اصول طراحی پوشش رادن و اثبات مدل نظری

INC29-1260

نورا نصیری مفخم*،مجتبی کاکایی، مسیح علوی

پژوهشکده چرخه سوخت، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، ۸۳۶-۱۴۳۹۵،تهران ـ ایران

چکیده:

کشورهای دارای صنایع نفت وگاز و استخراج و استحصال اورانیم، سالانه مقادیر متنابهی پسماندهای حاوی مواد پرتوزا شامل رادیونوکلیدهای زنجیره اورانیم یا توریم و مواد پرتوزای طبیعی تولید می‌کنند، که مهمترین اثرات پرتوی حوضچه‌های باطله اورانیوم و لندفیلهای این مواد در محیط زیست و انسان، رهایش رادن از آنها به محیط است. رادن هوا و محصولات واپاشی آن بصورت بالقوه، مخاطرات پرتوی برای سلامت جامعه دارد. در نتیجه، کاهش رادن از اهمیت ویژه ای برخوردار است. طراحی پوشش رادن، یکی از موضوعات اساسی در مدیریت پسماندای، برای کاهش رهایش رادن به جو و جلوگیری از فرسایش خاک پسماندگاه‌ها است. در این پژوهش، برای طراحی بهینه سد رادن، تایید معادلات نظری حاکم بر انتشار رادن از پسماندگاه و اعتبارسنجی روش بکار رفته برای اندازه‌گیری کوتاه مدت شار رادن خروجی از خاک، دستگاهی به منظور انجام آزمایش‌های اندازه‌گیری ضرایب پخش رادن و چگالی شار رادن خاک طراحی و ساخته شد. مقایسه نتایج نظری و عملی، نشان می‌دهد که مدل نظری و روش به‌کار گرفته شده برای اندازه‌گیری شار رادن، از دقت کافی برخودار است و نتایج حاصل از سد رادن طراحی شده در این دستگاه، قابل تعمیم به شرایط واقعی است.

کلیدواژه‌ها: لندفیل، حوضچه باطله، مواد پرتوزای طبیعی، معادله پخش، اندازه‌گیری چگالی شار رادن

Principals of radon cover design and demonstration theoretical model

Nora Nassiri-Mofakham*, Mojtaba Kakaei, Masih Alavi

Fuel Cycle Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, 14395-836, Tehran, Iran.

Abstract:

The countries with oil and gas industries, uranium ores extraction and other resource extraction industries produce enormous amounts of residues containing radionuclides of the uranium or thorium chain and natural occurring radioactive materials (NORM). One important pathway for radiological impact arising from radioactive waste and NORM residues is the release of radon isotopes into the atmosphere. Atmospheric radon and its decay products have potential radiological impacts on public health. Thus radon attenuation, including the effect of various covers is an important element in rehabilitation planning. As a result, the radon cover design is one of the basic issue in waste management to reduce radon releases to the atmosphere and soil erosion in repositories. In this study, for the optimal design of the radon cover, an experimental apparatus is designed and built to measure the radon diffusion coefficients and soil radon flux density to confirm the theoretical equations governing radon release from the soil and to validate the method used to short-time radon flux measurement. Comparison of theoretical end experimental results show that both theoretical model and presented method to measure radon flux have sufficient accuracy and the results of the radon cover designed in this device can be generalized to real conditions.

Keywords: Landfill, Tailings, NORM, Diffusion equation, Radon flux measurement.

۱. مقدمه

انتشار رادن از پسماندگاه‌های مواد پرتوزا نظیر حوضچه‌های باطله اورانیم، یکی از مهم‌ترین عوامل پرتوزایی محیط و خطرناک برای سلامتی انسان است. در فرایند استخراج اورانیم از سنگ معدن، تنها بخش ناچیزی از رادیم، مادر رادن، جداسازی می‌شود. در نتیجه میزان رادیم در پسماندها بالا است و موجب آسیب رساندن به محیط زیست و پرتوگیری افراد می‌شود[۱-۳]. به دلیل نیمه عمر نسبتا طولانی (حدود ۴ روز) رادن می‌تواند در فاصله‌های زیاد جابجا شود و براساس گزارش‌های موجود، غلظت بالای آن در فواصل بیش از ۱۰۰۰ متر از حوضچه باطله نیز دیده شده است[۳].

