

نقش تهویه طبیعی بر کاهش غلظت رادون داخل ساختمان‌ها

سیدمحمد ذبیحین پور^۱، علی اصغر مولوی^{۱*} و بهنام آزادگان^۱

^۱گروه فیزیک، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران.

^۱گروه فیزیک، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران.

*خراسان رضوی، سبزوار، دانشگاه حکیم سبزواری، گروه فیزیک، کدپستی: ۹۶۱۱۷۹۷۶۴۸۷

پست الکترونیکی: amowlavi@hsu.ac.ir

چکیده

با توجه به گسترش روزافزون استفاده از سیستم‌های تهویه بسته در ساختمان‌ها، خطر افزایش غلظت رادون در داخل ساختمان‌ها روز به روز در حال افزایش است. در این پژوهش با انتخاب دو اتاق بسته نمونه، با محاسبه ضریب انتشار رادون از سطوح مختلف، تراکم رادون را در حالتی که راه‌های تهویه طبیعی نیز کاملاً بسته شده بود، اندازه‌گیری کرده و با نتایج تحلیلی مقایسه گردید. نتایج به‌دست آمده به روشنی تفاوت تراکم این گاز را در سطوح مختلف نشان می‌دهد؛ سپس با بازگذاشتن شکاف‌های معمول در ورودی این اتاق‌ها، میزان تهویه طبیعی ناشی از تفاوت دمایی بین اتاق بسته با فضای بیرونی را به‌دست آورده و با جایگذاری آن‌ها در معادلات تحلیلی، میزان تراکم رادون پس از تهویه محاسبه گردید. نتایج به‌دست آمده با نتایج تجربی از تطابق بسیار خوبی برخوردار است و نقش مهم تهویه طبیعی به‌منظور کاهش تراکم رادون در محیط‌های سر بسته حتی تا بیش از ۹۰٪ را نشان می‌دهد.

کلیدواژگان: رادون، تهویه طبیعی، آهنگ انتشار، روش تحلیلی، اندازه‌گیری تراکم.

۱. مقدمه

های آن می‌باشد. نتایج مطالعات گسترده در کشورهای مختلف، با نشان دادن یک رابطه خطی مثبت بین قرارگرفتن در معرض رادون و ابتلا به سرطان ریه، این گاز خطرناک را بعد از سیگار بزرگترین عامل بروز این بیماری مهلک معرفی کرده‌اند [۱]. انتشار دائمی رادون از رادیوم موجود در خاک، آب‌ها و یا مصالح و سنگ‌های ساختمانی علی‌رغم پایین‌بودن درصد

رادون (^{222}Rn) یک گاز رادیواکتیو با نیمه عمر $3/82$ روز و از خانواده عناصر بی‌اثر است. این گاز محصولی از واپاشی‌ها در چرخه طبیعی اورانیوم است. این عنصر از مادر رادیوم با گسیل یک ذره آلفا با انرژی $5/590$ MeV به دختر هسته ^{218}Po واپاشی می‌کند. تقریباً نیمی از دز دریافتی عموم مردم از تابش طبیعی ناشی از تنفس گاز رادون (^{222}Rn) و دختر هسته-

اکبری و آمن^۶ در سال ۲۰۱۵، لی^۷ و همکاران در سال ۲۰۱۶ و رابی و اونی^۸ در سال ۲۰۱۷ با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی (CFD^۹)، نحوه توزیع تراکم رادون بر اساس مشخصات فیزیکی اتاق و تأثیر تهویه مناسب بر کاهش تراکم رادون داخلی را بررسی و گزارش کرده‌اند [۸-۱۱].

در کشور ما نیز اگرچه متأسفانه هنوز نقشه تراکم رادون کشور تهیه نشده است، اما خوشبختانه و به‌خصوص در دهه اخیر، پژوهش‌های متعددی بر روی اندازه‌گیری تراکم رادون در هوای ساختمان‌ها و آب چشمه‌های چندین منطقه و شهر انجام شده است. به‌عنوان مثال در سال ۱۳۹۲، عشورنژاد و همکاران نشان دادند که در شش منطقه مسکونی شهر رامسر، میزان تراکم رادون بسیار بیش‌تر از میزان مجاز آن است [۱۲]. همچنین در سال ۱۳۹۳، جعفری‌زاده، زاهدی فر و همکاران، تراکم رادون موجود در منازل مسکونی کاشان را اندازه‌گیری کردند [۱۳] و اصغری‌زاده و همکاران به بررسی آهنگ دز ناشی از پرتوزایی طبیعی در سنگ‌های گرانیتهی ایران پرداختند [۱۴] و یا اخیراً مولوی و جعفری، برآوردی از دز جذبی مؤثر سالیانه ناشی از گازهای رادون و تورون در مجاورت گسل‌های فعال در شمال شرق ایران را به‌دست آوردند [۱۵].

در پژوهش حاضر نیز تأثیر تهویه طبیعی از منفذهای معمول یک اتاق مسکونی، بر تغییرات غلظت رادون در محیط داخلی آن مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور پس از انتخاب دو اتاق بسته نمونه، با محاسبه ضریب تهویه هوا در شرایط مختلف تهویه، تأثیر آن بر کاهش تراکم رادون داخلی به روش تحلیلی بررسی شده و نتایج با داده‌های تجربی در این فرآیند مقایسه گردیده است.

تراکم آن نسبت به دیگر گازهای موجود در جو زمین، اثر آن را بر سلامتی انسان مهم می‌نماید. این نحوه انتشار باعث می‌گردد که تراکم گاز رادون در محیط‌های سر بسته مانند منازل، مدارس، اداره‌ها و یا فروشگاه‌ها در مقایسه با فضای آزاد در حدود ۱۰ تا ۱۰۰۰۰ برابر افزایش یابد [۲]. بنابراین تخمین، محاسبه و اندازه‌گیری تراکم آن در نواحی مختلف این محیط‌ها جهت تعیین راهکارهایی برای کاهش تراکم غیرمجاز این گاز ضروری است.

