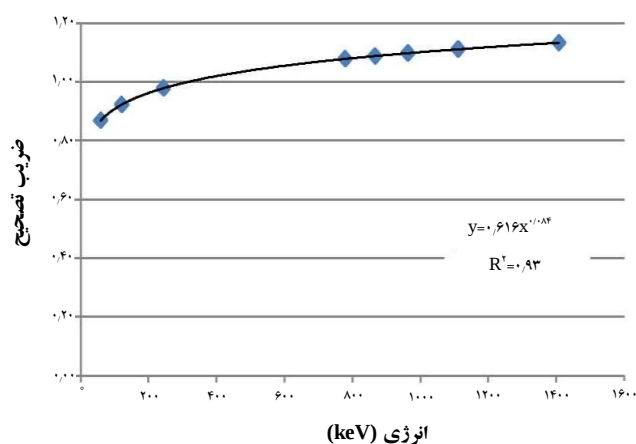
Z ضریبی است که برای اصلاح رویه‌ی حاصل از MCNP و تطبیق آن با رویه‌ی حاصل از کار تجربی در انرژی معین E نیاز است. رویه‌ی حاصل از شبه‌سازی، با این تابع به گونه‌ای اصلاح شد که با رویه‌ی تجربی کاملاً منطبق شد. در این حالت خطای نسبی بعد از برازش تابع بر روی نقاط در انرژی 121.78 keV ، 2% و در انرژی 1408.01 keV ، 1.6% محاسبه شد. در شکل ۹ رویه‌ی تجربی همراه با رویه‌ی حاصل از کد بعد از اصلاح با تابع تصحیح‌گر، در یک نمودار آورده شده است. بعد از اصلاح نتایج MCNP می‌توان صحت و کارایی روش مورد مطالعه را از طریق



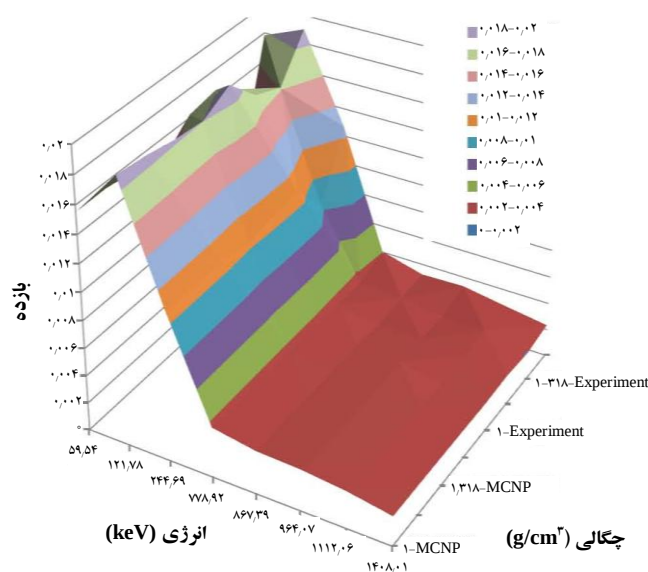
خوبی برازش: $R^2: 0.9984$ ، $RMSE: 0.0002029$ ، $R^2: 0.9986$ ، $SSE: 2.264 \times 10^{-6}$ ، که در آن، $\varepsilon(E, \rho)$ معرف بازده در انرژی E و چگالی ρ است و α_i و b و c ضرایب‌های تعدیل شده‌ی حاصل از برازش هستند. اعتبارسنجی رابطه، از طریق محاسبه‌ی پرتوزایی برای نمونه‌ی استاندارد حاوی سنگ تراورتن انجام شد. میزان خطای نسبی محاسبات فعالیت پرتوزایی در انرژی‌های مختلف، با حالتی که به یک مرجع استاندارد برای محاسبات فعالیت پرتوزایی اکتفا می‌شود مقایسه شد. این قیاس کاهش ۵۰ درصدی خطا برای نمونه‌ی مذکور در روش تحت مطالعه را نشان داد. به دلیل محدودیت امکانات موجود در آزمایشگاه، اعتبارسنجی روش تنها با نمونه‌ی مذکور که از ابتدای پژوهش به این منظور وارد محاسبات نشده بود، انجام شد. نتایج این مقایسه در جدول ۳ آمده است. در این جدول، در ستون دوم و سوم خطای محاسبه‌ی فعالیت پرتوزایی به روش متعارف آزمایشگاه در انرژی‌های مختلف، در ستون چهارم میانگین خطای ستون ۲ و ۳ و در ستون پنجم میزان خطای محاسبه‌ی پرتوزایی بر مبنای روش مورد مطالعه گزارش شده است.

