

## شناسایی و تعیین منابع عدم قطعیت اندازه‌گیری رادیوکتیویته در ماتریس خاک

حسن رنجبر\*، علی یوسفی؛

پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده چرخه سوخت هسته‌ای

دریافت: ۹۸/۵/۳

پذیرش: ۹۸/۵/۱۴

### چکیده

پایش محیطی که جزئی جدایی‌ناپذیر از ایمنی هسته‌ای است همواره حائز اهمیت بوده و لزوم اجرای منظم، دقیق و با کیفیت آن ضروری است. روش طیف‌سنجی گاما به طور گسترده برای تشخیص و اندازه‌گیری رادیونوکلیدهای گاما در نمونه‌های طبیعی استفاده می‌شود. در روش طیف‌سنجی گاما نیز مانند سایر مباحث اندازه‌گیری نیاز به تعیین میزان دقت از طریق مشخص کردن عدم قطعیت، بدیهی می‌باشد. هدف از این تحقیق شناسایی فاکتورهای تأثیرگذار بر عدم قطعیت و محاسبه آن به منظور نشان دادن میزان دقت اندازه‌گیری اکتیویته رادیونوکلیدهای گامازای نمونه خاک می‌باشد. برای انجام این تحقیق نمونه خاکی با جرم ۲۴۳ گرم در ظرف استاندارد استوانه‌ای ساخته شد. سپس میزان اکتیویته رادیونوکلید سزیم-۱۳۷ که دارای پیک انرژی ۶۶۱ کیلو الکترون ولت است با استفاده از آشکارساز ژرمانیوم با خلوص بالا و بازده نسبی ۸۰٪ و برای زمان شمارش ۷۲۰۰۰ ثانیه محاسبه شد. مقدار اکتیویته سزیم-۱۳۷ در نمونه مورد نظر ۴۸۲ بکرل اندازه‌گیری شد. همچنین عدم قطعیت اندازه‌گیری اکتیویته فوق با سطح اطمینان ۹۵ درصد ۳۳/۴ بکرل محاسبه شد. یافته‌های این تحقیق نشان می‌دهد که عدم قطعیت اندازه‌گیری اکتیویته با وجود در نظر گرفتن تمام فاکتورهای دخیل مقداری در حدود ۶/۹٪ داشته که این موضوع دقت و اطمینان‌پذیری بالای نتایج را نشان می‌دهد. همچنین از بین تمام عوامل تأثیرگذار در عدم قطعیت نهایی، عدم قطعیت شمارش و بازده سهم عمده‌ای را به خود اختصاص می‌دهند.

**واژگان کلیدی:** طیف‌سنجی گاما، عدم قطعیت اندازه‌گیری، نمونه خاک، اکتیویته

### مقدمه

هنگامی که نتیجه اندازه‌گیری یک کمیت فیزیکی گزارش می‌شود، به منظور ارزیابی قابلیت اطمینان آن، الزامی است که مقیاسی کمی در مورد کیفیت نتایج ارائه شود و در صورت عدم ارائه چنین معیاری، اندازه‌گیری معتبر نبوده و در صورت نیاز امکان مقایسه نتایج مختلف با یکدیگر امکان‌پذیر نمی‌باشد. به عبارت دیگر عدم قطعیت عبارت است از میزان اطمینانی که می‌توان به نتایج یک اندازه‌گیری داشت و معیاری است از کیفیت نتایج ارائه شده [۱].

روش‌های آنالیز هسته‌ای نیز مانند سایر روش‌های اندازه‌گیری از این قاعده مستثنا نبوده و لزوم تعیین عدم قطعیت در آن‌ها بدیهی می‌باشد. علاوه بر این، به دلیل استفاده از تجهیزات پیچیده و روش‌های مختلف اندازه‌گیری، فرایند شناسایی عوامل تأثیرگذار بر عدم قطعیت و در نظر داشتن ماهیت ویژه و تعدد آن‌ها و در آخر ترکیب اجزای عدم قطعیت و تعیین کمی آن توجه ویژه‌ای را طلب می‌کند [۲]. با توجه به وجود مواد پرتوزای طبیعی مانند اورانیوم، توریم و پتاسیم در پوسته زمین و اثرات پرتویی آن‌ها و اثر آن بر سلامت، نیاز به پایش محیطی و اندازه‌گیری میزان این مواد در نقاط مختلف به منظور تعیین پرتوگیری مردم ضروری است. همچنین پیشرفت‌های روزافزون در زمینه انرژی هسته‌ای و افزایش تعداد تأسیسات هسته‌ای لزوم این پایش‌ها را بیش از پیش نشان می‌دهد. بررسی و تعیین میزان فرسایش خاک با استفاده از روش آنالیز هسته‌ای، نیز از دیگر موارد لزوم پایش‌های محیطی - به طور خاص آنالیز خاک - است [۳-۴].

