

## اندازه‌گیری آهنگ انتشار سطحی رادون از مصالح ساختمانی منطقه مشهد-خراسان

زینب خانیکی\*، سعید محمدی و سید محمد ذبیحین پور

گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه پیام‌نور، تهران، ایران.

\*تهران، دانشگاه پیام‌نور، دانشکده علوم پایه، گروه فیزیک، صندوق پستی ۳۶۹۷-۱۹۳۹۵.

پست الکترونیکی: khaniki.z@student.pnu.ac.ir

### چکیده

انتشار گاز رادون از خاک، آب و مصالح ساختمانی در محیط‌های بسته باعث قرارگیری ساکنین در معرض این گاز رادیواکتیو می‌شود. اگرچه بشر از مصالح ساختمانی به‌عنوان محافظ در برابر تشعشعات طبیعی فضای باز (زمینی و کیهانی) استفاده می‌کند، لیکن ترکیب‌های رادیونوکلئیدی منتشر شده از برخی مصالح ساختمانی به‌کاررفته در ساختمان‌ها، باعث افزایش غلظت رادون داخلی می‌شود؛ بنابراین اندازه‌گیری میزان انتشار رادون از مصالح ساختمانی، از منظر بهداشت عمومی اهمیت فراوانی دارد. همچنین با این‌که رادون مهم‌ترین عامل و منبع پرتوگیری طبیعی است و سطح بالای غلظت آن در هوای داخلی محیط‌های بسته می‌تواند خطری قابل‌توجه برای سلامتی ایجاد کند، لیکن دختر هسته‌های اصلی رادون،  $^{214}\text{Po}$  و  $^{218}\text{Po}$  نیز نقش به‌سزایی در بروز سرطان ریه در انسان دارند. در حال حاضر، توجه به میزان انتشار رادون از مصالح ساختمانی و ارزیابی و کنترل غلظت رادون در محیط‌های داخلی، اهمیت ویژه‌ای دارد. در این پژوهش، ضریب انتشار سطحی رادون از سه نمونه مصالح ساختمانی پرکاربرد در منطقه خراسان با به‌کارگیری روش فعال و استفاده از محفظه بسته و دستگاه رادون سنج Sarad-RTM۱۶۸۹ اندازه‌گیری و محاسبه گردید. نتایج به‌دست‌آمده برای آهنگ انتشار سطحی گاز رادون در این نمونه‌ها، از محدوده مقادیر ناچیز غیرقابل تشخیص تا  $1/95 \text{ Bq m}^{-2} \text{ h}^{-1}$  متغیر است که بیشترین آن در نمونه سنگ‌های گرانیتی و کمترین آن در نمونه آجر سفالی اندازه‌گیری گردید. نتایج این پژوهش می‌تواند کمک مؤثری در انتخاب مصالح ساختمانی مناسب برای محیط داخلی امن ساکنین پیشنهاد دهد.

کلیدواژه‌گان: رادون، انتشار سطحی، غلظت داخلی، مصالح ساختمانی.

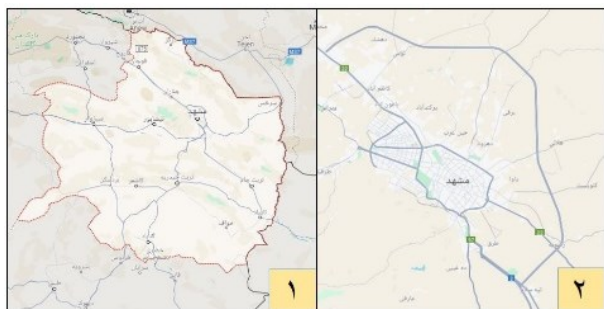
### ۱. مقدمه

غلظت بالای گاز رادون دارد [۱]. بنابراین برای پیشگیری و کاهش این عوارض، کنترل آهنگ انتشار رادون حاصل از مصالح ساختمانی ضروری است [۲].

گاز رادون پس از واپاشی از هسته رادیوم ( $^{226}\text{Ra}$ ) و باتوجه‌به دانه‌بندی و اندازه منافذ یا شکاف‌های ریز موجود در مصالح ساختمانی از آن‌ها آزاد و در محیط پخش می‌گردد [۳].

