



پاسخ آشکارساز اتاقک نفوذی رادون با استفاده از روش جدید کالیبراسیون و نتایج آن در آزمون مقایسه‌ای بین‌المللی

سیدمهدی حسینی پویا*^{۱،۲}، مهران طاهری^۱، فرزانه ترابی نبیل^۳، مجتبی شمسایی ظفرقندی^۲

۱. مرکز نظام ایمنی هسته‌ای کشور، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۳۳۹-۱۴۱۵۵، تهران - ایران
۲. پژوهشکده‌ی کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی، صندوق پستی: ۳۴۸۶-۱۳۶۵، تهران - ایران
۳. دانشکده‌ی مهندسی انرژی و فیزیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، صندوق پستی: ۴۴۱۳-۱۵۸۷۵، تهران - ایران

چکیده: اندازه‌گیری گاز رادون به عنوان یکی از عناصر پرتوزا که استنشاق آن امکان ایجاد مخاطره‌های ریه را در بر دارد همواره برای پژوهش‌گران از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده است. در این پژوهش پاسخ آشکارساز غیرفعال اتاقک نفوذی گاز رادون با استفاده از یک روش جدید کالیبراسیون براساس توسعه‌ی روش کالیبراسیون جریان-عبوری تعیین شد. این آشکارساز شامل یک اتاقک است که براساس نفوذ گاز رادون به درون آن و ثبت ردپای ذرات آلفای گسیل شده از رادون و یا دختران آلفازای آن بر روی فیلم پلی کربنات انتهای اتاقک عمل می‌نماید. این روش کالیبراسیون شامل یک چشمه‌ی استاندارد نوع جریان-عبوری متصل به یک محفظه‌ی طراحی شده‌ی کالیبراسیون با قابلیت کنترل و تنظیم غلظت رادون درون آن است. بهترین تخمین اندازه‌گیری در این روش کالیبراسیون برابر ۵٪ با سطح اطمینان ۶۵٪ است. ضریب حساسیت آشکارسازی اتاقک نفوذی با این روش کالیبراسیون برابر ۱۳٫۵۵ برحسب $[\text{tracks cm}^{-2} (\text{Bq lit}^{-1} \text{ day})^{-1}]$ به دست آمده است. نتایج حاصل از شرکت این آشکارساز در آزمون مقایسه‌ای بین‌المللی، اختلافی کم‌تر از ۵٪ نسبت به مقادیر مرجع آزمون در سه سطح غلظت کم، متوسط و بالا نشان داد.

کلیدواژه‌ها: رادون، اتاقک نفوذی، کالیبراسیون

The Response of Radon Diffusion Chamber Using a New Calibration Method and its Results in an International Intercomparison

S.M. Hossini Pooya*^{1,2}, M. Taheri¹, F. Torabi Nabil³, M. Shamsaie Zafarghandi³

1. Iran Nuclear Regulatory Authority, AEOL, P.O.Box: 14155-1339, Tehran - Iran

2. Research School of Radiation Applications, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOL, P.O.Box: 11365-3486, Tehran - Iran

3. Nuclear Engineering and Physics Faculty, Amirkabir University of Technology, P.O.Box: 15875-4413, Tehran - Iran

Abstract: The measurements of radon as a radioactive gas, when inhaled creates lung cancer risk in human, are of great importance for researchers. In this research, the response of a passive radon detector is determined based upon a new calibration method. The detector includes a chamber in which the radon gas can diffuse inside the chamber and the alpha particles from the radon and/or its alpha emitter daughters are registered on the surface of a polycarbonate film at the bottom of the chamber. The new calibration method includes a traceable standard flow-through source of radon, connected to a designed calibration chamber with adjustable inner radon concentration. The uncertainty of the method is 5% with the confidence level of 95%. The sensitivity of the detection method is calculated to be 13.55 $[\text{tracks cm}^{-2} (\text{Bq lit}^{-1} \text{ day})^{-1}]$, and the results of an international intercomparison show that the differences between the measured values by the system are less than 5% in comparison with those of the reference values in three radon levels; that is, low, medium, and high concentrations.