گرچه رادن خود به تنهایی اثرات خفیف رادیولوژیکی دارد اما تحرک‌پذیری زیاد و همیشگی بودن این گاز، وجود دختران آلفازا با نیمه عمر کوتاه باعث می‌شود که سهم به‌سزایی در پرتوگیری انسان داشته باشد. مهم‌ترین محصولات واپاشی رادن یعنی پلونیم-۲۱۸، سرب-۲۱۴، بیسموت-۲۱۴ و پلونیم-۲۱۴، با نیمه عمرهای متوسط از نظر شیمیایی و فیزیکی فعال هستند و چرخه حیاتشان در محیط زیست متغیر و پیچیده است.

عمده‌ترین خطرات ناشی از حوضچه‌های باطله پرتوگیری خارجی و داخلی، مواد تشکیل‌دهنده آن و رادیونوکلیدهای آن است. پرتوگیری داخلی ناشی از تنفس گازهای خروجی از حوضچه و خاک و نیز آشامیدن آب‌های آلوده منطقه است. برای رفع این مشکل، باید تمام فرایندهای مهم و مواد تولید شده، منشا آنها (طبیعی یا مصنوعی)، احتمال وقوع آن در حوضچه شناسایی و آثار آنها بر کلیت برنامه پسمانداری حوضچه باطله بررسی شود.

یکی از برنامه‌های مدیریت پسماندهای پرتوزا، تثبیت بلند مدت و مناسب پسماندها برای کاهش اثرات پرتوزی آنها است. عموما احداث پوشش متشکل از مواد مناسب یکی از روش‌های پذیرفته و تایید شده برای رسیدن به این هدف است. بنابراین تعیین دقیق ویژگی‌های تضعیف (کاهش) رادن در مواد پوشش و سیستم طراحی شده برای سد رادن، از اهمیت قابل توجهی برخوردار است. جابجایی رادن از خاک فرایند پیچیده‌ای است که توزیع رادیم، منافذ خاک و رطوبت هوا در این میان بیشترین تاثیر را بر کارآمدی مواد پوشش برای کاهش یا حذف رادن دارد. آهنگ تولید رادن در واحد حجم پسماند به طور مستقیم به ثابت واپاشی رادن، ضریب رهایش، غلظت پرتوزایی رادیم در پسماند و چگالی حجمی آن بستگی دارد.

محاسبات مرتبط، با تعیین ضخامت بهینه لایه‌های پوشش برای کاهش رادن به حد مجاز، عموما از نظریه پخش تبعیت می‌کند. کارآمدی مواد به‌کار رفته در لایه‌های پوشش، به توانایی آنها برای محدود کردن جابجایی رادن تا پیش از واپاشی به ایزوتوپ‌های جامد خود، بستگی دارد، تا با گیر افتادن دختران جامد رادن در شبکه مواد پوشش، انتشار آن به سطح کاهش یابد. ضریب پخش یکی از مهمترین پارامترهای جابجایی رادن در خاک است. اندازه‌گیری شار خروجی رادن از خاک پسماندگاه‌ها ضمن اینکه از نظر برنامه‌های پایش کوتاه مدت و بلند مدت ایمنی پسماندگاه اهمیت دارد، اغلب برای تامین پارامترهای ورودی برای مدلسازی پخش رادن به جو، به منظور ارزیابی اثرات پرتویی، الزامی است علاوه بر اینکه برای بررسی هرگونه اقدامات اصلاحی لازم است.