از دیدگاه رادیولوژی سبک زندگی جدید و فعلی بشر که گاهی مانند دوران همه‌گیری بیماری کرونا، همراه با شرایط قرنطینه یا ایزوله است، می‌تواند خطر قرارگرفتن در معرض تابش‌های طبیعی را افزایش داده و در نتیجه احتمال ابتلا به سرطان ریه افزایش یابد. طبق گزارش سازمان بهداشت جهانی (WHO)، ۳ تا ۱۴ درصد از مرگ و میرهای ناشی از سرطان ریه، ارتباط مستقیم با قرارگیری و سکونت طولانی مدت در محیط‌هایی با

کاربرد بسیار زیاد آنها در اغلب بناهای در حال ساخت بود. برای کسب داده‌های قابل اعتماد، سعی بر انتخاب نمونه‌ها از مواد خالص گردید. نمونه‌ها یک شب در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد برای خروج آب از منافذ آنها، در آون خشک شدند. بلوک بتنی اغلب در دیوارهای خارجی، آجر سفال در دیوار-چینی داخلی، نمونه‌های استوانه‌ای بتنی (با ترکیبی از شن، آهک، سیمان و آب، با چگالی بین ۱۰۱۸ تا ۱۶۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب) در فونداسیون و ستون‌ها و سنگ گرانیت در کف ساختمان استفاده می‌شوند. این مصالح به طور تصادفی از فروشگاه‌های مصالح ساختمانی و ساختمان‌های در حال ساخت انتخاب گردیدند.



شکل (۱): نقشه استان خراسان رضوی (نشان گر ۱) و شهر مشهد (نشان گر ۲)، برگرفته از نقشه گوگل.



شکل (۲): مصالح ساختمانی انتخاب شده: بلوک‌های بتنی، نمونه استوانه‌های بتنی، آجر سفال و سنگ‌های گرانیتی.

اندازه‌گیری رادون و تورون و محصولات تلاشی آن همواره بر اساس آشکارسازی نوع پرتوی آلفا، بتا و یا گامایی است که از آنها گسیل می‌شود. تمامی این پرتوها در برخورد با ماده موجب آثار گوناگونی مانند نقص‌های موضعی، جریان‌ها و یا پالس‌های

اگرچه، رد و اثر ( $^{226}\text{Ra}$ ) را می‌توان در مصالح ساختمانی پیدا نمود، ولی محاسبه آهنگ انتشار رادون به سادگی از فعالیت غلظت ( $^{226}\text{Ra}$ ) امکان‌پذیر نیست [۴]. بنابراین، اندازه‌گیری دقیق آهنگ انتشار رادون به منظور برآورد خطر رادیولوژیک مرتبط با مصالح ساختمانی، لازم به نظر می‌رسد.

به‌طور خاص، مصالح ساختمانی با منشأ ماگمایی (مواد مذاب زیر پوسته کره زمین) مانند گرانیت‌ها به‌عنوان منابع مهم رادون طبقه‌بندی می‌شوند [۵-۸].

باتوجه به این‌که قوانین اخیر در ساخت ساختمان‌های مسکونی، تجاری و صنعتی در کشور ما نیز مانند سایر نقاط دنیا، توجه ویژه‌ای به مبحث صرفه‌جویی انرژی و کارآمدی حرارتی داشته، در نتیجه با کاهش آهنگ تهویه هوا، غلظت رادون داخلی افزایش می‌یابد [۹]. اگرچه پژوهش‌های متعددی در سایر نقاط جهان و همچنین برخی از مناطق ایران به منظور اندازه‌گیری آهنگ انتشار سطحی رادون از سنگ‌ها و مصالح ساختمانی در محیط‌های داخلی انجام گردیده است ولی گزارش‌های رسمی و مبسوط کمی مبنی بر نظارت بر رادون و آهنگ انتشار مربوط به آن از مصالح ساختمانی در منطقه خراسان رضوی در دسترس است [۱۰-۱۹]. بنابراین هدف اصلی از انجام این پژوهش، اندازه‌گیری و ارزیابی آهنگ انتشار سطحی رادون از مصالح ساختمانی متداول مورد استفاده در منطقه مسکونی شهر مشهد با بررسی دامنه وسیعی از نمونه‌های ساختمانی مورد نظر، به‌منظور استفاده در سیاست‌گذاری‌ها و دستورالعمل‌های ساخت و ساز بناهای مسکونی در منطقه مورد مطالعه است. در شکل ۱ موقعیت منطقه خراسان رضوی و مشهد در شمال شرق کشور نشان داده شده است.