همچنین توسعه درزبندی تمامی روزنه‌های تهویه هوا با محیط بیرونی در ساختمان‌ها و استفاده از سیستم‌های تهویه هوای بسته که ابتدا در مناطق سردسیر و در سال‌های اخیر در سراسر دنیا گسترش یافته است، بر این خطر افزوده و توجه پژوهشگران حوزه ایمنی، فیزیک بهداشت و محیط زیست را به خود مشغول کرده است. اگرچه حضور رادون در هوای محیط داخلی، از اوایل سال ۱۹۵۰ به اثبات رسید؛ اما تحقیقات برای رسیدگی به منابع رادون داخل، عوامل تمرکز، اثرات بهداشتی و رویکردهای کاهش آن از اوایل دهه ۱۹۷۰ آغاز شد و در سال‌های اخیر شدت یافته است [۳]. اونی و میصداق^۱ در سال ۲۰۰۱ بر لزوم اندازه‌گیری مستمر رادون داخلی، با استفاده از آشکارسازهای حالت جامد به‌منظور تعیین سطح و توزیع غلظت رادون در محیط‌های مسکونی تأکید کردند [۴]. سینگ^۲ و همکاران در سال‌های ۲۰۰۵ و ۲۰۰۸، مورتی^۳ و همکارانش در سال ۲۰۱۰ و دونگ^۴ و همکارانش در سال ۲۰۱۶، تأثیر عوامل فیزیکی مانند تغییرات دمایی، رطوبت، مشخصات زمین‌شناختی و بارندگی را بر متوسط تراکم رادون داخلی بررسی کردند [۵-۷]. چوان^۵ و همکارانش در سال ۲۰۱۴،

¹ Oufni and Misdaq

² Singh, K.

³ Murty, V.R.K

⁴ Dong, X.

⁵ Chauhan, N.

⁶ Oman, R.

⁷ Lee, J.E.

⁸ Rabi, R., and Oufni, L.

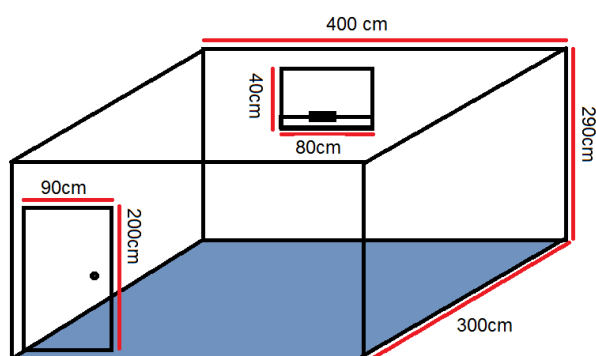
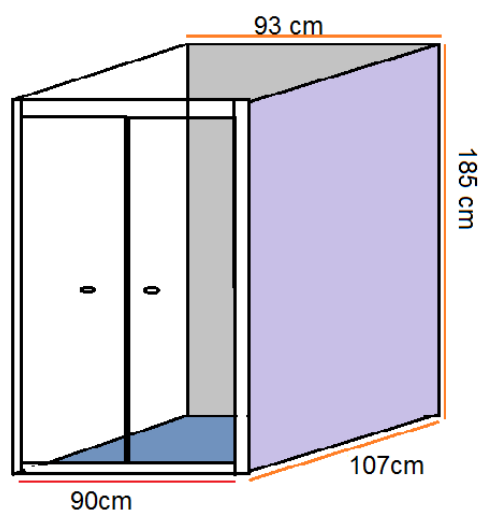
⁹ Computational fluid dynamics.

۲. مواد و روش‌ها

۱.۲. اتاق‌های نمونه

تهویه اتاق‌ها می‌توان از تغییرات دمایی و رطوبت نسبی آن‌ها صرف‌نظر نمود.

همچنین جهت تعیین میزان آهنگ انتشار رادون در سطوح مورد نظر، از یک اتاقک اندازه‌گیری مکعبی شکل که به جز یک وجه باز آن، پنج سطح دیگر آن پوشش پلاستیکی غیرقابل نفوذ دارد، استفاده شد. در هنگام اندازه‌گیری، دستگاه رادون‌سنج در درون آن قرار می‌گیرد. ابعاد این اتاقک اندازه‌گیری برابر $25\text{cm} \times 45\text{cm} \times 45\text{cm}$ بوده و تقریباً حجم فضای خالی آن با وجود دستگاه در حدود 0.32 مترمکعب است. همچنین مساحت وجه باز آن، 0.16 مترمربع است.



شکل (۱): شمایی از اتاق‌های نمونه ۱ (بالا) و نمونه ۲ (پایین) که هر دو در طبقه همکف یک ساختمان چهار طبقه‌ی بدون زیرزمین واقع هستند.

در این پژوهش به‌منظور بررسی اثر تهویه طبیعی بر تراکم رادون داخلی از دو اتاق نمونه واقع در طبقه همکف یک ساختمان چهار طبقه‌ی فاقد زیرزمین استفاده شد. اتاق اول (شکل ۱-بالا) دارای مساحت تقریبی یک مترمربع و ارتفاع ۱۸۵ سانتی‌متر است. در این اتاقک، دیوارهای سمت راست و روبروی درب، دارای پوشش گچی و کف آن ترکیبی از بتن و سنگ است، در سرتاسر این سطوح، شکاف‌ها و درزهای کوچک و بزرگ فراوانی دیده می‌شود که منبعی برای انتشار رادون هستند. درب ورودی، سقف و دیوار سمت چپ همگی چوبی هستند و رادونی از خود منتشر نمی‌کنند. برای جلوگیری از اغتشاشات دمایی همه دیوارها و سقف از بیرون عایق‌بندی شده و هم‌دما فرض می‌شوند. زیر درب و بالای درب شکافی مستطیلی شکل به عرض تقریبی ۵ سانتی‌متر قرار دارد. اتاق دوم نیز یک اتاق مکعب مستطیل به طول ۴ متر و عرض ۳ متر و ارتفاع $2/80$ متر، مطابق شکل ۱ در نظر گرفته شد. کف و دیوارها تا ارتفاع ۱۲۰ سانتی‌متری از کف این اتاق، از جنس و شرایطی تقریباً مشابه کف اتاق ۱ و مابقی سطوح دیوارهای آن با کاغذ دیواری پوشیده شده و از خود رادون چندان متصاعد نمی‌کنند. درب از جنس چوب و پنجره شیشه‌ای است که در طول آزمایش برای جلوگیری از اغتشاشات دمایی، سطح آن‌ها از بیرون عایق‌بندی شده است و با بقیه دیوارهای اتاق تقریباً هم‌دما فرض شده‌اند. زیر درب، روزنه‌ای مستطیلی به ارتفاع ۵ سانتی‌متر قرار دارد و در حالت طبیعی محل تهویه هوا با سالن بیرونی است.