Keywords: Radon, Diffusion Chamber, Calibration



۱. مقدمه

استنشاق مقادیر زیاد گاز رادون، ایزوتوپ‌های آن (مانند تورون) به همراه محصول‌های واپاشی آن‌ها می‌تواند منجر به بروز سرطان ریه در انسان شود، به طوری که در جهان به عنوان دومین عامل این نوع سرطان پس از سیگار شناخته می‌شود. رادون می‌تواند در مناطق با پرتوژیایی طبیعی بالا (بیش‌تر به دلیل حضور عنصر مادر رادیم) و یا در تأسیسات هسته‌ای مانند معادن اورانیم (به دلیل حضور عناصر زنجیره‌ای اورانیم) برای عموم مردم و یا پرتوکاران ایجاد خطر نماید. مطالعه در زمینه‌ی اندازه‌گیری رادون در هوا در بسیاری از کشورهای جهان از جمله ایران به دلیل وجود مناطق با پرتوژیایی طبیعی بالا مانند رامسر و فضاها‌ی بسته‌ای چون معادن و غارهای توریستی در سطح وسیع همواره مورد نظر پژوهش‌گران بوده است [۱، ۲، ۳]. بیش‌تر اندازه‌گیری‌های غیرفعال انجام شده، با استفاده از اتاقک‌های نفوذی بوده است که از سالیان گذشته در کشور مورد استفاده قرار گرفته است [۳]. کالیبراسیون این اتاقک‌ها با استفاده از منابع پرتوژیایی غیراستاندارد (مانند نمونه‌های معدنی خاک حاوی اورانیم) درون اتاقک‌های دستکش‌دار انجام می‌شده است که هر چند ضریب حساسیت آن دارای صحت کافی بوده است اما از کفایت دقت آن اطمینان وجود نداشته است [۴]. چشمه‌های استاندارد کالیبراسیون دستگاه‌های سنجش‌گر و آشکارساز رادون برحسب نوع عملکرد زیاداند که از آن جمله می‌توان به چشمه‌های ثابت، جریان- عبوری و نمونه‌برداری آبی اشاره نمود. در استفاده از چشمه‌های ثابت، دو نکته حایز اهمیت است. نخست آن‌که تنها یک غلظت رادون می‌تواند از آن به دست آید. این ویژگی سبب ایجاد محدودیت در کالیبراسیون می‌شود. دوم آن‌که زمان پایا شدن غلظت رادون درون محفظه‌ی کالیبراسیون، با توجه به نیم- عمر طولانی (۳۸ روز) رادون در مقایسه با زمان‌های نوعی مورد نیاز برای کالیبراسیون (چند ساعت) نوعاً طولانی است. این زمان طولانی تعادل می‌تواند خطای کالیبراسیون زیادی ایجاد نماید. در این میان چشمه‌های نوع جریان عبوری برای سیستم‌های فعال اندازه‌گیری رادون عموماً مناسب‌اند؛ اما برای عملکرد آن‌ها پمپ هوا مورد نیاز است.

روش استفاده از عبور هوا از روی چشمه‌های ثابت مولد رادون به درون یک محفظه برای کالیبراسیون آشکارسازهای غیرفعال رادون در محدوده‌ی غلظت‌های پایین توسط کوتراپا و همکاران معرفی شده است [۵]. در این روش، رادون تولید شده و تجمع یافته در چشمه، به وسیله‌ی پمپ به درون یک محفظه‌ی