## ۲. مواد و روش‌ها

مصالح ساختمانی مورد بررسی شامل نمونه‌های بتنی، سنگ گرانیت و آجر سفالی بودند (شکل ۲). دلیل انتخاب این مصالح،

اندازه‌گیری غلظت رادون با استفاده از آشکارساز آلفای حالت جامد RTM1689 ساخته شده در شرکت آلمانی ساراد انجام گردید (شکل ۳). حجم داخلی اتاقک تقریباً ۰/۱۲۰۰ متر مکعب بود. حجم سلول داخلی RTM1689، لوله‌ها و حجم ابزارهای مرتبط با اندازه‌گیری در حدود ۰/۰۰۲۰ متر مکعب بود. حجم آزاد محفظه  $V_n$  با توجه به حجم نمونه متفاوت بود. این مقادیر را می‌توان از ۰/۱۰۰۰ متر مکعب تا ۰/۱۱۴۰ متر مکعب در نظر گرفت.



شکل (۳): محفظه اندازه‌گیری، دستگاه RTM1689 و نمونه‌های درون محفظه بسته جهت اندازه‌گیری غلظت رادون.

## ۱.۲. تجمع رادون

پس از این‌که نمونه به‌خوبی درون محفظه عایق‌بندی گردید، غلظت گاز رادون منتشر شده از نمونه در داخل محفظه بسته اندازه‌گیری می‌شود. منحنی غلظت رادون که معمولاً بر حسب  $Bqm^{-3}$  داده می‌شود، به‌صورت صعودی تا زمانی که به غلظت تعادلی تمایل پیدا کند، افزایش می‌یابد [۲۰] (به شکل ۴ مراجعه کنید). حالت تعادلی هنگامی رخ می‌دهد که آهنگ تولید و انتشار گاز رادون با آهنگ از بین رفتن رادون به علت واپاشی طبیعی، تهویه و انتشار برگشتی برابر باشد. زمان لازم برای رسیدن به غلظت تعادلی به نوع ماده و شرایط آزمون بستگی دارد، که برای نمونه‌های مورد بررسی در پژوهش حاضر در حدود دو هفته طول کشید. با اطمینان از ثابت بودن پارامترهای محیطی (دما، رطوبت و فشار)، افزایش  $C_{Rn}$  را می‌توان به صورت زیر توصیف کرد:

$$\frac{\partial C_{Rn}}{\partial t} = -\lambda_e C_{Rn} + \frac{EA}{V_n} + \lambda_n C_{Bg} \quad (1)$$

الکتریکی می‌گردند؛ بنابراین برای ثبت این آثار از ابزار و روش‌های مختلفی می‌توان استفاده نمود. از پرکاربردترین این روش‌ها، روش محفظه بسته است که در این روش با گذر و ارزیابی هوای محبوس بالای سطح نمونه موردنظر از آشکارساز در طی دوره زمانی مشخص، کمیت موردنظر را می‌توان اندازه‌گیری نمود [۲۴-۲۰]. از جمله روش‌های دیگر، روش محفظه باز است که در این روش شرایط محیطی و تأثیر آن بر ارزیابی قابل‌کنترل است [۲۶، ۲۵]. باتوجه‌به مشخصات ایزوتوپ موردنظر و توان تفکیک زمانی دستگاه‌های در دسترس، روش‌های دیگری نیز از جمله روش نمونه پوششی برای تعیین غلظت فعالیت رادیوم ( $^{226}Ra$ ) قابل‌استفاده است [۲۷]. در میان این روش‌ها، در این پژوهش از اولین مورد که دارای بیشترین استفاده و توصیه است، استفاده گردید، زیرا در روش محفظه بسته امکان کنترل پارامترهای محیطی (مانند رطوبت، فشار و دما) و همچنین پارامترهای ذاتی مجموعه آزمایشی (از جمله آهنگ نشت، آهنگ انتشار برگشتی و تابش پس‌زمینه طبیعی) فراهم است [۲۸].

تنظیمات آزمون و نحوه قرارگیری تجهیزات درون محفظه بسته، در شکل ۳ مشخص و نشان داده شده است. محفظه بسته از شش ورق شیشه بی‌رنگ که دارای سطح مقطع  $30 \times 80$  سانتی‌متر مربع و ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر و ضخامت ۱ سانتی‌متر هستند، ساخته شده است. که برای چسباندن آن‌ها، از چسب سیلیکون ضد آب استفاده شده و گوشه‌های آن با چسب مخصوصی آب‌بندی شده‌اند. (که به طور قابل توجهی نشتی را کاهش می‌دهد).