مشخصات هندسی این اتاق‌ها در جدول ۱ فهرست شده است. فضای بیرونی اتاق‌ها آن چنان بزرگ است که در طول

۲.۲. دستگاه اندازه گیری

محیط داخل وارد شود، می توان با اضافه کردن جمله ای به رابطه ۱ بر اساس تعریف ضریب تهویه، رابطه تراکم نهایی رادون داخلی پس از تهویه هوا به مدت زمان t را به صورت زیر پیشنهاد کرد:

$$C_2 = C_0 e^{-(\lambda_{Rn} + \lambda_v)t} + (C_1 + \frac{EA}{V(\lambda_{Rn} + \lambda_v)})(1 - e^{-(\lambda_{Rn} + \lambda_v)t}) \quad (2)$$

که در آن C_0 و C_2 به ترتیب تراکم رادون اتاق قبل و بعد از تهویه و C_1 تراکم رادون در فضای خارجی است.

اگر اندازه زمانی برابر حداقل سه نیمه عمر رادون سپری شود، سیستم به حالت تعادل پایدار نزدیک می شود. منظور از تعادل پایدار، حالتی است که پس از آن آهنگ تولید و آهنگ واپاشی رادون در اتاق با هم برابر می شوند و کوچک ترین تغییراتی در یکی از آنها، باعث افزایش یا کاهش تراکم رادون داخلی خواهد شد. در این حالت رابطه ۲ را می توان به شکل زیر بازنویسی کرد:

$$C_i = C_{out} + \frac{EA}{V(\lambda_{Rn} + \lambda_v)} \quad (3)$$

این معادله نشان می دهد که حداقل تراکم رادون داخلی برابر با تراکم رادون خارجی (C_{out}) است. با فرض این که مقدار تراکم رادون خارجی قابل صرف نظر باشد، معادله تراکم رادون داخلی در شرایط تعادل پایدار از رابطه زیر به دست می آید:

$$C_i = \frac{EA}{V(\lambda_{Rn} + \lambda_v)} \quad (4)$$

بنابراین مهمترین کمیت های متغیر در تعیین تراکم رادون داخلی، شار ورودی رادون به اتاق و ضریب تهویه اتاق است. برای تعیین E می توان با ایزوله کردن اتاق و بستن تمامی راه های تهویه هوا ($\lambda_v = 0$)، رابطه ۳ را به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$C_{Max} = \frac{EA}{V\lambda_{Rn}} \quad (5)$$

برای اندازه گیری تراکم گاز رادون در این پژوهش از دستگاه رادون سنج قابل حمل مدل ۲-۱۶۸۸ RTM شرکت ساراد استفاده گردید. این دستگاه قابلیت اندازه گیری و ثبت همزمان فشار، دما، رطوبت نسبی و تراکم رادون را داشته و به علاوه از توانایی کارکرد در دو مد سریع و کند (دقت بالاتر) برخوردار است. مهم ترین مشخصه این دستگاه پاسخ سریع آن به تغییرات تراکم رادون نسبت به سایر دستگاه ها و یا روش های اندازه گیری می باشد.

۳.۲. معادله تراکم رادون داخلی

کلاوینسجو و آکربلوم^۱ در سال ۱۹۹۴ و پیترپولوس و سیموپولوس^۲ در سال ۲۰۰۱، معادله نهایی برای تعیین تراکم رادون داخلی در یک اتاق بسته به حجم V را به صورت زیر ارائه کردند [۱۶، ۱۷]:

$$C_i(t) = C_0 e^{-\lambda t} + \frac{EA}{V\lambda}(1 - e^{-\lambda t}) \quad (1)$$

که در آن C_i تراکم رادون داخلی در زمان $t(h)$ و C_0 تراکم رادون اولیه در $t=0$ بر حسب Bqm^{-3} ، $E(Bqm^{-2}h^{-1})$ شار رادون یا آهنگ انتشار رادون از خاک و مصالح ساختمانی، $A(m^2)$ مساحت سطحی که رادون از آن منتشر می شود و $V(m^3)$ حجم اتاق بسته و یا محفظه مورد آزمایش و $\lambda(h^{-1})$ آهنگ کل واپاشی رادون است که بر حسب $\lambda = \lambda_{Rn} + \lambda_v$ به دست می آید و در آن λ_{Rn} ضریب واپاشی طبیعی رادیواکتیو رادون و λ_v آهنگ تهویه هوا از داخل اتاق یا محفظه است. با فرض آن که تهویه هوا بین اتاق مورد نظر و محیط های دیگر وجود داشته باشد و از بیرون هوای تازه به

¹ Clavensjo & Akerblom

² Petropoulos & Simopoulos

و با جایگذاری حداکثر تراکم رادون اندازه‌گیری شده، مقادیر سطح منتشرکننده رادون و حجم اتاق، شار ورودی رادون را به دست آورد.