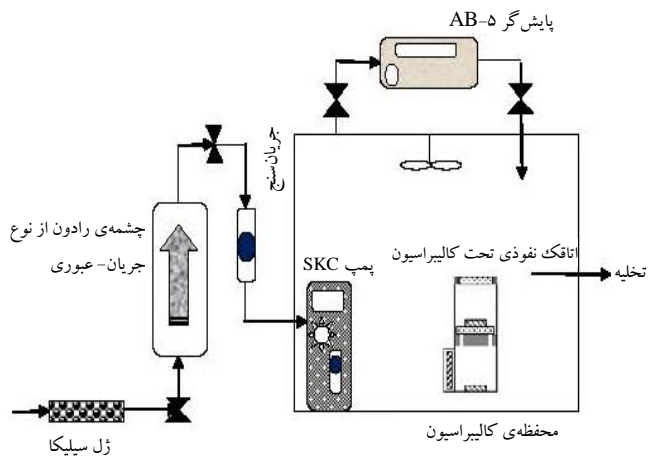
کالیبراسیون با حجم معین وارد می‌شود. پس از طی زمان مشخصی، رادون و دختران آن به تعادل می‌رسند و می‌توان با قرار دادن انواع غیرفعال سنجش‌گر رادون در درون آن، عملیات کالیبراسیون را در غلظت‌های مختلف به انجام رسانید. اما در پژوهش مذکور هیچ‌گونه بررسی در خصوص زمان پایایی غلظت کالیبراسیون، نایقینی اندازه‌گیری و نیز محدودیت‌های دامنه‌ی کالیبراسیون انجام نشده است.

در این پژوهش ضمن ساخت یک محفظه‌ی کالیبراسیون، این شیوه‌ی کالیبراسیون با استفاده از چشمه‌های نوع جریان- عبوری توسعه یافته است. هم‌چنین بررسی خصوصیات از جمله زمان پایایی غلظت رادون در محفظه‌ی کالیبراسیون، نایقینی اندازه‌گیری و محدودیت‌های دامنه‌ی کالیبراسیون و نیز امکان به کارگیری چشمه‌های نوع جریان- عبوری برای کالیبراسیون سیستم‌های آشکارساز غیرفعال مورد بحث قرار گرفته است. سپس آشکارساز اتاقک نفوذی رادون به عنوان یک آشکارساز غیرفعال مورد استفاده در کشور، تحت این شرایط، کالیبره و تعیین حساسیت شده و با بررسی نتایج پرتودهی آن در یک آزمون مقایسه‌ای بین‌المللی، دقت و صحت این روش اندازه‌گیری و کالیبراسیون مورد بحث قرار گرفته است.

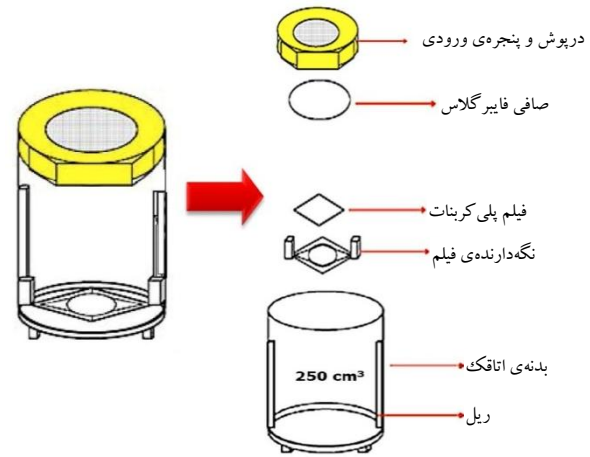
۲. مواد، وسایل و روش‌ها

۱.۲ فرایند آشکارسازی

طرح‌واره‌ی اتاقک نفوذی رادون مورد استفاده در شکل ۱ نشان داده شده است. رادون موجود در هوا (بدون امکان ورود محصول‌های واپاشی آن) با عبور از صافی فایبرگلاس پنجره‌ی ورودی به داخل اتاقک نفوذ می‌کند. بخشی از آلفاهای حاصل از واپاشی آن و یا دختران آلفازایش، به آشکارساز ردپای هسته‌ای حالت جامد از نوع پلی‌کربنات لگزان^(۱) که در انتهای اتاقک قرار دارد رسیده و ایجاد رد پای نهان^(۲) می‌کند. پس از پرتودهی، ردپاهای نهان ایجاد شده، با استفاده از فرایند الکتروشمیایی با ولتاژ ۸۰۰ ولت و در مدت ۳ ساعت در دمای اتاق، قابل دیدن شده و با تصویربرداری به وسیله‌ی یک سیستم پویش‌گر با قدرت تفکیک بالا و تحلیل نرم‌افزاری به صورت خودکار شمارش گردید. محلول به کار رفته شامل پتاس، اتانول و آب (PEW) بود [۶]. ابعاد اتاقک طوری بهینه‌سازی شده است که با توجه به شرایط به کار رفته و زوایای برخورد ذرات آلفا، بیش‌ترین بازده آشکارسازی به دست آید.