درزبندی محفظه، با پر کردن آن با آب، و عدم مشاهده نشت آب یا رطوبت در اطراف محفظه و یا در امتداد مفاصل پس از گذشت ۳ روز، امتحان گردید.

شکل ۴، منحنی تجربی تغییرات غلظت رادون را برای یک نمونه بتنی استوانه‌ای نشان می‌دهد.  $C_{eq}$  با توجه به داده‌های تجربی و  $\lambda_e$  با جاگذاری داده‌های تجربی در رابطه (۵) محاسبه گردید. از مجموعه داده‌های مربوط به نمونه استوانه بتنی و با توجه به روش فوق، مقادیر  $C_{eq}$  و  $\lambda_e$  به صورت زیر برای این نمونه محاسبه گردید:

$$C_{eq} = (146 \pm 11) Bq m^{-3}$$

$$\lambda_e = (0.0195 \pm 0.0003) h^{-1}$$

## ۲.۲. نشت رادون

برای محاسبه ضرایب و داده‌های مرتبط با میزان نشت محفظه، چندین آزمایش مختلف انجام گردید. بدین منظور، محفظه با درب باز را در محیطی که غلظت زمینه رادون قابل توجه و مشخصی دارد، قرار داده و پس از اطمینان از همسان بودن غلظت رادون داخل و خارج محفظه، درب آن بسته شده و به‌خوبی در همین شرایط درزبندی گردید. اگر غلظت رادون داخل محفظه با  $C_{dec}$  نشان داده شود، برای تغییرات آن داریم [۲۱]:

$$\frac{\partial C_{dec}}{\partial t} = -\lambda_{Rn} C_{dec} - \lambda_L C_{dec} - \lambda_L C_{Bg} \quad (6)$$

$C_{Bg}$  کسری از غلظت رادون موجود در آزمایشگاه است که به دلیل نشت وارد محفظه می‌شود؛ بنابراین رابطه (۶) را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$C_{dec}(t) = C_0 e^{-\lambda_{dec} t} + \frac{\lambda_L}{\lambda_{dec}} C_{Bg} (1 - e^{-\lambda_{dec} t}) \quad (7)$$

در زمان  $t = 0$  غلظت رادون درون محفظه با غلظت اولیه برابر است. ضریب مؤثر فروپاشی طبق رابطه (۸) به دست می‌آید:

$$\lambda_{dec} = \lambda_{Rn} + \lambda_L \quad (8)$$

مقادیر بهینه ضریب آهنگ انتشار سطحی رادون ( $E$ ) و ضریب نشت محفظه ( $\lambda_L$ ) را می‌توان از مقایسه داده‌های تجربی با نمودار شبیه‌سازی رایانه‌ای سه‌بعدی تغییرات غلظت رادون در

$$\lambda_e = \lambda_{Rn} + \lambda_L + \lambda_{Bg} \quad (2)$$

که در آن،  $\lambda_e$  آهنگ مؤثر واپاشی که شامل واپاشی طبیعی رادون ( $\lambda_{Rn}$ )،  $\lambda_L$  میزان نشت محفظه،  $\lambda_{Bg}$  آهنگ انتشار برگشتی،  $A$  مساحت نمونه و  $E$  آهنگ انتشار گاز رادون است. همچنین  $C_{Bg}$  نشان‌دهنده سهم غلظت زمینه رادون ورودی به محفظه به علت نشت محفظه است. اگر حجم آزاد  $V_n$  از اتاق بسته حداقل ده برابر حجم نمونه باشد، رادون در خارج نمونه انباشته می‌شود و به نمونه بر نمی‌گردد، بنابراین اثر انتشار برگشتی را می‌توان نادیده گرفت [۳۰، ۲۹، ۲۶].

اگر در آغاز اندازه‌گیری ( $t = 0$ ) غلظت اولیه رادون برابر

$C_i$  باشد، رابطه (۱) به صورت زیر خواهد شد:

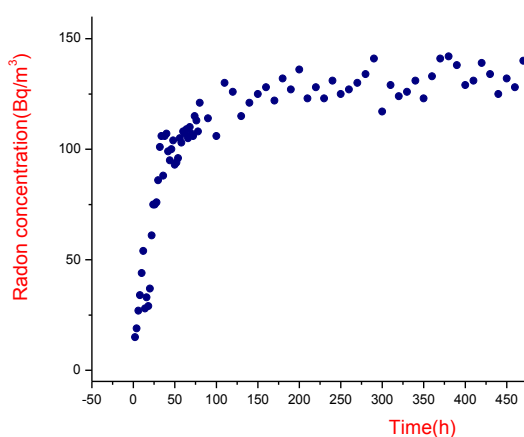
$$C_{Rn}(t) = C_i e^{-\lambda_e t} + \left( \frac{EA}{V_n \lambda_e} + \frac{\lambda_L C_{Bg}}{\lambda_e} \right) (1 - e^{-\lambda_e t}) \quad (3)$$