۳. نتایج اندازه‌گیری

به منظور بررسی تغییرات تراکم رادون در شرایط مختلف در اتاق‌های نمونه ۱ و ۲، از دستگاه اندازه‌گیری رادون سنچ مدل RTM۱۶۸۸ که قبلاً توصیف شدند، استفاده شد. مکان مرجع در تمامی اندازه‌گیری‌ها، ارتفاع یک متری از کف و در وسط اتاق‌ها انتخاب گردید.

ابتدا جهت تعیین میزان آهنگ انتشار رادون از دو دیوار و کف اتاق اول و همچنین کف اتاق دوم، از یک اتاق آزمایش که قبلاً توصیف شد، استفاده گردید؛ بدین منظور وجه باز آن به گونه‌ای به سطح مورد نظر چسبانده شد که تا جایی که مقدور بود، روزه‌ای به بیرون نداشته و تنها کابل کنترل و تغذیه دستگاه رادون سنچ از آن بیرون آمده بود. هر اندازه‌گیری تراکم رادون در محل جدید، حداقل تا رسیدن به حالت پایدار ادامه داشته و بررسی تأثیر پارامترهای مختلف پس از آن آغاز گردید. همچنین داده‌ها در بازه‌های منظم انتخابی در نرم‌افزار دستگاه ثبت و متوسط داده‌ها از خروجی دستگاه دریافت گردید. آنگاه با قراردادن حداکثر تراکم ثبت شده در رابطه ۵ و جایگذاری مساحت سطح مورد نظر و حجم فعال اتاق آزمایش مورد استفاده، محاسبه $E(Bqm^{-1}h^{-1})$ برای تمامی سطوح مهم (کف و دیوارها) اتاق‌ها انجام شد.

به‌عنوان نمونه در قسمتی از دیوار گچی اتاق شماره ۱، حداکثر تراکم رادون اندازه‌گیری شده در اتاق آزمایش برابر با مقدار $C_{Max}=2512+151 Bqm^{-3}$ گردید (شکل ۲- منحنی بالا). دو نکته جالب در این نمودار مشهود است، اولی مقدار نسبتاً زیاد تراکم اندازه‌گیری شده که دلیل آن وجود شکاف‌های

متعدد ریز اما عمیق به‌عنوان منبعی برای انتشار رادون به محیط داخل است و نکته جالب دیگر، زمان نسبتاً کوتاه رسیدن به حالت تعادل است. همان‌گونه که می‌دانید عامل انتشار رادون از لایه‌های درونی سطوح به داخل ساختمان، تفاوت جزئی فشار هوا در قسمت‌های درونی پی و یا دیوار نسبت به محیط داخلی ساختمان است؛ لذا در صورت عدم وجود تهویه در اتاق مورد نظر، در حجم ثابت، فشار هوا در داخل اتاق به علت مسدود شدن راه‌های خروج مخلوط هوا و رادون به میزان جزئی افزایش و در نتیجه گرادیان فشار موجود از بین خواهد رفت و باعث کاهش سریع آهنگ انتشار گاز رادون از شکاف‌ها و درزهای سطوح اتاق به محیط اتاق می‌گردد. بنابراین لازم است که ضریب انتشار رادون از سطوح به صورت

$E = KEe^{-\sigma t}$ تصحیح گردد که در آن E ضریب اولیه انتشار رادون و K و σ ضرایب ثابتی هستند که با توجه به شرایط تهویه در هر اتاق قابل محاسبه هستند. منحنی شکل ۲- پایین، یک نمودار شبیه‌سازی شده رایانه‌ای با نرم‌افزار متمتیکا^۱ برای اتاق نمونه و در شرایط مشابه اندازه‌گیری انجام شده است و به روشنی کاهش زمان رسیدن به حالت تعادل را نشان می‌دهد.

از آنجا که $\lambda_{Rn} = 2/1 \times 10^{-6} s^{-1}$ است، شار رادون خروجی از کف اتاق برابر $E = 9/45 \times 10^{-4} Bqm^{-1}h^{-1} = 3/8 Bqm^{-1}h^{-1}$ محاسبه گردید. مقدار متوسط ضریب انتشار رادون با توجه به هندسه اتاق مورد نظر از رابطه ۶ به دست آمد.

$$\bar{E} = \sum_i \frac{E_i A_i}{A_i} \quad (6)$$

بر این اساس آهنگ انتشار متوسط رادون برای اتاق ۱ برابر با $3/4 Bqm^{-1}h^{-1}$ با سطح کل فعال $4/7$ مترمربع و برای اتاق ۲ برابر با مقدار $0/5 Bqm^{-1}h^{-1}$ با سطح کل فعال حدود ۲۸ مترمربع تعیین گردید. مشخصات هندسی سطوح دیوارها، سقف، کف و شکاف‌های تهویه برای اتاق‌های نمونه و

¹ Mathematica

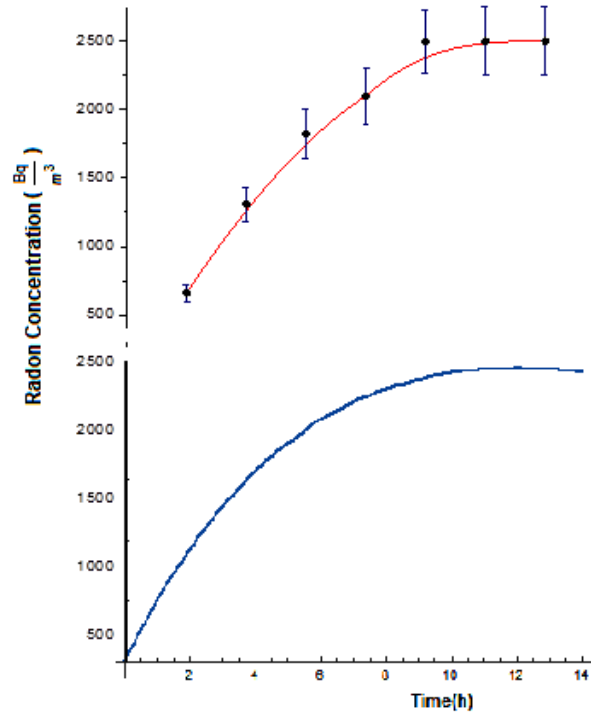
جدول (۱): ابعاد و آهنگ انتشار رادون برای سطوح مورد نظر.