طیف‌سنجی گاما به عنوان علم شناسایی و اندازه‌گیری رادیونوکلیدها یکی از بهترین روش‌ها برای تشخیص و اندازه‌گیری میزان عناصر گاما در خاک بوده و کاربردهای بسیاری در این زمینه دارد [۵]. همچنین تعیین عدم قطعیت در اندازه‌گیری غلظت مواد پرتوزا در خاک و یافتن عوامل تأثیرگذار بر آن حائز اهمیت بسیاری بوده و به منظور ارائه نتایج دقیق و با کیفیت ضروری است.

Plukis و همکاران میزان اکتیویته تریوم-۱۵۸ در یک نمونه پسمان و عدم قطعیت اندازه‌گیری آن را مورد بررسی قرار دادند. نتیجه تحقیق آنها نشان داد که مؤلفه اصلی عدم قطعیت آن مربوط به شمارش می‌باشد [۶]. Jodłowski و همکاران به اندازه‌گیری اکتیویته رادیونوکلیدها در نمونه‌های محیطی پرداختند. آنها از آشکارساز HPGe و سه هندسه مختلف برای این کار استفاده کردند که نتایج آنها عدم قطعیت کمتر از ۵٪ بود [۷]. Ramebäck و همکاران محاسبه عدم قطعیت با استفاده از روش مونت کارلو و برنامه‌نویسی در نرم‌افزار اکسل را مورد بررسی قرار دادند. آنها نتیجه گرفتند که تعیین عدم قطعیت اندازه‌گیری با استفاده از نرم‌افزارهای تصحیح بازده، امکان‌پذیر و کاربردی می‌باشند [۸]. Xhixha و همکاران عدم قطعیت استفاده از مواد مرجع جهت کالیبره کردن سیستم طیف‌سنجی گاما (HPGe) را مورد بررسی و امکان‌سنجی قرار دادند. آنها نتیجه گرفتند که برای رادیونوکلیدهای با انرژی پایین، عدم قطعیت مربوط به خودجذبی سهم عمده را به خود اختصاص می‌دهد [۹].

از پژوهش‌های انجام‌شده در این زمینه عمدتاً با استفاده از روش مونت کارلو و روش‌های حل عددی استوار بوده و در آنها به فاکتورهای دخیل در عدم قطعیت، چگونگی تعیین آن، مفاهیم فیزیکی آنها و تأثیر هر کدام در عدم قطعیت نهایی اشاره‌ای نکرده‌اند. لذا هدف از این تحقیق، استخراج و تعیین تمام منابع دخیل در عدم قطعیت اندازه‌گیری اکتیویته، نحوه محاسبه و بیان ریاضی (فرموله کردن) مؤلفه‌های عدم قطعیت، محاسبه و تعیین سهم تک تک مؤلفه‌ها به صورت کمی می‌باشد.