که پس از طی مدت زمان طولانی، رابطه  $C_{Rn}$  به صورت زیر به غلظت حالت تعادلی تبدیل خواهد شد:

$$C_{eq} \cong \frac{EA + \lambda_L C_{Bg} V_n}{V_n \lambda_e} \quad (4)$$

بنابراین، رابطه (۳) می‌تواند به صورت زیر نوشته شود:

$$C_{Rn}(t) = C_i e^{-\lambda_e t} + C_{eq} (1 - e^{-\lambda_e t}) \quad (5)$$



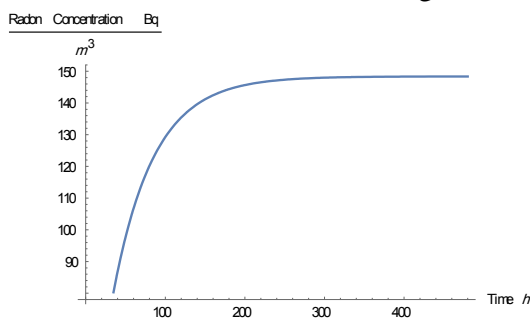
شکل (۴): منحنی تغییرات غلظت رادون به عنوان تابعی از زمان بر حسب داده‌های تجربی برای یک نمونه استوانه بتنی.

$$E_A = \frac{C_{eq}^* V_n \lambda R n}{A} \quad (9)$$

که پارامتر  $C_{eq}$  به صورت  $C^*$  در رابطه فوق، با توجه به کاهش غلظت رادون به دلیل نشتی (تهویه) محفظه، تصحیح شده است. برای حصول اطمینان از نتایج به دست آمده برای ضریب انتشار سطحی، می‌توان داده‌های به دست آمده برای ضرایب مختلف را در رابطه (۳) جایگذاری نموده و با بهره‌گیری از کدنویسی رایانه‌ای در نرم‌افزار متمتیکا، می‌توان در شرایط و زمان‌های مشابه آزمون تجربی برای ضرایب متفاوت انتشار سطحی، نمودار تغییرات غلظت رادون در محفظه با تغییر زمان را شبیه‌سازی کرد. تطابق این منحنی با منحنی تجربی، گواهی بر صحت داده‌ها خواهد بود. شکل ۶، نمونه‌ای از این منحنی شبیه‌سازی شده در شرایط مشابه آزمایش تجربی شکل ۴ است و تطابق آشکار آن‌ها، صحت ضریب انتشار سطحی رادون به دست آمده برای نمونه استوانه بتونی را نشان می‌دهد.

جدول ۱، مقادیر آهنگ انتشار سطحی رادون نمونه‌های مورد

مطالعه را نشان می‌دهد.



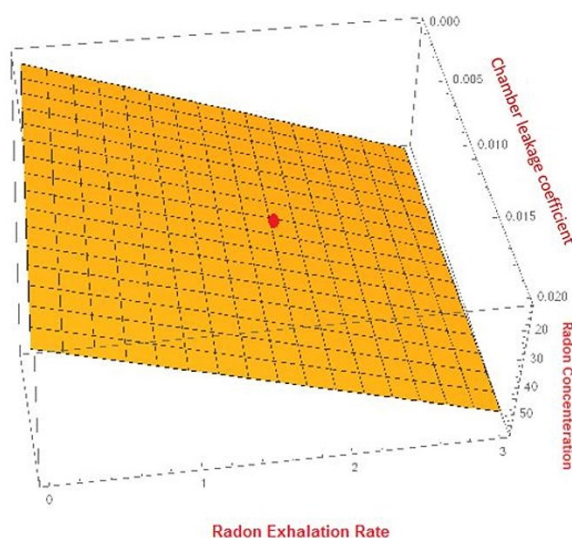
شکل (۶): آهنگ انتشار سطحی مصالح ساختمانی مورد مطالعه: بلوک بتنی، آجر سفالی، گرانیت و نمونه بتن.