۶. نتیجه‌گیری

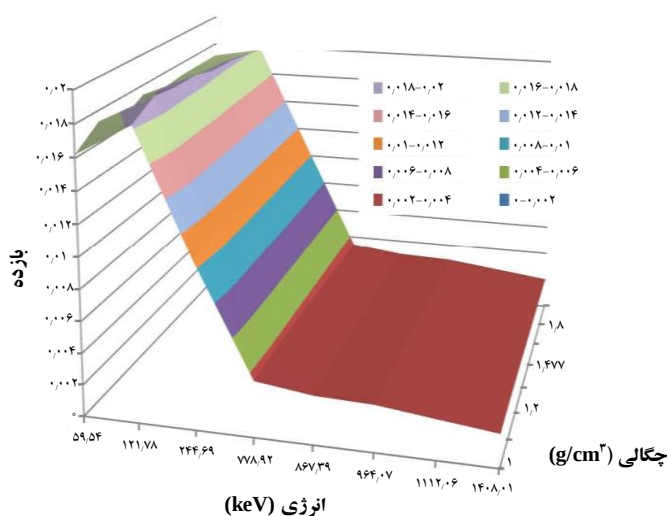
نتایج طیف‌نگاری تجربی برای ۵ چشمه‌ی استاندارد با هندسه، فعالیت پرتوزایی و شرایط یکسان ولی محتویات متفاوت، بیان‌گر تأثیر چگالی و نوع ترکیب در طیف‌نگاری و مساحت سطح زیر قله‌ها و نهایتاً خطا در محاسبه‌ی فعالیت‌های پرتوزایی بود. با توجه به این که شبیه‌سازی امکان بررسی هر پارامتر را به طور مجزا فراهم می‌کرد امکان بررسی دقیق‌تر نقش هر یک از این دو پارامتر فراهم شد. نتایج شبیه‌سازی حاکی از این بود که چگالی نقش پررنگ‌تری را در مسأله‌ی خودجذب‌ی ایفا می‌کند ضمن این که، تأثیر آن بر کل گستره‌ی انرژی مشاهده شد. اما در مورد نوع ترکیب مشاهده شد که عمده تأثیر این پارامتر در انرژی‌های زیر ۴۰۰ keV است و با افزایش انرژی با شیب تندی از تأثیر آن کاسته می‌شود به گونه‌ای که در انرژی‌های بالاتر از ۴۰۰ keV به راحتی می‌توان از سهم خودجذب‌ی ناشی از نوع ترکیب چشم‌پوشی کرد.



شکل ۸. محاسبه‌ی تابع تصحیح گر به منظور تصحیح رویه‌ی محاسباتی.



شکل ۹. مقایسه‌ی رویه‌ی محاسباتی اصلاح شده با رویه‌ی تجربی.



شکل ۱۰. رویه‌ی (منحنی سطح) بازده حاصل از محاسبات MCNP برای گستره‌ی چگالی ۱ تا ۲ g/cm^۳.



مرجع‌ها

1. S.D. Mora, M.R. Sheikholeslami, E. Wyse, S. Azemard, R. Cassi, An Assessment of Metal Contamination in Coastal Sediments of the Caspian Sea, *Marine Pollution Bulletin*, 48 (2004) 61-77.
2. K. Froehlich, K. Rozanski, P. Povinec, B. Oregioni, J. Gastaud, Isotope Studies in the Caspian Sea, *The Science of the Total Environment*, 237/238 (1999) 419-427.
3. F. Jana, Uranium Contamination of the Aral Sea, *Marine Systems*, 76 (3) (2009) 322-335.
4. M. Mostajaboddavati, S. Hassanzadeh, H. Faghihian, M.R. Abdi, M. Kamali, Efficiency Calibration and Measurement of Self-Absorption Correction for Environmental Gamma Spectroscopy of Soil Samples Using Marinelli Beaker, *Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 268 (3) (2006) 539-544.
5. I.J. Bostock, T.D. Taulbee, Automated Efficiency Calibration of HPGe Spectrometers for in-Vitro Soil Samples, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 422 (1-3) (1999) 812-816.
6. M.A. Mohammadi, M.R. Abdi, M. Kamali, M. Mostajaboddavati, M. Zare, Evaluation of HPGe Detector Efficiency for Point Sources Using Virtual Point Detector Model, *Applied Radiation and Isotopes*, 69 (2) (2010) 521-526.
7. G.L. Molnar, Zs. Revay, T. Belgia, Wide Energy Range Efficiency Calibration Method for Ge Detectors, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 489 (2002) 140-159.
8. I. Vukasinovic, D. Todorovic, D. Popovic, The Dependence of Ge Detectors Efficiency on the Density of the Samples in Gamma-Ray Spectrometry, *Nuclear Technology & Radiation Protection*, 22 (2007) 58-63.
9. P. Jodlowski, Self-Absorption Correction in Gamma-Ray Spectrometry of Environmental Samples an Overview of Methods and Correction Values Obtained for the Selected Geometries, *Faculty of Physics and Applied Computer Science*, 51 (2006) S21-S25.