$E(Bq\ m^{-2}\ h^{-1})$	مساحت (m^2)	ارتفاع/عرض (cm)	طول (cm)	
$3/8 \pm 0/38$	۱/۹۷	۱۸۵	۱۰۷	دیوار راست اتاق ۱
$3/7 \pm 0/37$	۱/۷۲	۱۸۵	۹۳	دیوار مقابل اتاق ۱
$0/5 \pm 0/06$	0/۹۹	۹۳	۱۰۷	کف اتاق ۱
۰	0/۹۹	۹۳	۱۰۷	سقف
۰	۱/۹۷	۱۸۵	۱۰۷	دیوار چپ
۰	۱/۶۶	۱۸۵	۹۰	درب اتاق ۱
-	0/0۴۵	۵	۹۰	شکاف زیر درب اتاق ۱
$0/5 \pm 0/08$	۱۲	۳۰۰	۴۰۰	کف اتاق ۲
$0/5 \pm 0/09$	۱۶	۱۲۰	۱۳۳۰	سنگ حاشیه دیوار اتاق ۲
-	0/0۴۵	۵	۹۰	شکاف زیر درب اتاق ۲

جدول (۲): تراکم رادون حاصل از داده‌های تجربی و محاسباتی.

کمیت/محل	اتاق ۱	اتاق ۲
$C_i(Bq/m^3)$	316 ± 28	45 ± 6
t زمان سپری شده (h)	۱۶	۲۴
$C_i(Bq/m^3)$ محاسبه شده	412 ± 43	76 ± 8
$C_i(Bq/m^3)$ اندازه گیری	408 ± 36	83 ± 9

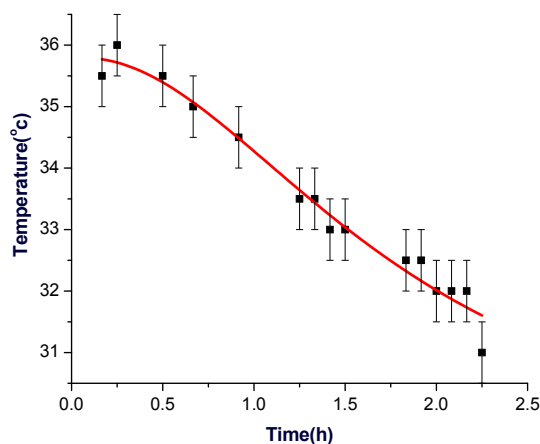
همچنین آهنگ انتشار رادون متوسط برای این سطوح در جدول ۱، فهرست شده است.



شکل (۲): منحنی تغییرات متوسط تراکم رادون در اتاقک اندازه گیری برای یک مکان نمونه در اتاق شماره ۱- منحنی قرمز (بالا) بر حسب متوسط داده‌های تجربی و منحنی آبی رنگ (پایین) از طریق شبیه سازی رایانه ای و با اعمال ضریب تصحیح انتشار رادون از سطح اتاقک آزمایش در شرایط عدم تهویه.

جهت محاسبه و اندازه گیری تراکم رادون داخلی، دستگاه رادون سنج در نقطه مرجعی که قبلاً توصیف شد، قرار گرفت و پس از مسدود نمودن تمامی راه‌های تهویه هوای اتاق‌ها، یعنی درزهای پایین و بالای درب‌ها، اندازه گیری شروع گردید. اگر با توجه به صفر بودن آهنگ تهویه، λ برابر مقدار کوچک λ_{Rn} فرض شود، می‌توان برای هر زمان دلخواه با استفاده از رابطه ۱، تراکم رادون داخلی را به دست آورد. در جدول ۲ نتیجه این محاسبات برای اتاق ۱ بعد از گذشت ۱۶ ساعت و برای اتاق ۲ پس از سپری شدن ۲۴ ساعت ثبت گردیده و با مقادیر تجربی به دست آمده مقایسه شده است.

منحنی شکل ۳ بر اساس داده‌های تجربی، آهنگ کاهش دما در مدت زمان t را برای یک نمونه از تهویه در اتاق ۱ نشان می‌دهد.



شکل (۳): منحنی تغییرات دمایی در اتاق ۱ در هنگام تهویه طبیعی.

با توجه به این نمودار و رابطه‌های ۸ و ۹، جایگذاری داده‌های دو نقطه واقع بر روی نمودار مذکور در کاهش دما از $34/5$ به 33 درجه سلسیوس، مقدار ضریب تهویه در این نوع تهویه را برابر $\lambda_p = 0/41 \frac{1}{h}$ نشان می‌دهد. جایگذاری این مقدار در رابطه ۴، پیش بینی می‌کند مقدار تراکم رادون در 110 دقیقه اولیه پس از شروع تهویه از مقدار $451 \frac{Bq}{m^3}$ به مقدار $233 \frac{Bq}{m^3}$ کاهش یابد. در این محاسبه مقدار غلظت رادون در فضای بیرونی اتاق بر اساس اندازه‌گیری‌های انجام شده، برابر با $32 \pm 4 \frac{Bq}{m^3}$ بکرل بر مترمکعب، اعمال گردید.

شکل ۴، منحنی تغییرات اندازه‌گیری شده تراکم رادون در این تهویه را نشان می‌دهد. توجه به این نمودار، مقدار تراکم رادون اندازه‌گیری شده در همین مدت زمان و پس از تهویه مورد اشاره را برابر $242 \pm 23 \frac{Bq}{m^3}$ نشان می‌دهد که از تطابق مناسبی بین دو مقدار تحلیلی و تجربی حکایت دارد.