در این پژوهش، مدل طراحی سد رادن و کارآمدی آن برای کاهش رادن در نمونه مدل‌سازی شده حوضچه باطله اورانیم، از دو جنبه نظری و عملی برآورد می‌شود. با مشخصه‌یابی مواد مختلف (ضریب پخش، ضخامت، تخلخل) و اطلاعات خاک‌های مختلف، نخست مدلی از سد رادن طراحی و بر اساس آن دستگاهی ساخته شد. سپس با انجام آزمایش‌های اندازه‌گیری شار رادن خروجی از خاک، ضمن تایید پاسخ تحلیلی معادلات نظری شار رادن مبتنی بر قانون فیک و تطبیق نتایج محاسباتی با نتایج تجربی، مدلی قابل تعمیم برای طراحی بهینه سد رادن در شرایط واقعی، با توجه به منابع و استانداردهای موجود در ایران محقق شد.

۲. معادلات نظری جابجایی رادن در خاک

معادله کلی پخش رادن در محیط به صورت زیر است

$$\frac{\partial C}{\partial t} = S' - D\nabla \cdot J - \lambda C \qquad (۱)$$

که سمت چپ معادله نشان‌دهنده تغییرات غلظت با زمان و در جملات سمت راست معادله، S' چشمه رادن بر حسب $pCi.m^{-3}$، C غلظت رادن بر حسب $pCi.m^{-3}$، λ ثابت واپاشی رادن بر حسب s^{-1} و $\nabla \cdot J$ نشت رادن از حجم کوچک در فضایی متخلخل یا گرادیان شار رادن بر حسب $pCi.m^{-2}.s^{-1}$ است. پاسخ تحلیلی این معادله را می‌توان در حالت‌های مختلف، وابسته به زمان و حالت پایا بدست آورد. فرض می‌شود که شار مطابق قانون فیک متناسب با گرادیان غلظت است:

$$J(x) = -D_e \frac{dC}{dx} \qquad (۲)$$

که $J(x)$ شار رادن در ماده پوشش برحسب پیکوکوری بر مترمربع در ثانیه، D_e ضریب پخش موثر بر حسب سانتیمتر مربع بر ثانیه است. پاسخ کلی معادله (۱) به صورت زیر است:

$$C(x) = Ae^{bx} + Be^{-bx} + S \qquad (۳)$$

که در آن $S = S'/D_e$ و $b = (\lambda p / D_e)^{1/2}$. از معادله (۲)، طبق قانون اول فیک، شار رادن با معادله زیر تعیین می‌شود

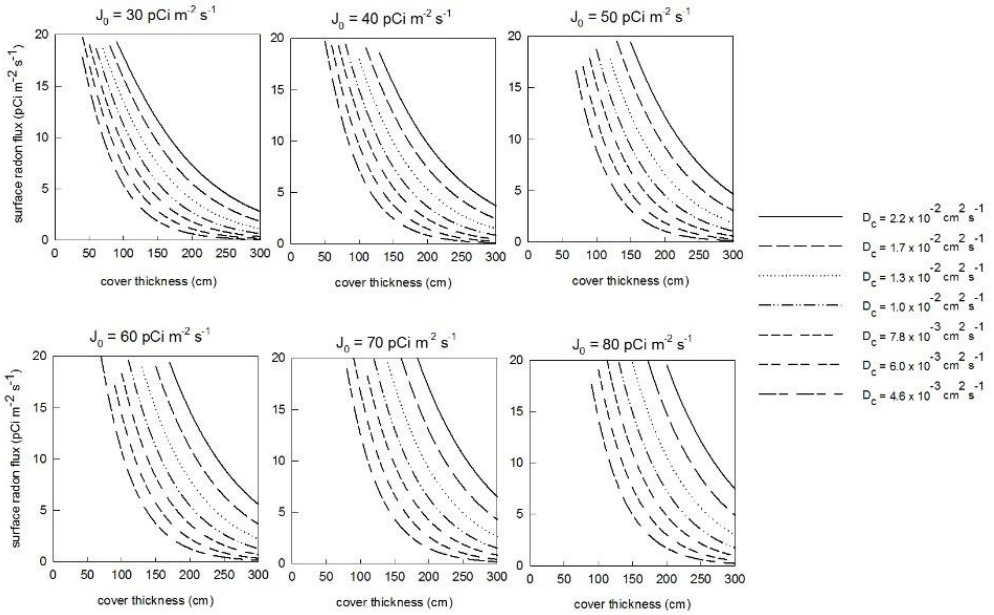
$$J(x) = -D_e b[Ae^{bx} - Be^{-bx}] \qquad (۴)$$