شکل ۲. طرح‌واره‌ی روش کالیبراسیون با استفاده از چشمه‌ی نوع جریان-عبوری.



شکل ۱. ساختار اتاقک نفوذی گاز رادون مورد استفاده.

با روشن شدن پمپ و تنظیم جریان‌سنج، جریان هوا ابتدا از سلول سیلیکا ژل عبور می‌کند و رطوبت به علاوه‌ی رادون موجود در هوا در آن جذب می‌شود. بنابراین هوای خالص به درون چشمه وارد شده و رادون تجمع یافته در آن به علاوه‌ی دختران آن را از چشمه خارج می‌کند. بلافاصله بعد از چشمه، یک صافی فایبرگلاس قرار داشت که مانع خروج دختران رادون می‌شد و از این‌رو تنها رادون موجود در چشمه با فعالیت معلوم می‌توانست از طریق پمپ به داخل محفظه نفوذ کند. فعالیت، A رادون در محفظه، به صورت نظری از رابطه‌ی زیر قابل محاسبه است

$$A = \frac{A^\circ}{f} \quad (1)$$

که در آن A° فعالیت چشمه و f آهنگ جریان عبوری هوا از آن است.

۳.۲ محاسبه نایقینی کالیبراسیون

با توجه به رابطه‌ی (۱)، بهترین قابلیت تخمین یا $BMC^{(3)}$ برای فعالیت A در این اندازه‌گیری برحسب نایقینی‌های اجزای آن، از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید $[A]$

$$BMC(A) = \frac{A^\circ}{f} \sqrt{\left(\frac{U_{A^\circ}}{A^\circ}\right)^2 + \left(\frac{U_f}{f}\right)^2} \quad (2)$$

که در آن U نشان‌دهنده‌ی نایقینی هر کدام از اجزا است.

با توجه به احتمال توزیع نرمال آهنگ فعالیت و احتمال توزیع مربعی مقدار نمایش جریان‌سنج داریم

$$BMC(A) = \frac{A^\circ}{f} \sqrt{\left(\frac{\sigma_{Source}}{A^\circ}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{flow-meter}}{\sqrt{3}f}\right)^2} \quad (3)$$

۲.۲ کالیبراسیون

روش کالیبراسیون، به طور طرح‌وار در شکل ۲ نشان داده شده است. چشمه‌ی رادون از نوع جریان-عبوری (PYLON Rn-۱۰۲۵) با دقت فعالیت $\pm 4\%$ قابل ردیابی در آزمایشگاه استاندارد NIST به عنوان منبع رادون مورد استفاده قرار گرفت [۷]. یادآوری می‌شود که بر خلاف میدان‌های استاندارد پرتودهی گاما که قابلیت ردیابی آن‌ها از طریق آزمایشگاه‌های استاندارد پرتودهی اولیه (قابل ردیابی در کمیته جهانی اوزان و مقادیر) و یا ثانویه در سطح کشور (PSDL & SSDL) فراهم شده است، در مورد رادون چنین ردیابی فقط از طریق آزمایشگاه‌های معتبر و محدودی در سطح ملی (چون NIST) امکان‌پذیر است.

در این روش کالیبراسیون از یک محفظه‌ی کالیبراسیون شفاف به حجم ۵۰ لیتر با امکان درزبندی کامل درب و اتصال شیرهای مختلف استفاده شد. شفافیت محفظه به این دلیل ضروری بود که بتوان پایش‌گرهای غیرفعال رادون (مانند آلفا گارد) را در داخل آن قرار داده و پاسخ آن را به طور لحظه‌ای مشاهده نمود. یک دستگاه پمپ هوا (SKC) با پایداری جریان بالا درون آن قرار می‌گرفت به طوری که ورودی پمپ به یکی از شیرهای محفظه متصل می‌شد و خروجی پمپ به داخل محفظه باز می‌گشت. به منظور یکنواخت‌سازی غلظت رادون در حجم محفظه، از یک فن با نرخ جریان گردش هوای پایین استفاده می‌شد. دمای داخل محفظه نیز به صورت لحظه‌ای توسط یک دماسنج دقیق کنترل و ثبت می‌شد. به منظور تعیین غلظت لحظه‌ای رادون درون محفظه، یک دستگاه پایش‌گر رادون (PYLON AB-5) از پیش کالیبره شده به طور مستقیم با همین چشمه، به صورت مدار بسته به محفظه متصل می‌شد.