## مواد و روش‌ها

عدم قطعیت از لحاظ منشاء و نحوه محاسبه به دو دسته A و B تقسیم می‌شود. عدم قطعیت نوع A از طریق تکرار اندازه‌گیری به دست آمده و معادل انحراف استاندارد از مقدار میانگین اندازه‌گیری‌ها می‌باشد. عدم قطعیت نوع B با استفاده از گزارش کالیبراسیون دستگاه‌ها و تجهیزات و استفاده از روابط مربوط به دست می‌آید [۱۰]. طبق استانداردهای ASTM [۱۱-۱۲] مقداری خاک از مکانی بکر و دست‌نخورده که در محیط باز و مسطح قرار داشته و هیچ گونه فعالیت انسانی در آنجا انجام نشده است نمونه‌برداری می‌شود و سپس به مدت ۲۴ ساعت در آن با دمای ۱۱۰ درجه سانتیگراد خشک می‌شود و پس از آن به وسیله آسیاب (بالمیل) و الک به مش‌بندی ۵۰۰ میکرومتر رسانده می‌شود سپس مقدار معینی اکتیویته از محلول استاندارد گواهی‌شده شرکت پل اتم (Polatom) به آن اضافه شده و به طور کامل مخلوط می‌شود. نمونه خاک مذکور در ظرف استوانه‌ای شکل به حجم ۲۵۰ سی‌سی ریخته شده که جرمی معادل ۲۴۳/۰۰ گرم دارد. این نمونه خاک به مدت ۷۲۰۰۰ ثانیه با استفاده از آشکارساز ژرمانیوم با خلوص بالا (HPGe) و بازده نسبی ۸۰٪ و نرم‌افزار آنالیز طیف GAMMA 2000 شمارش می‌شود. همچنین پیک keV ۶۶۱/۶۶ رادیونوکلید سزیم-۱۳۷ برای انجام محاسبات در نظر گرفته می‌شود. جهت کالیبراسیون انرژی، از چشمه نقطه‌ای Eu-152 استفاده شد و همچنین کالیبراسیون بازده سیستم با استفاده از استاندارد RGU1 آژانس بین‌المللی انرژی اتمی انجام شد.

در طیف‌سنجی گاما با استفاده از آشکارساز HPGe (High Purity Germanium) برای محاسبه اکتیویته عناصر پرتوزا از فرمول زیر استفاده می‌شود [۱۳]:

$$A = \frac{CPS}{\epsilon \cdot \gamma \cdot m \cdot K} \quad (1)$$

که جدول شماره ۱ پارامترهای این رابطه و توضیحات آنها را نشان می‌دهد.

جدول ۱. مشخصه‌های محاسبه اکتیویته عناصر پرتوزا

پارامتر	توضیحات
A	اکتیویته ویژه بر حسب بکرل بر جرم یا حجم
CPS	آهنگ شمارش
$\epsilon$	بازده آشکارسازی در انرژی مورد نظر
$\gamma$	احتمال نشر
m	جرم نمونه (حجم نمونه)
K	حاصل ضرب فاکتورهای $K_1$ تا $K_5$
$K_1$	ضریب تصحیح واپاشی هسته پرتوزا از زمان نمونه‌برداری تا ابتدای شمارش
$K_2$	ضریب تصحیح واپاشی هسته پرتوزا در زمان شمارش
$K_3$	ضریب تصحیح خود جذبی
$K_4$	ضریب تصحیح تجمیع تصادفی
$K_5$	ضریب تصحیح هم‌فروندی برای نوکلیدهایی که طی واپاشی آبشاری، فوتون ساطع می‌کنند.

آنالیز نمونه‌های خاک با استفاده از روش طیف‌سنجی گاما شامل نمونه‌سازی، شمارش نمونه و تحلیل داده‌ها و محاسبه اکتیویته می‌باشد. هر کدام از این مراحل دارای عدم قطعیت مربوط به خود است که در ابتدا شناسایی شده و سپس به صورت کمی محاسبه می‌شوند.

برای محاسبه عدم قطعیت هر یک از پارامترها، در صورتی که خود از چندین منبع عدم قطعیت ناشی شده باشد مانند  $\epsilon$  یا m، از رابطه زیر استفاده می‌شود [۱۴]:

$$u_x = \sqrt{u_1^2 + \dots + u_N^2} \quad (2)$$

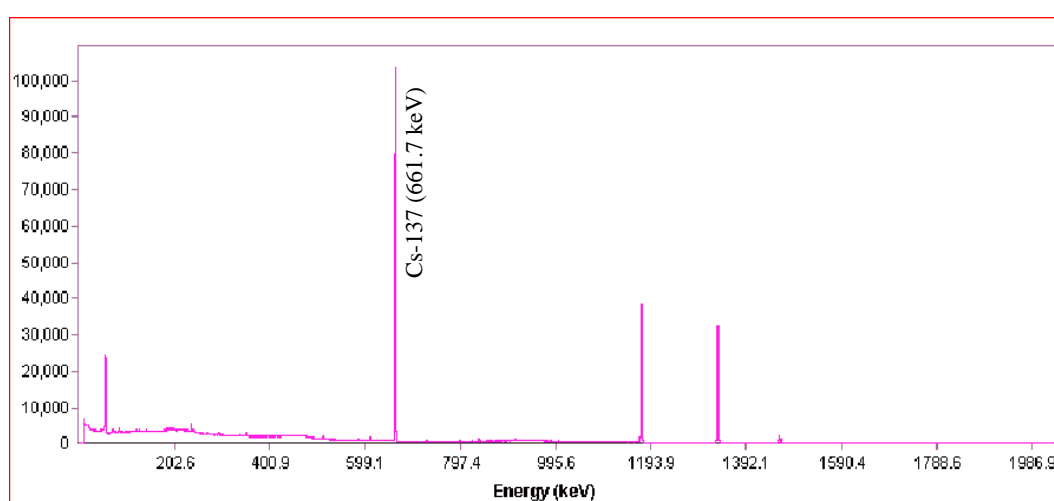
در این رابطه  $u_1$  تا  $u_N$  عدم قطعیت اجزای پارامتر مورد نظر هستند.

پس از تعیین عدم قطعیت تمام پارامترها به منظور ترکیب آنها و تعیین عدم قطعیت مرکب رابطه زیر مورد استفاده قرار می‌گیرد:

$$\frac{U_c(A)}{A} = \left[ \left( \frac{u(\text{CPS})}{\text{CPS}} \right)^2 + \left( \frac{u(\epsilon)}{\epsilon} \right)^2 + \left( \frac{u(\gamma)}{\gamma} \right)^2 + \left( \frac{u(K_1)}{K_1} \right)^2 + \dots + \left( \frac{u(K_5)}{K_5} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

## نتایج

شکل ۱ طیف انرژی مربوط به شمارش نمونه خاک مورد نظر به مدت ۷۲۰۰۰ ثانیه را نشان می‌دهد. اکتیویته سزیم-۱۳۷ با استفاده از رابطه ۱ و طیف شکل ۱ معادل ۴۸۲ بکرل محاسبه شد. به منظور گزارش عدم قطعیت این اندازه‌گیری بایستی تمام منابع مؤثر در عدم قطعیت شناسایی شد که جدول ۲ منابع عدم قطعیت استخراج شده در این کار و نحوه محاسبه آنها [۱۵و۵] را نشان می‌دهد.



شکل ۱. طیف گامای نمونه خاک.

جدول ۲. استخراج و محاسبه منابع عدم قطعیت اندازه‌گیری اکتیویته

پارامترها	منابع عدم قطعیت	چگونگی بدست آوردن	رابطه برای محاسبه عدم قطعیت
CPS	عدم قطعیت تکرار شمارش $u_{rep}$	شمارش نمونه چندین بار انجام می‌شود و میانگین آن به عنوان شمارش گزارش می‌شود.	$\frac{\sigma}{\sqrt{N}} = \sqrt{\frac{1}{N(N-1)} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}$
$\varepsilon$	عدم قطعیت برازش منحنی $u_{fitting}$	منحنی کالیبراسیون بازده رسم می‌شود و داده‌های مورد نیاز از آن استخراج می‌شود.	$u(\varepsilon) = \sqrt{u_{fitting}^2 + u_{CRM}^2 + u_{interpol}^2}$
	عدم قطعیت درونیابی $u_{interpolation}$	با استفاده از گواهی ماده مرجع تضمین شده که به عنوان چشمه استاندارد کالیبراسیون استفاده می‌شود به دست می‌آید.	
$\gamma$	عدم قطعیت احتمال نشر	استفاده از داده‌های TOI <sup>۱</sup>	-