شرایط مرزی برای تعیین ضرایب A و B عبارتست از: (۱) شار رادن در ورودی محفظه دستگاه صفر است، (۲) غلظت رادن در سطح مشترک لایه‌های پوشش پیوسته است، (۳) شار رادن در سطوح مشترک برابر است و (۴) غلظت رادن در آخرین لایه صفر (یا مقدار تعریف شده حد مجاز) است. با استفاده از شرایط مرزی، پاسخ‌های تحلیلی برای پروفایل غلظت رادن و چگالی شار رادن خروجی از خاک به ضخامت h از معادلات زیر بدست می‌آیند:

$$C(x) = S_0 \left[1 - \frac{\cosh(bx)}{\cosh(h - x)} \right] \qquad (۵)$$

$$J(x) = \frac{bD_e S_0}{\cosh(bx)\ [D_e b\ \tanh(bx)\ \tanh(bh) - 1]} \qquad (۶)$$

شکل ۱، شار رادن بر حسب ضخامت خاک یا پسماند را به ازای مقادیر مختلف شار خروجی چشمه رادن و ضرایب پخش نشان می‌دهد. در کل وجود چشمه رادن (مواد حوضچه باطله) ضخیم در معادلات شار رادن لازم نیست. در معادله (۵) فرض بر این است که شار رادن از لایه‌های سطحی خاک، رهایش می‌شود. این فرض در شرایط واقعی نیز برقرار است که در آن عمده شار خروجی رادن از خاک یا حوضچه باطله بدون پوشش، ناشی از لایه‌های سطحی است. همانگونه که در معادله (۶) دیده می‌شود شار رادن به ویژه در مقادیر پایین ضریب پخش بیشتر تحت تاثیر واپاشی رادن است. همچنین به خوبی دیده می شود که شار رادن عمدتا از لایه های سطحی سد باطله خارج می‌شود و در نتیجه توصیه می‌شود پسماندگاه‌ها و در نتیجه پوشش آنها با عمق زیاد و مساحت کمتر طراحی شوند.



شکل ۱. نمودار تغییرات شار رادن برحسب ضخامت خاک برای مقادیر مختلف ضریب پخش و شار اولیه رادن چشمه حاصل از معادله (۶).

۳. طراحی دستگاه برای مدلسازی سد رادن

پس از به‌دست آوردن پاسخ‌های تحلیلی برای غلظت و شار رادن، بر اساس نتایج اولیه بدست آمده از مدلسازی پخش رادن در مواد مختلف، دستگاهی برای انجام آزمایش‌های اندازه‌گیری شار رادن و ضرایب پخش آن، به منظور اعتبارسنجی مدل نظری و روش عملی پیشنهادی صورت گرفت. طراحی محفظه به گونه‌ای انجام شد که ضمن ایزوله بودن از محیط اطراف جهت جلوگیری از نشت رادن به محیط، بتوان روش‌های استاندارد اندازه‌گیری شار خروجی رادن از پوشش را در آن به‌خوبی انجام داد و همچنین معیارهای حوضچه باطله نیز رعایت شود. از طرف دیگر ابعاد (ضخامت) لایه خاک حاوی رادن و لایه‌های پوشش باید به گونه‌ای باشد که نتایج مدل طراحی شده به واقعیت نزدیک و قابل تعمیم به مدل اصلی باشد. از آنجایی که ابعاد دستگاه، جنس و پیکربندی آن در حصول نتایج قابل قبول و مطمئن اهمیت دارند، باید چندین عامل و متغیر را در طراحی در نظر گرفت که از مهمترین آنها می‌توان به این موارد اشاره کرد: هیچ پسماند پرتوزا تولید نشود، عدم واکنش محفظه با خاک حاوی رادن و خاک‌های پوشش، قابلیت شبیه‌سازی نفوذ رادن در خاک در مقیاس واقعی، ابعاد مناسب برای تعمیم نتایج و داده‌های بدست آمده از نمونه پیش الگو به نمونه واقعی، هیچ گونه نشتی و آزادسازی رادن به محیط اطراف نداشته باشد.