بررسی یکنواختی غلظت رادون درون محفظه‌ی کالیبراسیون با روش نمونه‌برداری آبی در حالت پایا، از ۶ شیر متصل به محفظه به انجام رسید. میزان اختلاف بین نتایج اندازه‌گیری آن ۱٫۲٪ به دست آمد. این میزان حاکی از همگن بودن مناسب غلظت رادون درون محفظه‌ی کالیبراسیون است.

۲.۳ تعیین حساسیت اتاقک نفوذی رادون با استفاده از محفظه‌ی کالیبراسیون

تعدادی از اتاقک‌های نفوذی پرتودهی شده، داخل محفظه‌ی کالیبراسیون در چهار غلظت- زمان متفاوت پس از طی مراحل و فرایند الکتروشمیای شمارش شد. نتایج در شکل ۴ نشان داده شده است. ضریب زاویه‌ی این خط برابر حساسیت اتاقک نفوذی و برحسب $[tracks\ cm^{-2}\ (Bq\ lit^{-1}\ day)^{-1}]$ برابر ۱۳٫۵۵ است که نشان می‌دهد این اتاقک‌ها برای اندازه‌گیری‌های فصلی رادون به غلظت در حد چند تا چند هزار بکرل بر متر مکعب مناسب است. هم‌چنین با توجه به انحراف معیار ۴٪ چشمه و ۲٫۵٪ مقدار نمایش جریان‌سنج، میزان BMC از رابطه‌ی (۲) با سطح اطمینان ۶۸٪ برابر ۴٫۲۵٪ به دست آمد. با توجه به ۱۰٪ خطای سه بار اندازه‌گیری اتاقک نفوذی در هر غلظت پرتودهی، میزان نایقینی ضریب حساسیت به دست آمده طبق رابطه‌ی (۴) برابر ۷٫۲٪ تعیین شد.

۳.۳ نتایج آزمون مقایسه‌ای بین‌المللی

در یک برنامه‌ی آزمون مقایسه‌ای بین‌المللی که در مؤسسه‌ی ملی تحقیقات پرتوی ژاپن (NIRS) برگزار شد [۹]، آشکارسازهای رادون متفاوتی که از کشورهای مختلف از جمله ایران (با کد Lab. Code ۲۴) ارسال شده بودند، در سه سطح غلظت کم، متوسط و بالای رادون پرتودهی شدند. سپس دزیمترهای پرتودهی شده که میزان آن برای ارسال‌کنندگان مجهول بوده است برای خواندن و اعلام نتایج به آزمایشگاه مبدأ بازگردانده شد. نتایج پرتودهی‌های خوانده شده‌ی آشکارسازهای ارسالی از ایران به همراه مقادیر مرجع مربوط در ژاپن در جدول ۱ ارایه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود اختلاف مقادیر خوانده شده به وسیله‌ی اتاقک‌های نفوذی و مقادیر مرجع NIRS کم‌تر از ۵٪ است که نشان‌دهنده‌ی دقت بالای روش جدید کالیبراسیون به کار رفته برای این اتاقک‌ها است.

که در آن σ انحراف معیار کمیت مربوط است.

با توجه به انحراف معیار ۴٪ چشمه و ۲٫۵٪ مقدار نمایش جریان‌سنج، مقدار BMC با سطح اطمینان ۶۸٪ برابر ۴٫۲۵٪ به دست می‌آید.