حداکثر آهنگ انتشار سطحی رادون در نمونه‌های گرانیت مشاهده شد، در میان نتایج به دست آمده از نمونه‌ها، آهنگ انتشار سطحی آجرهای سفالی مورد بررسی، مقدار غیرقابل تشخیص بود که می‌توان آهنگ انتشار سطحی رادون آن‌ها را نادیده گرفت.

داخل محفظه که با استفاده از نرم‌افزار متمتیکا<sup>۱</sup> برای زمان مشخصی حاصل شده است، به دست آورد (شکل ۵). نتایج به دست آمده از این روش برای یک قطعه سنگ گرانیت نمونه در  $t = 10h$  به صورت زیر به دست آمد:

$$E = (1/95 \pm 0/18) Bqm^{-2} h^{-1}$$

$$\lambda_L = (0/0120 \pm 0/0002) h^{-1}$$



شکل (۵): نمودار سه بعدی تغییرات غلظت رادون در داخل محفظه با تغییرات آهنگ انتشار سطحی رادون ( $E$ ) و ضریب نشت محفظه ( $\lambda_L$ ) که از شبیه‌سازی رایانه‌ای با بهره‌گیری از نرم‌افزار متمتیکا برای زمان  $t = 10h$  حاصل شده است. نقطه قرمز، نشان‌گر غلظت رادون برای همین زمان در یک آزمایش تجربی است.

### ۳. نتایج اندازه‌گیری

آهنگ انتشار ( $E$ ) مقدار خالص رادونی در نظر گرفته می‌شود که در واحد زمان از واحد سطح یا واحد جرم مصالح ساختمانی منتشر می‌شود. آهنگ انتشار سطحی ( $E_A$ ) با یکای  $Bqm^{-2} h^{-1}$  می‌شود و در پژوهش حاضر مقدار  $E_A$  با رابطه زیر محاسبه گردیده است:

<sup>۱</sup> Mathematica

## ۴. نتیجه گیری

توسط این دستگاه برای آجر سفالی،  $0.84 \text{ Bqm}^{-2} \text{ h}^{-1}$  برای استوانه سیمانی و  $1.95 \text{ Bqm}^{-2} \text{ h}^{-1}$  برای سنگ گرانیتی به دست آمد. مشاهده بیشترین آهنگ انتشار سطحی رادون در نمونه‌های گرانیتی همان گونه که دیگر محققین در این زمینه نیز قبلاً گزارش کرده‌اند، نشانه‌ای روشن از خطر استفاده زیاد از این سنگ در ساختمان‌های مسکونی، به خصوص در محیط‌هایی با ضریب تهویه هوای پایین، است.

برخی مقادیر گزارش شده برای ضریب انتشار سطحی رادون در مطالعات انجام شده برای دیگر نقاط ایران از جمله نتایج اصغرزاده و همکاران و همچنین جعفرزاده و همکاران با مقادیر اندازه‌گیری شده در این پژوهش، تطابق نسبی خوبی دارند که نشان از شباهت پرتوایی نوع خاک مورد استفاده در مصالح ساختمانی مناطق مورد مطالعه دارند [۱۹-۱۱]. همچنین مقادیر به دست آمده در این پژوهش مطابقت نسبی خوبی با داده‌های سایر پژوهش‌های انجام شده برای برخی مصالح مورد بررسی در شهر مشهد دارد [۳۱، ۳۲]. این نتایج می‌تواند کمک مؤثری در انتخاب مصالح ساختمانی ایمن و مناسب برای محیط داخلی پیشنهاد دهد.

گاز رادون، یک گاز بی‌اثر، بی‌رنگ، بی‌بو و پرتوزا است که وجود غلظت‌های بالای آن در محیط مسکونی، می‌تواند برای سلامتی انسان‌ها مشکلات جدی ایجاد کند. مصالح ساختمانی بعد از خاک بستر، می‌توانند مهم‌ترین عامل در انتشار رادون در ساختمان‌های مسکونی باشند. در این پژوهش، ضریب انتشار سطحی رادون از نمونه‌های پرکاربرد از مصالح ساختمانی در منطقه مشهد- خراسان رضوی که شامل استوانه‌ای بتنی، سنگ گرانیت و آجر سفالی بودند، مورد بررسی قرار گرفتند. ضریب انتشار سطحی رادون از این سه نمونه، با استفاده از روش فعال و در محفظه بسته دستگاه رادون سنج Sarad-RTM۱۶۸۹ اندازه‌گیری و محاسبه گردید.