جدول ۳. خطای نسبی محاسبه‌ی فعالیت پرتوزایی چشمه‌ی استاندارد حاوی تراورتن به منظور اعتبارسنجی روش متعارف در آزمایشگاه (با به کارگیری تنها یک نمونه‌ی استاندارد)

انرژی (keV)	درصد خطا			
	مرجع: خاک مزرعه مجهول: تراورتن	مرجع: شن ساحل مجهول: تراورتن	میانگین دو ستون ۲ و ۳	روش استفاده از رویه مجهول: تراورتن
۵۹,۵۴	۱۵,۵	۲۱,۵	۱۸,۵	۱,۱
۱۲۱,۷۸	۷,۳	۱۷,۱	۱۲,۲	۰,۹
۷۷۸,۹۲	۲,۵	۱۳,۷	۸,۱	۶,۳
۸۶۷,۳۹	۱۱,۸	۱,۵	۶,۷	۴,۲
۱۱۱۲,۰۶	۳	۸,۸	۵,۷	۲,۱
۱۴۰۸,۰۱	۹,۸	۱۶,۳	۱۳,۱	۱۲,۹
میانگین خطا	۸,۳	۱۳,۱	۱۰,۷	۴,۶

علاوه بر این در این مطالعه، کارایی روش استخراج رویه‌ی سه بعدی بازده- انرژی- چگالی بر مبنای محاسبات MCNP به منظور کاهش اثرات خودجذبی، با اعمال یک تابع تصحیح‌گر، تأیید شد. اعتبارسنجی روش، کاهش ۵۰ درصدی خطا را در محاسبات پرتوزایی نسبت به روش رایج در آزمایشگاه (اکتفا کردن به یک استاندارد) نشان داد.

لذا می‌توان روش را بر مبنای محاسبات MCNP برای هر وضعیت آزمایشگاهی دلخواه به کار گرفت با این مزیت که در این حالت با تعداد محدودی چشمه‌ی مرجع، می‌توان رویه‌ی بازده را برای گستره‌ی وسیع‌تری از چگالی به دست آورد.

پی‌نوشت‌ها

1. Configuration
2. High Purity Germanium



10. Z.B. Alfassi, N. Lavi, The Dependence of the Counting Efficiency of Marinelli Beakers for Environmental Samples on the Density of the Samples, *Applied Radiation and Isotopes*, 63 (2005) 87-92.
11. S. Harb, K.S. Din, A. Abbady, Study of Efficiency Calibrations of HPGe Detectors for Radioactivity Measurements of Environmental Samples, *Environmental Physics Conference*, Aswan, Egypt (2008).
12. M.J. Vargas, A.F. Timon, N.C. Diaz, D.P. Sanchez, Monte Carlo Simulation of the Self-Absorption Corrections for Natural Samples in Gamma-Ray Spectrometry, *Applied Radiation and Isotopes*, 57 (2002) 893-898.
13. F.L. Melquiadesa, C.R. Appoloni, Self-Absorption Correction for Gamma Spectrometry of Powdered Milk Samples Using Marinelli Beaker, *Applied Radiation and Isotopes*, 55 (2001) 697-700.
14. M.R. Abdi, M. Mostajabodaavati, I. Jabari, A. Ebrahimi, Simulation of HPGe Detector and Determination of Dead Layer and Active Region Using MCNP Code, *Department of Physics, University of Isfahan, Isfahan*, (2010).
15. J. Bosona, G. Agren, L. Johansson, A Detailed Investigation of HPGe Detector Response for Improved Monte Carlo Efficiency Calculations, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research_A*, 587 (2008) 304-314.
16. B.P. Mohanty, P. Balouria, M.L. Garg, T.K. Nandi, V.K. Mittal, I.M. Govil, Comparison of Experimental and Theoretical Efficiency of HPGe X-Ray Detector, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 584 (2008) 186-190.
17. N.Q. Huy, The Influence of Dead Layer Thickness Increase on Efficiency Decrease for a Coaxial HPGe P-Type Detector, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 621 (1-3) (2010) 390-394.
18. C.M. Salgadoa, C.C. Conti, P.H. Becker, Determination of HPGe Detector Response Using MCNP5 for 20-150 keV X-Ray, *Applied Radiation and Isotopes*, 64 (2006) 700-705.
19. Saidou, F. Bochud, J.P. Laedermann, T. Buchillier, K.N. Moise, P. Froidevaux, Calibration of an HPGe Detector and Self-Attenuation Correction for ^{210}Pb : Verification by Alpha Spectrometry of ^{210}Po in Environmental Samples, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 578 (2007) 515-522.
20. M. Lotfi, M. Mostajaboddavati, B. Timuri Sichani, Introducing Virtual Point Source Equivalent to Marinelli Beakers for Obtaining Detector Efficiency, In *Faculty of Advanced Science and Technologies, Department of Nuclear Engineering, University of Isfahan: Isfahan* (2012) 88-95.