۵. تأثیر تهویه هوای طبیعی بر تراکم رادون داخلی

همان‌گونه که بیان شد، برای تعیین تغییرات زمانی تراکم رادون داخلی در هنگام تهویه می‌توان از رابطه ۲ استفاده کرد؛ لذا اولین قدم در این زمینه، یافتن ضریب کاهش رادون ناشی از تهویه (λ_p) می‌باشد. بدین منظور از تغییرات دمایی ناشی از تهویه استفاده گردید. در این روش، زمانی که دمای محیط داخلی بیش‌تر از دمای بیرون بود (در فشار هوای برابر)، با باز گذاشتن درزهای موجود در پایین و بالای درب، اجازه تهویه طبیعی ناشی از اختلاف دما از آن‌ها داده شد. همچنین می‌دانید که برای محاسبه آهنگ تهویه هوا، می‌توان از معادله تغییر انرژی درونی هوای اتاق در بازه زمانی شروع تا پایان تهویه با تقریب خوبی به صورت زیر استفاده کرد:

$$MC\theta_i - \Delta m C\theta_i + \Delta m C\theta_p = MC\theta_p \Rightarrow$$

$$V\rho C\theta_i - \Delta V\rho C\theta_i + \Delta V\rho C\theta_p = V\rho C\theta_p \quad (7)$$

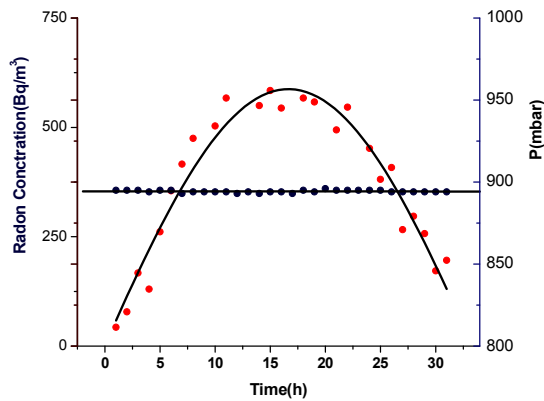
که در آن M جرم و V حجم هوای اتاق، Δm جرم و ΔV حجم هوای جابه‌جا شده در مدت زمان t ، θ_i و θ_p به ترتیب دمای اولیه اتاق، دمای هوای محیط بیرونی و دمای نهایی اتاق است. همچنین t مدت زمان تهویه اتاق، C ظرفیت گرمایی ویژه هوا و ρ چگالی هوای اتاق است. بنابراین حجم هوای جابه‌جا شده (تهویه) در مدت زمان t از رابطه‌ی ۸ به دست می‌آید:

$$\Delta V = \frac{V(\theta_i - \theta_p)}{(\theta_i - \theta_p)} \quad (8)$$

و نهایتاً ضریب تهویه هوا را می‌توان از رابطه‌ی ۹ محاسبه نمود:

$$\lambda_p = \frac{\Delta V}{Vt} \quad (9)$$

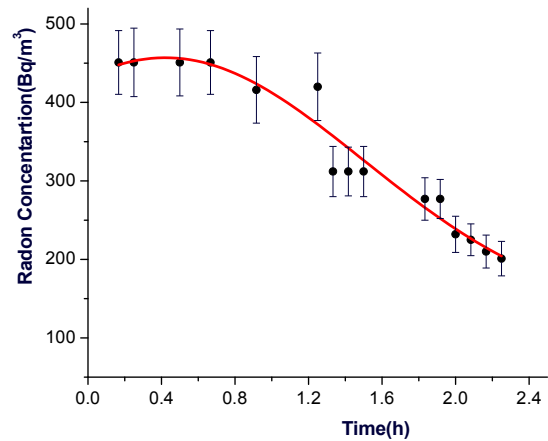
بازه بیش از ۳۰ ساعتی در نمودار شکل ۶ به خوبی مشخص شده است. قسمت اول منحنی افزایش تراکم رادون ناشی از مسدود کردن راه‌های طبیعی تهویه هوا تا رسیدن به یک میزان حداکثر و قسمت دوم منحنی، کاهش تراکم رادون ناشی از باز گذاشتن همان راه‌ها را نشان می‌دهد. فشار هوا همانگونه که نشان داده شده است در طول این دو فرآیند، تقریباً ثابت بوده است.



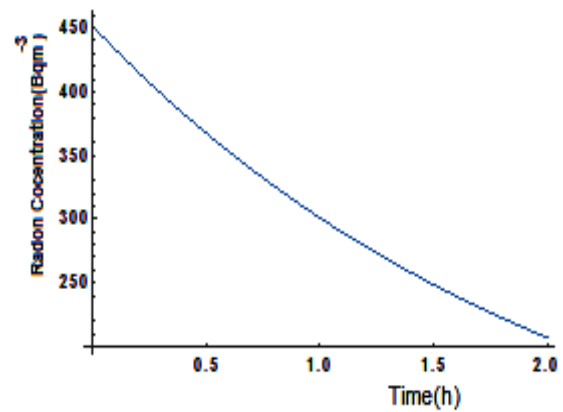
شکل (۶): تغییرات تراکم رادون (منحنی) و فشار هوا (خط مستقیم) در فضای داخلی اتاق در فاصله زمانی دو تهویه متوالی.

۶. بحث و نتیجه‌گیری

دقت در نتایج اندازه‌گیری‌ها و محاسبات انجام شده در این پژوهش مشخص می‌سازد که نقش تهویه طبیعی در کاهش رادون داخلی به ویژه برای اتاق‌هایی که میزان انتشار رادون از سطوح آن‌ها قابل توجه می‌باشد، بسیار مهم است. همانگونه که در جدول ۱ بیان گردید، میزان آهنگ انتشار متوسط رادون برای دیوار گچی اتاق نمونه ۱ برابر $3/8 \text{ Bq}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ می‌باشد. این مقدار زیاد، نشان از وجود رادیوم فراوان در سنگ و خاک بستر ساختمان و یا مصالح ساختمانی به کار رفته در ساخت این اتاق دارد و شکاف‌های فراوان ریز اما عمیق در سطح و ساختار احتمالاً متخلخل این دیوارها به مانند معبری مناسب برای ورود رادون به داخل این اتاق عمل می‌نماید. پوشش