محفظه دستگاه از جنس پلکسی گلاس معمولی تهیه گردید. طراحی نهایی این محفظه در شکل ۲ دیده می‌شود. کفی محفظه از جنس پلی اتیلین، به گونه‌ای طراحی شده است که چشمه رادن (پودر حاوی رادیم) به‌طور آب‌بندی شده به آن متصل شود. این طراحی دارای مزیت‌هایی است: (۱) از مواد باطله با توجه به مشکلات پسمانداری آن برای انجام آزمایش استفاده نمی‌شود، (۲) محفظه و لایه های خاک مورد استفاده برای پوشش، آلودگی پرتوزا نمی شوند و می‌توانند دوباره مورد استفاده قرار گیرند. به این ترتیب هم از آلوده شدن خاک جلوگیری می شود و هم پسماند جامد تولید نمی‌شود، (۳) نحوه اتصال چشمه رادن به محفظه دستگاه، به‌گونه‌ای است که از ورود خاک به درون چشمه جلوگیری می‌کند و به این ترتیب همانند پسماندگاه در شرایط واقعی، میزان پرتوزایی و ترکیبات چشمه بدون تغییر باقی می‌ماند. درپوش محفظه نیز از جنس پلی اتیلن، دارای اورینگ مناسب به منظور آب‌بند کردن بهتر محفظه طراحی شده است. یک دستگاه فن کوچک، زیر این درپوش تعبیه شده است تا از یکنواخت بودن هوای داخل محفظه، اطمینان حاصل شود. بر روی لوله پلکسی گلاس، ورودی و خروجی‌های کاملا آب‌بند تعبیه شده تا بتوان براحتی از هوای بالای محفظه، نمونه‌برداری نمود.

شکل ۲. دستگاه طراحی و ساخته شده برای اندازه‌گیری شار رادن و چیدمان آزمایش.

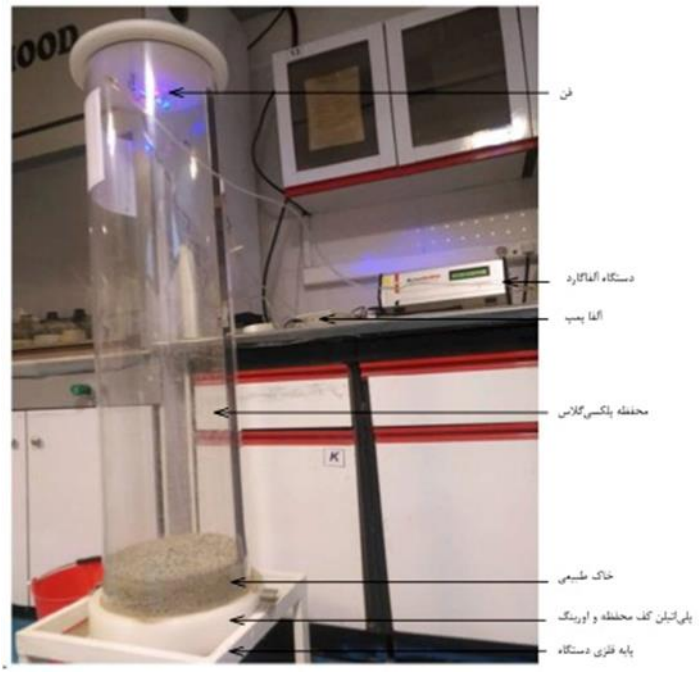
۴. اندازه‌گیری شار رادن

یکی از روش‌های بسیار رایج در اندازه‌گیری شار رادن، روش پایش لحظه‌ای غلظت رادن است که در آن، از یک انباشتگر متصل به آشکارسازهای در دسترس و متداول نظیر اتاقک یونش، آشکارسازهای نیمه رسانا و سوسوزن استفاده می شود. این روش برای اندازه‌گیری میدانی غلظت رادن در موقعیت مورد نظر و برحسب زمان، از دقت و کارایی خوبی برخوردار است.