<sup>۱</sup> Table of Isotopes

$u_{\text{calibration}} = \frac{\text{calib. coeff.}}{1.96}$	با توجه به سطح اطمینان ۹۵٪ در گواهی کالیبراسیون از فرمول روبرو باید به دست آید.	عدم قطعیت کالیبراسیون ترازو $u_{\text{calibration}}$	<b>m</b>
$u_{\text{balance resolution}} = \frac{\text{balance resolution}}{\sqrt{6}}$	با توجه به پیروری کردن از توزیع مثلی از فرمول روبرو باید به دست آید.	عدم قطعیت دقت ترازو $u_{\text{balance resolution}}$	
$\frac{\sigma}{\sqrt{N}} = \sqrt{\frac{1}{N(N-1)} \sum_{i=1}^N (xi - \bar{x})^2}$	با توجه به این که در تکرار اندازه‌گیری جرم با ترازوی دیجیتال اکثر یک مقدار بدست می‌آید لذا قابل چشم‌پوشی بود	عدم قطعیت تکرار اندازه‌گیری جرم	
$u(K_1) = K_1 \cdot \Delta t \cdot u(\lambda)$	با توجه به رابطه عدم قطعیت یک تابع چند متغیره که شامل مشتقات جزئی متغیرهاست به دست می‌آید.	عدم قطعیت عمر میانگین	<b>K<sub>1</sub></b>
$u(K_2) = \frac{1-K_2(1+\lambda t_r)}{\lambda} u(\lambda)$	با توجه به رابطه عدم قطعیت یک تابع چند متغیره که شامل مشتقات جزئی متغیرهاست به دست می‌آید.	عدم قطعیت تصحیح حین شمارش	<b>K<sub>2</sub></b>
قابل چشم‌پوشی	به علت یکسان بودن چشمه کالیبراسیون و نمونه	عدم قطعیت خودجذبی	<b>K<sub>3</sub></b>
قابل چشم‌پوشی	به علت آهنگ شمارش پایین	عدم قطعیت تصحیح اتلاف شمارش	<b>K<sub>4</sub></b>
قابل چشم‌پوشی	به علت عدم وجود واپاشی آشباری	عدم قطعیت تصحیح هم‌فرودی	<b>K<sub>5</sub></b>

اصولاً عدم قطعیت تکرار شمارش‌ها، بستگی به روش رایج آزمایشگاه دارد. در حالت اول چنان‌چه در یک آزمایشگاه، شمارش یک نمونه چندین بار انجام شود و میانگین آن به عنوان شمارش گزارش شود، انحراف معیار میانگین به عنوان عدم قطعیت تکرار و از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\frac{\sigma}{\sqrt{N}} = \sqrt{\frac{1}{N(N-1)} \sum_{i=1}^N (xi - \bar{x})^2} \quad (۴)$$

که N تعداد تکرارها و Xها آهنگ شمارش‌ها است. در حالت دوم اگر روال آزمایشگاه فقط یک بار انجام شمارش است، عدم قطعیت تک - شمارش از رابطه زیر (با فرض حداقل سه تکرار در زمان کالیبراسیون) حاصل می‌شود [۵]:

$$u_{\text{cps}} = \frac{\sqrt{\text{count}}}{t} \quad (۵)$$

که count سطح زیر پیک منحنی (مقدار تک - شمارش) و t زمان شمارش نمونه می‌باشد. به منظور محاسبه عدم قطعیت تکرارپذیری شمارش، نمونه مورد نظر شش مرتبه شمارش شد که آهنگ شمارش‌ها ۶/۲۲، ۶/۳۷، ۶/۴۱، ۶/۵۲، ۶/۲۴ و ۶/۳۳ و میانگین شمارش ۶/۳۵ و انحراف معیار استاندارد ۰/۱ به دست آمد. با استفاده از روابط معرفی شده در جدول ۲، عدم قطعیت شمارش u(cps) در جدول ۳ ردیف ۱ ارائه شده است.

عدم قطعیت کالیبراسیون بازده  $u(\varepsilon)$  ناشی از سه عدم قطعیت برازش منحنی (curve fitting)، عدم قطعیت چشمه استاندارد (ماده مرجع گواهی شده) و عدم قطعیت درون‌یابی ( $u_{\text{interpolation}}$ ) می‌باشد که با توجه به مقادیر به دست آمده از رسم منحنی کالیبراسیون، در جدول ۳ ردیف ۲ محاسبه شده است. عدم قطعیت احتمال نشر  $u(\gamma)$  در مرجع  ${}^2\text{TOI}$  برای انرژی ۶۶۱ کیلوالکترون ولت سزیم-۱۳۷ مقدار  $0/002$  تعیین شده است. با توجه به این که ضریب کالیبراسیون ترازو  $0/013$  ( $2\sigma$ ) و دقت ترازو  $0/01$  ( $\sigma$ ) می‌باشد عدم قطعیت اندازه‌گیری جرم در جدول ۳ ردیف ۴ محاسبه شده است. عدم قطعیت ضرایب  $K$  با توجه به نیمه عمر  $9/48 \times 10^8$  ثانیه سزیم-۱۳۷ و زمان نمونه‌سازی تا ابتدای شمارش  $201225600$  ( $\Delta t$ ) ثانیه، در ردیف‌های ۵ تا ۹ نشان داده شده است.