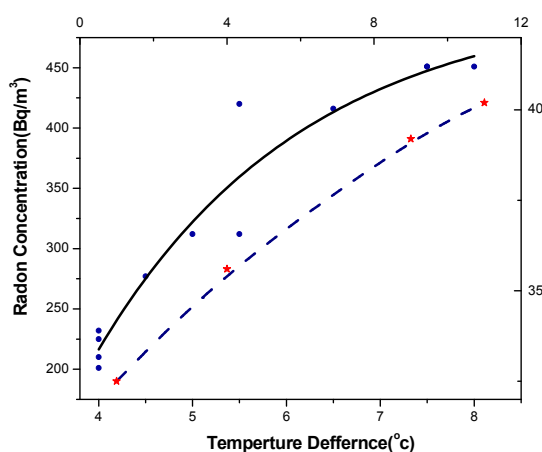
شکل (۴): منحنی تغییرات تراکم رادون داخلی در هنگام تهویه طبیعی (تجربی) - تهویه تقریباً در $t=0/6 \text{ h}$ شروع شده است.



شکل (۵): منحنی تغییرات تراکم رادون داخلی در هنگام تهویه طبیعی (محاسباتی - متمتیکا) شروع تهویه در $t=0$ فرض شده است.

از طرفی شکل ۵ نمودار تغییرات تراکم رادون داخلی بر حسب زمان تهویه را نشان می‌دهد که توسط نرم افزار متمتیکا برای این تهویه شبیه‌سازی شده است. با در نظر گرفتن زمان صفر از لحظه شروع تهویه در این منحنی، شباهت شیب آن با منحنی تجربی شکل ۴ مشخص است. به همین طریق این بررسی در اتاق ۲ نیز انجام پذیرفت و نتایج مشابهی به دست آمد. همچنین در یک اندازه‌گیری در اتاقی دیگر، میزان تغییرات تراکم رادون داخلی در دما، فشار و رطوبت نسبی تقریباً ثابت و در فاصله زمانی دو بار تهویه طبیعی اتاق ثبت گردید. تأثیر این نوع تهویه ساده بر تغییرات تراکم رادون داخلی در یک

مصالح به‌کار رفته در آن و همچنین ترک‌ها و شکاف‌های متعددی که بر روی آن قرار دارد، نقش بیش‌تری نسبت به کف بناها در افزایش تراکم رادون داخلی داشته باشند؛ لذا پوشش آن‌ها با مصالحی مانند کاغذ دیواری و یا پوشش‌های سلولزی می‌تواند در کاهش تراکم رادون داخلی بسیار مؤثر باشد.



شکل (۷): نمودار تغییرات تراکم رادون نسبت به اختلاف دمای میان محیط داخل و خارج در تهویه طبیعی، نمودار پیوسته-پژوهش حاضر نمودار خط‌چین-اکبری و آمن ۲۰۱۳-استهکلم.

نکته مهم دیگر توجه به عوامل ایجاد خطا در اندازه‌گیری رادون از جمله تغییرات فشار، دما و رطوبت هوای داخل و خارج ساختمان است. همچنین محدودیت در مکان و مدت زمان اندازه‌گیری‌ها دقت داده‌های حاصل را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در این پژوهش سعی شده است که با تکرار اندازه‌گیری‌ها در شرایط یکسان، خطا تا کم‌تر از ۱۵٪ کاهش یابد.

البته در حالت کلی باید توجه داشت که تنوع هندسه اتاق‌های مسکونی و گذرگاه‌های تهویه طبیعی، مصالح و بستر ساختمان و یا اعمال انواع گوناگون تهویه فیزیکی بر هوای داخلی اتاق‌ها، بر پیچیدگی‌های محاسبه تراکم رادون در نقاط مورد نظر در داخل این ساختمان‌ها می‌افزاید و لازم است که هر یک را به صورت خاص مورد مطالعه قرار داد؛ لذا با توجه به اهمیت این موضوع بر سلامت ساکنین محیط‌های سرپسته، نیاز به

مناسب و فشرده کف در هر دو اتاق، ضریب انتشار رادون از آن‌ها را کم و عایق‌بندی سطوح دیوارهای اتاق نمونه ۲ با کاغذ دیواری ضخیم، مقدار این ضریب را برای آن‌ها ناچیز نموده است و بر اهمیت عایق‌بندی مناسب سطوح در کاهش رادون در محیط داخلی ساختمان‌ها تأکید می‌نماید.

همچنین نمودارهای شکل‌های ۴ و ۵ نشان می‌دهند که وجود درزها و روزنه‌های معمول در اطراف درب و پنجره‌های یک اتاق بسته، تأثیر فراوانی در کاهش تراکم رادون در داخل محیط‌های سرپسته دارد و نمودار شکل ۶ نشان می‌دهد این نوع تهویه در یک اتاق نمونه می‌تواند بیش از ۹۳٪ تراکم رادون داخلی را کاهش داده و به همان نسبت میزان پرتوگیری و خطر رادون برای ساکنین این اتاق‌ها را کم کند. مقدار این تأثیر به عوامل فیزیکی ایجاد تهویه طبیعی مرتبط است، یکی از این عوامل همانگونه که نمودار شکل ۳ نشان می‌دهد، اختلاف دمای درونی اتاق با فضای بیرونی، حتی در فشار و رطوبت نسبی تقریباً ثابت است. برای مشخص نمودن تأثیر اختلاف دما، اگر نمودار تغییرات تراکم رادون داخلی بر حسب اختلاف دمای میان محیط داخلی و خارجی رسم شود (شکل ۷-نمودار پیوسته) نشان داده می‌شود که هرچه این تفاوت دمایی به علت تهویه طبیعی کاهش یابد، میزان تراکم رادون داخلی نیز کاهش خواهد یافت. این نتایج با یافته‌های اکبری و آمن نیز مطابقت دارد [۹]. (شکل ۷-نمودار خط‌چین).