مقدار BMC با نایقینی هر سیستم شمارش رادون که با این شیوه کالیبره می‌شود، نایقینی کل کالیبراسیون U برای آن سیستم را چنین به دست می‌دهد

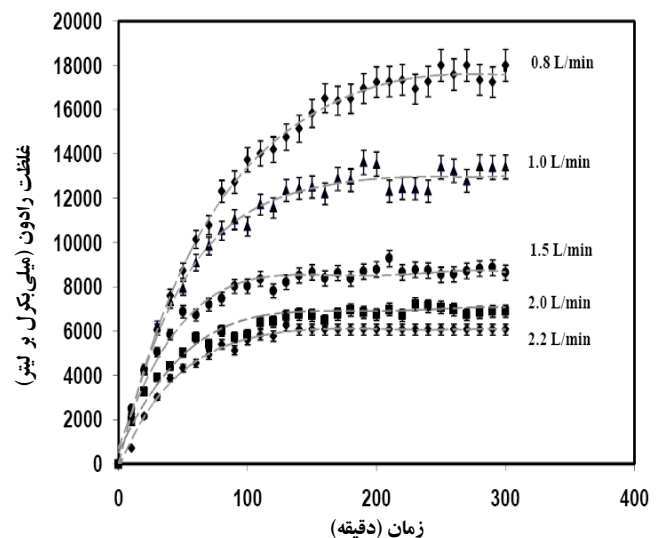
$$U = \sqrt{BMC^2 + \frac{1}{n} \sigma^2_{Radon-monitor}} \quad (4)$$

که در آن n تعداد تکرار اندازه‌گیری‌ها توسط پایش‌گر رادون تحت کالیبراسیون است.

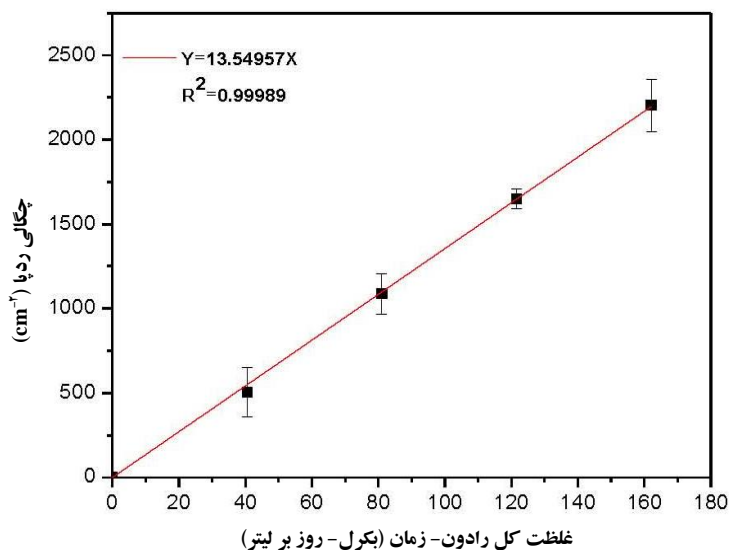
۳. نتایج و بحث

۱.۳ تعیین غلظت‌های مرجع در محفظه‌ی کالیبراسیون

شکل ۳ غلظت‌های مرجع به دست آمده به وسیله‌ی پایش‌گر AB-۵ با تغییر مقدار نمایش آهنگ جریان‌سنج را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود زمان رسیدن غلظت به حالت پایا در این روش کالیبراسیون در حدود ۱۵۰ دقیقه است. با توجه به این زمان آستانه، زمان پرتودهی باید آن قدر بزرگ (در حد چند ساعت) انتخاب شود که خطای آن قابل صرف‌نظر کردن باشد. هم‌چنین محدودیت غلظت‌های قابل دست‌یابی در این روش، از ۰٫۸ تا ۲٫۲ بکرل بر لیتر است.



شکل ۳. تغییر غلظت رادون درون محفظه‌ی کالیبراسیون در آهنگ‌های جریان متفاوت.



شکل ۴. منحنی پاسخ اتاکنک نفوذی رادون پرتودهی شده.