جدول ۳. مقادیر عدم قطعیت اندازه‌گیری اکتیویته

ردیف	پارامتر مورد نظر	مقادیر منابع عدم قطعیت	عدم قطعیت پارامتر
۱	$u(\text{cps})$	$u_{\text{rep}} = \frac{S.D}{\sqrt{m}} = \frac{0.1}{\sqrt{6}} = 0.041$	$0/041$
۲	$\frac{u}{\varepsilon}$	$u_{\text{fitting}} = 4.3\% (2\sigma)$	$0/034$
		$u_{\text{interpolation}} = 2.5\% (\sigma)$	
		$u_{\text{CRM}} = 0.018 (2\sigma)$	
۳	$u(\gamma)$	$[12] 0/002$	$0/002$
۴	$u(\text{m})$	$u_{\text{balance resolution}} = \frac{\text{balance resolution}}{\sqrt{6}} = 0.004$	$0/0076$
		$u_{\text{calibration}} = \frac{\text{calib. coeff.}}{2} = \frac{0.013}{2} = 0.0065$	
		عدم قطعیت تکرار اندازه‌گیری (قابل چشم‌پوشی)	
۵	$u(K_1)$	$u(K_1) = K_1 \cdot \Delta t \cdot u(\lambda)$	$0/0013$
۶	$u(K_2)$	$u(K_2) = \frac{1-K_2(1+\lambda t_r)}{\lambda} u(\lambda)$	$2/64 \times 10^{-7}$
۷	$u(K_3)$	قابل چشم‌پوشی	-----
۸	$u(K_4)$	$u(K_4) = \sqrt{(2R \cdot \exp(-2R\tau))^2 \cdot u^2(\tau) + (2\tau \cdot \exp(-2R\tau))^2 \cdot u^2(R)}$	$\approx 10^{-5}$
۹	$u(K_5)$	قابل چشم‌پوشی	-----
۱۰	$U_c(A)$	ترکیب تمام عدم قطعیت‌های محاسبه شده بالا	$16/7$

<sup>2</sup> Table of Isotopes

با استفاده از نتایج جدول ۳ و معادله ۳ عدم قطعیت مرکب بسط یافته با سطح اطمینان ۹۵٪ ( $k=2$ ) عبارتست از  
 $۱۶/۷ \times ۲ = ۳۳/۴$  که در نتیجه گزارش نهایی اکتیویته به همراه عدم قطعیت مربوطه به شکل زیر خواهد بود:

$$A = 482 \pm 33.4 \text{ Bq}$$

در این کار سعی بر آن بوده تا اهمیت تخمین و اندازه‌گیری عدم قطعیت نشان داده شود و روندی که طی آن این پارامتر برای اندازه‌گیری اکتیویته رادیونوکلئید گاما زای سزیم-۱۳۷ در نمونه‌های خاک، محاسبه می‌شود و پارامترهای تأثیرگذار بر آن ارائه شوند.

### نتیجه‌گیری

روش طیف‌سنجی گاما یکی از مفیدترین و متداول‌ترین روش‌های تشخیص مشخصات کیفی و کمی عناصر رادیواکتیو گاما زای در نمونه‌ها است. هنگامی که نتیجه اندازه‌گیری کمیت مورد نظر طیف‌سنجی گاما گزارش می‌شود، می‌بایست که در مورد کیفیت نتیجه نیز اعلام نظر کرد تا کسی که آن را استفاده می‌کند بتواند قابلیت اطمینان آن را ارزیابی کند. این اطمینان در کنار نتایج از طریق تعیین عدم قطعیت اندازه‌گیری فراهم می‌شود. دقت بالاتر و عدم قطعیت کمتر در نتایج بسته به مهارت کاربر و دانش فنی لازم و روش کالیبراسیون به کار رفته و بالاخص مواد کالیبره‌کننده مناسب می‌باشد. بنابراین در عمل، عدم قطعیت یک نتیجه چنانچه ناشی از منابع احتمالی زیادی باشد لازم است هر یک از منابع عدم قطعیت لحاظ شده و مقدار سهم آن در عدم قطعیت کل، به طور جداگانه مورد بررسی و ارزیابی قرار گیرد. بنابراین در تحقیق حاضر عوامل تأثیرگذار بر عدم قطعیت اندازه‌گیری اکتیویته رادیونوکلئیدهای گاما زای خاک با استفاده از روش طیف‌سنجی گاما مشخص و سپس مقدار هر یک محاسبه شد. عدم قطعیت اندازه‌گیری پرتوزایی برای نمونه خاکی که اکتیویته سزیم-۱۳۷ آن ۴۸۲ بکرل اندازه‌گیری شد با سطح اطمینان ۹۵ درصد حدود ۳۳/۴ بکرل محاسبه شد که این مقدار اگر به صورت عدم قطعیت نسبی بیان شود حدود ۶/۹٪ خواهد شد که اطمینان‌پذیری خوب نتایج اندازه‌گیری اکتیویته را نشان می‌دهد. همچنین از بین تمام عوامل تأثیرگذار در عدم قطعیت نهایی، عدم قطعیت شمارش و بازده سهم عمده‌ای را به خود اختصاص می‌دهند.