جدول (۱): آهنگ انتشار سطحی مصالح ساختمانی نمونه.

توضیحات	کاربرد	$E_A$ ( $Bqm^{-2} h^{-1}$ )	خطا ( $Bqm^{-2} h^{-1}$ )
آجر رسی	دیوار داخلی	کمتر از آستانه تشخیص	-
گرانیت	کف	۱/۹۵	$\pm 0.18$
استوانه بتنی	ستون‌ها و فونداسیون	۰/۸۴	$\pm 0.11$

آهنگ انتشار برای این نمونه‌ها همان گونه که در جدول ۱ نیز نشان داده شده است، در محدوده مقادیر ناچیز غیرقابل تشخیص

## ۵. مراجع

- World Health Organization, WHO Handbook on Indoor Radon: a public health perspective, Geneva, 2009.
- IAEA. International Atomic Energy Agency, Protection of the Public against Exposure Indoors due to Radon and Other Natural Sources of Radiation, Specific Safety Guide No. SSG-32, Vienna, Specific Safety Guide No. SSG-32, 2015.
- P. Ujić, I. Čeliković, A. Kandić, I. Vukanac, M. Đurašević, D. Dragosavac, Z. S. Žunić. Internal exposure from building materials exhaling  $^{222}\text{Rn}$  and  $^{220}\text{Rn}$  as compared to external exposure due to their natural radioactivity content. *Appl. Radiat. Isot.* 68 (1) (2010) 201-206.
- V. Dentoni, S. Da Pelo, M. M. Aghdam, P. Randaccio, A. Loi, N. Careddu, A. Bernardini. Natural radioactivity and radon exhalation rate of sardinian dimension stones. *Construction Build. Mater.* 247 (2020). 118377.
- R.C. Bruno. Sources of indoor radon in houses: A review. *J. Air Pollution Control Association* 33 (2) (1983) 105-109.
- S. Stoulos, M. Manolopoulou, C. Papastefanou. Assessment of natural radiation exposure and radon