جدول ۱. مقایسه‌ی غلظت اندازه‌گیری شده‌ی رادون به وسیله‌ی اتاکنک نفوذی با مقادیر مرجع NIRS

مقادیر اندازه‌گیری شده به وسیله‌ی اتاکنک نفوذی	مقادیر مرجع NIRS		مشخصه‌های پرتودهی مرجع			
	غلظت رادون (Bq.m ⁻³)	میزان پرتودهی (kBq.h.m ⁻³)	غلظت رادون (Bq.m ⁻³)	میزان پرتودهی (kBq.h.m ⁻³)	زمان پرتودهی (h)	فعالیت
میزان پرتودهی (kBq.h.m ⁻³)	۱۰۳۳٫۶±۷۰	۱۰۳٫۳۶±۷٫۲	۱۰۲±۶	۱۰۲۲±۵۹	۱۰۰	کم
غلظت رادون (Bq.m ⁻³)	۸۴۰٫۹±۷۲۰	۴۲۰٫۴۳±۳۰	۴۴۱±۱۱	۸۸۱۸±۲۲۱	۵۰	متوسط
میزان پرتودهی (kBq.h.m ⁻³)	۸۴۷٫۸±۷۶۰	۸۴۷٫۸۸±۶۰	۸۷۵٫۳±۲۷	۸۷۵۳±۲۷۰	۱۰۰	بالا

پی‌نوشت‌ها

۱. Lexan Polycarbonate
۲. Latent Track
۳. Best Measurement Capability

۴. نتیجه‌گیری

نظر به مخاطره‌های استنشاق گاز رادون و دختران آن، دقت روش‌های سنجش، که بستگی به روش کالیبراسیون به کار رفته دارد، دارای اهمیت زیادی است. در این پژوهش، امکان استفاده از چشمه‌های جریان عبوری برای کالیبراسیون آشکارسازهای رادون مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این بررسی نشان داد که دقت این روش کالیبراسیون بالا بوده و مزایایی چون امکان داشتن غلظت‌های متفاوت به هنگام کالیبراسیون، سرعت بالای رسیدن به حالت پایا، امکان کالیبراسیون هم‌زمان چند وسیله و هر دو نوع سیستم شمارش فعال و غیرفعال از مزایای این روش است. نتایج آزمون مقایسه‌ای بین‌المللی نیز بر اعتبار روش کالیبراسیون تأکید می‌کند.



مرجع ها

1. M. Sohrabi, A.R. Solaymanian, Indoor radon level measurements in some regions of Iran, Nucl. Tracks. Radiat. Meas., 15 (1988) 613-616.
2. M. Jafarizadeh, M. Taheri, N. Rastkhah, M.R. Kardan, Measurements of radon level in two tourist caves in Iran, Europ. Conf. on Individual monitoring of ionizing radiation, March 8-12 2010 (IM 2010) Athens, Greece.
3. M. Sohrabi, H. Zainali, Sh. Mahdi, A.R. Solaymanian, Mo. Salehi, Determination of ^{222}Rn levels in houses, schools and hotels of Ramsar by AEOI passive radon diffusion chambers, Proc. Int. Conf. of High Levels of Natural Radiation, Ramsar, Iran (1990) 365-375.
4. B. Babapooran, Determination of public exposures due to inhalation of radon in Ramsar, M. Sc. thesis, Amirkabir University of Technology (1998).
5. P. Kotrappa, L.R. Stieff, P. Volkovitsky, Radon monitor calibration using NIST Radon emanation standards: steady flow method, Radiat. Prot. Dosim, 113 (2005) 70-74.
6. M. Sohrabi, A.R. Solaymanian, Some characteristics of the AEOI passive radon diffusion dosimeter, Nucl. Tracks. Radiat. Meas., 15 (1988) 605-608.
7. Pylon Rn-1025 Instruction Manual, www.pylonelectronics.com, (2008).
8. GUM- Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, ISO, Geneva, ISBN 92-67-10188-9 (1995).
9. M. Janik, T. Ishikawa, Y. Omori, N. Kavasi, Technical Report on the 4th International Intercomparison for Integrating Radon/thoron Detectors with the NIRS Radon/thoron Chambers, National Institute of Radiological Science (NIRS), May 26 (2012) www.nirs.go.jp.