در شرایط واقعی که سیستم در حالت غیر پایا است و زمان‌های اندازه‌گیری نیز در مقایسه با زمان رسیدن سیستم به حالت تعادل پایدار، کوتاه و از مرتبه چندین دقیقه تا چند روز است، باید تغییرات زمانی غلطت در هر مکان، مورد مطالعه قرار گیرد. پاسخ زمانی برای تغییرات غلظت رادن انباشت شده در انباشتگر بر حسب زمان از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$C(t)=\frac{JA}{\lambda_e V}(1-e^{-\lambda_e t}) \qquad (۷)$$

که در آن J شار رادن، V حجم موثر انباشتگر، A سطح مقطع انباشتگر و $\lambda_e=\lambda+\lambda_v+\lambda_b$ ثابت زمانی موثر برای سیستم اندازه‌گیری است. این ثابت زمانی مجموع ثابت واپاشی رادن، آهنگ نشت رادن از انباشتگر (در صورت وجود) و آهنگ پخش معکوس رادن (آهنگ جابجایی رادن بین هوا وخاک) است که به پارامترهای سیستم یعنی ویژگی‌های مواد، لایه‌های خاک (تخلخل و طول پخش رادن در مواد) و هندسه انباشتگر بستگی دارد. با اندازه‌گیری تغییرات زمانی غلظت رادن و برازش داده‌ها به معادله (۷)، ثابت زمانی موثر و شار رادن به‌دست می‌آید. با توجه به محاسبات عددی صورت گرفته، مقدار زمانی موثر ۳۰-۲۰ برابر ثابت زمانی واپاشی رادن بدست آمد. این روش اندازه‌گیری شار رادن، که مبتنی بر اندازه‌گیری غلظت در زمان‌های کوتاه تجمع رادن در اتاقک انباشتگر است، برای حوضچه‌های باطله اورانیم بکار می‌روند، زیرا غلظت مورد انتظار در حالت تعادل برای رادن در انباشتگر بسیار بیشتر از خاک طبیعی است. زمان اندازه‌گیری باید به اندازه‌ای باشد که پخش معکوس رادن، مقدار قابل ملاحظه‌ای نداشته باشد.



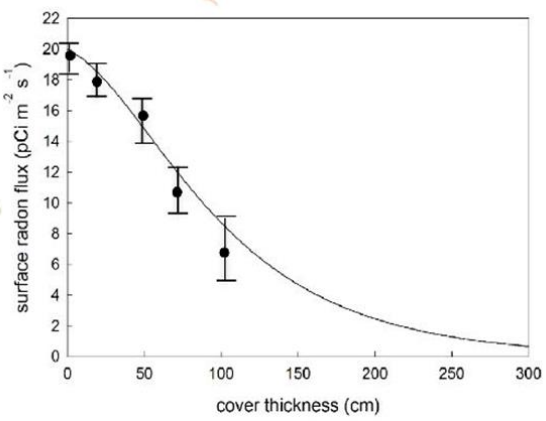
شکل ۳. پیکربندی آزمایش‌های طراحی شده برای اندازه‌گیری شار رادن به روش پخش کوتاه مدت شامل دستگاه ساخته شده، دستگاه آلفاگارد، آلفا پمپ.

تجهیزات آزمایش مطابق با مدل طراحی شده، برای انجام آزمایش‌های اندازه‌گیری شار خروجی رادن برپا گردید. برای اندازه‌گیری غلظت رادن، از دستگاه آلفاگارد شرکت سافیمو آلمان به همراه آلفاپمپ، فیلتر جاذب دختران رادن و فیلتر جاذب رطوبت استفاده شد [۴]. نحوه اتصال تجهیزات به صورت بسته انجام شد و به گونه‌ای بود که کمترین فاصله بین دستگاه آلفاگارد و محفظه وجود داشته باشد تا مقدار هوای داخل لوله‌های اتصال به حداقل ممکن برسد. آلفاگارد در مد جریانی با بازه زمانی ۱۰ دقیقه، برای ثبت غلظت رادن تنظیم شد. چیدمان دستگاه و آزمایش‌های اندازه‌گیری شار رادن در شکل ۳ نشان داده شده است.