- exhalation from building materials in Greece. *J. Environ. Radioactivity* 69 (3) (2003) 225-240.
7. S. Righi, L. Bruzzi. Natural radioactivity and radon exhalation in building materials used in Italian dwellings. *J. Environ. Radioactivity* 88 (2) (2006) 158-170.
  8. N. M. Hassan, T. Ishikawa, M. Hosoda, A. Sorimachi, S. Tokonami, M. Fukushi, S. K. Sahoo. Assessment of the natural radioactivity using two techniques for the measurement of radionuclide concentration in building materials used in Japan. *J. Radioanalytical Nucl. Chem.* 283 (1) (2010) 15-21.
  9. S. M. Zabihinpour, A. A. Mowlavi, B. Azadegan. The role of natural ventilation on reducing indoor radon concentration. *J. Radiat. Safety Measurement* 7 (4) (2018) 1-10.
  10. F. Asgharizadeh, M. Ghannadi Maragheh, B. Salimi, E. Sedgh Gouya. Dose rate calculation caused by natural radioactivity in granite samples used as building materials in Iran. *J. Radiat. Safety Measurement* 3 (2) (2014) 27-33.
  11. N. Zareie, M. R. Rezaie Rayeni Nejad. Estimation of radiation hazards caused by granite in the villages of Dehsiahan, Khanaman and Mani in Rafsanjan city of Kerman province. *J. Radiat. Safety Measurement* 11 (5) (2023) 25-32.
  12. F. Asgharizadeh, M. Esmailnezhad, P. Pourdeh, F. Moatar, A. Sadigzadeh, E. Sedgh Gouya, P. Nasiri. Measurement and comparison of radioactivity concentration of radon indoor air of buildings faced by granite and carbonate. *J. Radiat. Safety Measurement* 2 (1) (2013) 11-14.
  13. M. Jafarizadeh, M. Zahedifar, M. Taheri, S. Baradaran. Measurement of radon concentration in some dwellings of Kashan city in Iran. *J. Radiat. Safety Measurement* 3 (2) (2014) 37-41.
  14. F. Asgharizadeh, M. Ghannadi Maragheh, B. Salimi, E. Sedgh Gouya. Dose rate calculation caused by natural radioactivity in granite samples used as building materials in Iran. *J. Radiat. Safety Measurement* 3 (2) (2022) 27-30.
  15. M. Pirsae, F. Najaf, A. Haghparast, L. Hemati, K. Sharafi, N. Kurd. The influence of internal wall and floor covering materials and ventilation type on indoor radon and thoron levels in hospitals of Kermanshah, Iran. *Iran. Red. Crescent Med. J.* 18 (10) (2016) e25292.
  16. A. Soltani, A. Moradi. Microscopic Observations and Natural Radioactivity Hazard Indices in Granites Used in Dwelling. *J. Sustainable. Architecture Urban Design.*(1) (2018) 1-22.
  17. A. Abbasi. Calculation of gamma radiation dose rate and radon concentration due to granites used as building materials in Iran. *Radiat. Prot. Dosimetry* 155 (3) (2013) 335-342.
  18. I. T. Čeliković, G. K. Pantelić, M. Z. Živanović, I. S. Vukanac, J. D. Krneta Nikolić. Radon and thoron exhalation rate measurements from building materials used in Serbia. *Nukleonika* 65 (2) (2020) 111-114.
  19. T. Tene, C. V. Gomez, G. T. Usca, B. Suquillo, S. Bellucci. Measurement of radon exhalation rate from building materials: The case of highland region of Ecuador. *Construction Build. Mater.* 293 (2021) 123282.
  20. C. Y. H. Chao, T. C. W. Tung, D. W. T. Chan, J. Burnett. Determination of radon emanation and back diffusion characteristics of building materials in small chamber tests. *Build. Environ.* 32 (4) (1997) 355-362.
  21. P. Tuccimei, M. Moroni, D. Norcia. Simultaneous determination of <sup>222</sup>Rn and <sup>220</sup>Rn exhalation rates from building materials used in central Italy with accumulation chambers and a continuous solid state alpha detector: influence of particle size, humidity and precursors concentration. *Appl. Radiat. Isot.* 64 (2) (2006) 254-263.
  22. G. Keller, B. Hoffmann, T. Feigenspan. Radon permeability and radon exhalation of building materials. *Sci. Total Environ.* 272 (1-3) (2001) 85-89.
  23. L. Zhang, X. Lei, Q. Guo, S. Wang, X. Ma, Z. Shi. Accurate measurement of the radon exhalation rate of building materials using the closed chamber method. *J. Radiol. Prot.* 32 (3) (2012) 315-323.
  24. K. Kovler, A. Perevalov, V. Steiner, E. Rabkin. Determination of the radon diffusion length in building materials using electrets and activated carbon. *Health Phys.* 86 (5) (2004) 505-516.
  25. C. E. Andersen. Radon-222 exhalation from Danish building materials: H + H Industri A/S results. Risø National Laboratory, Roskilde, Denmark, 1999.
  26. N. Petropoulos, M. Anagnostakis, S. Simopoulos. Building materials radon exhalation rate: Erricca intercomparison exercise results. *Sci. Total Environ.* 272 (1-3) (2001) 109-118.
  27. J. Chen, N. M. Rahman, I. A. Atiya. Radon exhalation from building materials for decorative use. *J. Environ. Radioactivity* 101 (4) (2010) 317-322.
  28. H. Friedmann, C. Nuccetelli, B. Michalik, M. Anagnostakis, G. Xhixha, K. Kovler, G. de With, C. Gascó, W. Schroevers, R. Trevisi, S. Antropov, A. Tsapalov, C. Kunze, N. P. Petropoulos. *Measurement of Norm. Naturally Occurring Radioactive Materials in Construction: Integrating Radiation Protection in Reuse (COST Action Tu1301 NORM4BUILDING).*

- Schroeyers, W. (ed.). Duxford, UK: Woodhead Publishing Limited, (2017) pp. 61-133.
29. C. Samuelsson, H. Pettersson. Exhalation of  $^{222}\text{Rn}$  from porous materials. *Radiat. Prot. Dosimetry* 7 (1-4) (1984) 95-100.
30. C. Samuelsson. The closed-can exhalation method for measuring radon. *J. Res. Nat. Inst. Stand. Technol.* 95 (2) (1990) 167-169.
31. S. M. Zabihpour, Z. Khaniki. Designing an effective method for rapid estimation of surface radon emission rate from building materials. *Nat. Conf. Technol. Adv. Appl. Phys.* (2022) 305-310.
32. G. Sarkheil, D. Shirkhani, Y. Azimi, A. Talebi. Identification of natural radon gas emission zones in Mashhad and implementing its pollution reduction system at the site-scale. *J. Earth Sci. Kharazmi* 7 (2) (2022) 131-119.