همچنین همانگونه که بیان شد، سرعت تغییرات تراکم رادون در منحنی‌های تجربی و شبیه‌سازی‌شده در شکل ۲ و همچنین منحنی شکل ۶ بر کاهش ضریب انتشار رادون با مسدودشدن راه‌های تهویه در اتاق دلالت دارد.

از طرفی دیگر نتایج حاصل از محاسبه آهنگ انتشار رادون از سطوح مختلف در این تحقیق نشان می‌دهد، برخلاف تصور غالب، ممکن است دیوارهای اتاق با توجه به نوع خاک و

این آیین نامه به صورت مشخصی راهکارهای اجرایی مناسبی مانند نحوه درزبندی شکافها و ترکها و یا ایجاد سیستم تهویه رادون در بستر ساختمان برای مناطق بحرانی تشریح شده است؛ که الزام سازندگان به رعایت این دستورالعملها می تواند در پیشگیری از بیماریهای لاعلاج و یا صعب العلاج ناشی از رادون به ویژه سرطان ریه کاملاً مؤثر باشد [۱۸].

تحقیقات بیشتر و تدوین قوانین مرتبط با ساخت و ساز ساختمانها به مانند کشورهای توسعه یافته و با توجه به خطر رادون، کاملاً ضروری است. که خوشبختانه در این خصوص دستورالعملهایی مناسب مانند آیین نامهها و ضوابط فنی حفاظت از ساختمانها در برابر نفوذ گاز رادون توسط وزارت مسکن و شهرسازی در سالهای اخیر تدوین شده است. در

۷. مراجع

- [1] UNSCEAR, Sources, Effects and Risks of Ionization Radiation, Report to the General Assembly, United Nations, New York, (2000).
- [2] R. Edelstein and J. William. Radon's deadly daughters: science, environmental policy, and the politics of risk. Rowman & Littlefield, (1998) 36–39.
- [3] J.M. Samet. Indoor radon and lung cancer. Estimating the risks. The Western journal of medicine. 156 (1992) 9–25.
- [4] L. Oufni and M.A. Misdq. Radon emanation in a limestone cave using CR-39 and LR-115 solid state nuclear track detectors. J. Radioanal. Nucl. Chem. 250 (2001) 309–313.
- [5] K. Singh, M. Singh, S. Singh, H.S. Sahota and Z. Papp. Variation of radon (^{222}Rn) progeny concentrations in outdoor air as a function of time, temperature and relative humidity. J. Environ. Radioact. 39 (2005) 213–217.
- [6] V.R.K. Murty, J.G. King, N. Karunakara and V.C.C. Raju. Indoor and outdoor radon levels and its diurnal variations in Botswana. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. 619 (2010) 446–448.
- [7] X. Dong, M. Liao, H. Wang and K.J. Kearfott. A study of diurnal and short-term variations of indoor radon concentrations at the University of Michigan, USA and their correlations with environmental factors. Indoor Built Environ. 0 (2016) 1–11.
- [8] N. Chauhan, R.P. Chauhan, M. Joshi, T.K. Agarwal, P. Aggarwal and B.K. Sahoo. Study of indoor radon distribution using measurements and CFD modeling. J. Environ. Radioact. 136 (2014) 105–111
- [9] K. Akbari and R. Oman. Impacts of heat recovery ventilators on energy savings and indoor radon level. Management of Environmental Quality. 24 (2013) 682–694
- [10] J.E. Lee, H.C. Park, H.S. Choi, S.Y. Cho, T.Y. Jeong and S.C. Roh. A numerical study on the performance evaluation of ventilation systems for indoor radon reduction. Korean J. Chem. Eng. 33 (2016) 782–794.
- [11] R. Rabi and L. Oufni. Study of radon dispersion in typical dwelling using CFD modeling combined with passive-active measurements. Radiation Physics and Chemistry. 137 (2017) 40–48.
- [۱۲] رضایی، داریوش. بهرامی سامانی، علی. عشوری نژاد، مهدی. اندازه گیری تراکم گاز رادون هوای شهر رامسر و مقایسه آن با مقادیر مجاز. اولین همایش محیط زیست، انرژی و پدافند زیستی، (۱۳۹۲) ۷۶–۷۰.
- [۱۳] جعفری زاده، منصور. زاهدی فر، مصطفی. طاهری، مهران. برادران، سمانه. اندازه گیری غلظت رادون در برخی ساختمانهای مسکونی شهر کاشان. مجله سنجش و ایمنی پرتو، ۲ (۲)، (۱۳۹۳) ۴۱–۳۷.
- [۱۴] اصغری زاده، فرید. قنادی مراغه، محمد. سلیمی، بهرام. صدیق گویا، الهام. محاسبه آهنگ دز ناشی از پرتودهی طبیعی موجود در سنگهای گرانیتی ساختمانی در ایران. مجله سنجش و ایمنی پرتو، ۲ (۲)، (۱۳۹۳) ۳۰–۲۷.
- [۱۵] مولوی، علی اصغر. محمدجعفری، فرهاد. برآورد دز جذبی موثر سالیانه ناشی از گازهای رادون و تورون در مجاور گسل های فعال در شمال شرق ایران. طب جنوب، ۲۰ (۱)، (۱۳۹۵) ۷۶–۷۰.
- [16] B. Clavensjö and G. Åkerblom. The Radon Book. Stockholm: The Swedish Council for Building Research, (1994).
- [17] N.P. Petropoulos and S.E. Simopoulos. Building materials radon exhalation rate. The Science of the Total Environment, 272 (2001) 109–118.
- [۱۸] اخلاصی، احمد. الیاس زاده مقدم، نصرالدین. جعفری زاده، منصور. حافظی، محمدرضا. دلفانی، شهرام. طاهری، مهران. کاردان، محمد رضا. مزروعی، علی. ضوابط فنی حفاظت از ساختمانها در برابر نفوذ گاز رادون. تهران، وزارت مسکن و شهرسازی، مرکز تحقیقات راه، (۱۳۹۱).