در این آزمایش‌ها از پودر حاوی رادیم، به عنوان چشمه رادن استفاده شد. ظرف حاوی پودر، مطابق چیدمان آزمایش در زیر ستون، از طریق درگاه تعبیه شده به صورت کاملا آب‌بندی قرار می‌گیرد؛ تا از هرگونه نشت مواد رادیواکتیو جلوگیری شود (شکل ۴). سپس به منظور یکنواخت کردن رادن خروجی از آن در کل سطح مقطع ستون، یک لایه خاک شنی-ماسه‌ای به ضخامت ۸ سانتیمتر قرار می‌گیرد. ویژگی‌های این خاک و ضخامت آن، به گونه‌ای انتخاب و طراحی شده است که بیشترین شباهت به مواد و اندازه حوضچه باطله را داشته باشد (شکل ۳). در آغاز هر اندازه‌گیری ابتدا درپوش محفظه گذاشته و کاملا آب‌بندی می‌شود تا نشت رادن از سیستم به حداقل ممکن برسد.. همزمان دستگاه آلفاگارد شروع به کار می‌کند و در بازه‌های ده دقیقه، مقدار اندازه‌گیری‌شده غلظت رادن توسط آلفاگارد، به همراه پارامترهای محیطی فشار، دما، رطوبت و دمای هوا ثبت می‌شود. کل زمان اندازه‌گیری نباید زیاد باشد تا باعث ایجاد جریان شعاعی رادن به سمت دیواره محفظه شود. این مورد در حوضچه‌های باطله نیز دیده شده است. از طرفی، زمان باید آنقدر کوتاه باشد تا پخش معکوس رادن در سیستم نداشته باشیم. با ارزیابی‌های انجام شده، بهترین زمان حدود دو ساعت برآورده شد، که این زمان برای نمونه‌برداری‌های از حوضچه‌های باطله نیز گزارش شده است[۳ و ۵]. پس از پایان هر اندازه‌گیری، درپوش ستون برداشته می‌شود تا شرایط به حالت واقعی در حوضچه‌های باطله نزدیک باشد. در غیر این صورت، پدیده پخش معکوس به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد و اندازه گیری‌ها با خطای بسیار همراه خواهد بود. شکل ۴، نمای نزدیک از چشمه رادن (پودر حاوی رادیم) و نحوه اتصال آن به محفظه آزمایش دستگاه را نشان می‌دهد.

شکل ۴. چشمه رادن مورد استفاده و محل قرارگیری آن نسبت به محفظه دستگاه اندازه‌گیری شار رادن به روش پخش کوتاه مدت.

پس از اینکه سیستم به حالت پایدار رسید، مقادیر غلظت رادن در ۲ ساعت و در بازه‌های زمانی ۱۰ دقیقه توسط آلفاگارد اندازه‌گیری و ثبت شدند. مقادیر اندازه‌گیری‌شده شار رادن و تابع تحلیلی رابطه (۶) برازش شده به داده‌های تجربی، در نمودار شکل ۵ رسم شده است. خطای اندازه‌گیری‌های غلظت با توجه به ملاحظات صورت گرفته (طراحی مناسب دستگاه، روش انتخابی و زمان و بازه‌های اندازه‌گیری) حدود ۱۱٪ بود. به این ترتیب با رسم نمودار شار برحسب ضخامت، و برازش داده‌ها به معادله (۶)، مقدار شار رادن چشمه، ضریب پخش رادن و ضخامت بهینه لایه (لایه‌های) پوشش به‌دست می‌آید. برای کاهش شار خروجی رادن از حوضچه باطله، به مقدار مجاز و به ازای پارامترهای معمول برای پسماند، حدود ۱۷۰ سانتیمتر پوشش لازم است [۵]. از نمودار شکل ۵ مشاهده می‌شود که برای کاهش شار خروجی رادن در مدل آزمایشگاهی طراحی شده، به میزان یک ششم مقدار اولیه، حدود ۱۸۰ سانتیمتر از همان پوشش باید استفاده شود. این مقایسه به خوبی نشان می‌دهد که نوع و ضخامت انتخاب شده برای لایه خاک حاوی رادن، به الگوی یک حوضچه باطله اورانیم بسیار نزدیک است؛ زیرا همانگونه که پیش از این اشاره شد، شار خروجی رادن عمدتا ناشی از لایه‌های سطحی حوضچه باطله است.