## منابع

1. Kristiansen J., "The guide to expression of uncertainty in measurement approach for estimating uncertainty: an appraisal", *Clinical chemistry*, 49 (2003) 1822-1829.
2. Kirkup, Les, and Robert B. Frenkel. *An introduction to uncertainty in measurement: using the GUM (guide to the expression of uncertainty in measurement)*. Cambridge University Press, 2006.
3. Pourhabib Z, Binesh A, Mohammadi S. A study on heavy radioactive pollution: Radon and Radium in streams and drinking water of Ramsar region by measured Prassi system. *IJPR*. 2012; 11 (4) :397-403
4. Nasri Nasrabadi, Hajjaliani, Mostajaboddavati. Assessment of natural radioactivity in soil samples of Dez river sides – Khouzestan province . *IJPR*. 2015; 14 (4) :369-374
5. Gilmore, Gordon. *Practical gamma-ray spectroscopy*. John Wiley & Sons, 2011.
6. Plukis, Artūras, Vytenis Barkauskas, Rūta Druteikienė, Grigorijus Duškesas, Darius Germanas, Arūnas Gudelis, Laurynas Juodis, Elena Lagzdina, Rita Plukienė, and Vidmantas Remeikis. "Uncertainty of determination of  $^{158}\text{Tb}$  in the RBMK nuclear reactor waste." *Applied Radiation and Isotopes* 134 (2018): 190-193.
7. Jodłowski, Paweł, and Stefan J. Kalita. "Gamma-ray spectrometry laboratory for high-precision measurements of radionuclide concentrations in environmental samples." *Nukleonika* 55 (2010): 143-148.
8. Ramebäck, H., and P. Lindgren. "Uncertainty evaluation in gamma spectrometric measurements: Uncertainty propagation versus Monte Carlo simulation." *Applied Radiation and Isotopes* 142 (2018): 71-76.
9. Xhixha, Gerti, Matteo Alberi, Marica Baldoncini, Kozeta Bode, Elida Bylyku, Florinda Cfarku, Ivan Callegari et al. "Calibration of HPGe detectors using certified reference materials of natural origin." *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* 307, no. 2 (2016): 1507-1517.
10. Taylor, Barry N., and Chris E. Kuyatt. "Guidelines for evaluating and expressing the uncertainty of NIST measurement results" (1994).

11. ASTM C998-17, Standard Practice for Sampling Surface Soil for Radionuclides, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017, [www.astm.org](http://www.astm.org).
12. ASTM C999-17, Standard Practice for Soil Sample Preparation for the Determination of Radionuclides, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017, [www.astm.org](http://www.astm.org).
13. IAEA, Quantifying uncertainty in nuclear analytical measurements, TECDOC 1401:2004. International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria (2004).
14. Firestone, Richard B., and Virginia S. Shirley. "Table of isotopes, 2 volume set." Table of Isotopes, 2 Volume Set, by Richard B. Firestone, Virginia S. Shirley (Editor), pp. 3168. ISBN 0-471-33056-6. Wiley-VCH, December 1998. (1998): 3168.
15. ISO/IEC 98-1:2009." Uncertainty of measurement - Part 1: Introduction to the expression of uncertainty in measurement. 2009