شکل ۵. تغییرات شار اندازه‌گیری شده رادن از لایه‌های پوشش به روش پخش کوتاه مدت.

۵. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، رهایش رادن از خاک حاوی چشمه رادن پیش و پس از اجرای پوشش، با استفاده از نظریه پخش به صورت نظری و تجربی برآورد و اعتبارسنجی شد. نخست با استفاده از مدل پخش یک بعدی، پاسخ‌های تحلیلی برای محاسبه شار خروجی رادن از هر لایه پوشش و ضخامت لایه (لایه‌های) پوشش رادن از معادلات بدست آمد. چندین پوشش از مواد مختلف با پارامترهای مختلف (ضریب پخش، ضریب تخلخل، رطوبت) مدل‌سازی شد. با توجه به نتایج مدل‌سازی، دستگاهی بصورت کاملا آب‌بندی شده برای انجام آزمایش‌ها طراحی و ساخته شد، بگونه‌ای که ضمن رعایت

تمامی استانداردهای حفاظت پرتوی، امکان استفاده از چشمه رادن موجود در پژوهشکده را در هر زمان و بنا به نیاز فراهم می‌آورد که خود موجب عدم تولید پسماند و آلوده شدن مواد می‌شود. در مرحله بعد با انجام اندازه‌گیری‌های متعدد و متوالی، روش بهینه و معادلات اندازه‌گیری شار رادن خروجی از پوشش تعیین گردید. نتایج عملی نشان دادند که نوع خاک و ضخامت انتخابی برای انتشار رادن از چشمه رادیم در مدل آزمایشگاهی، طراحی شده و روش اندازه‌گیری بکار رفته، با شرایط پسماندهای یک حوضچه باطله با دقت خوبی قابل قیاس است. همچنین بررسی و تحلیل نتایج نشان دادند که مدل پخش یک بعدی از دقت کافی (حدود ۱۱٪) برای به‌کارگیری در حوضچه‌های باطله برخوردار است. نتایج حاصل از آزمایش‌های اندازه‌گیری شار رادن با مدل آزمایشگاهی به‌کار رفته در این پژوهش، نشان دادند که روش تجربی به‌کار رفته در این پژوهش، برای اندازه‌گیری شار رادن خروجی از پوشش خاک انتخابی، از نظر عملی برای پایش کوتاه مدت شار خروجی رادن از یک حوضچه باطله، قابل به‌کارگیری و اطمینان است.

۶. مراجع

1. International Atomic Energy Organization, The long-term stabilization of uranium mill tailings, TECDOC-1403, IAEA, Vienna, 2004.
2. Ishimori Y., et. al., Calculation and measurement of radon from NORM residues, TRS-474, IAEA, Vienna, 2013.
3. Rogers V.C., Nielson K.K. and Kakwarf D.R. Radon attenuation handbook for uranium mill tailings cover design, NUREG/CR-3533, USNRC, 1984.
4. AlphaGUARD portable radon monitor: User manual, SaphymoGMBH, Frankfurt, Germany, 2012.
5. Altic N.A., Technical bases and guidance for radon flux monitoring at uranium mill tailing sites, Tech. Rep. RFTA11-010, Oak Ridge, 2011.