

Investigation and Modeling Radon Concentration Changes within a Sample Room

Mohammad Zabihinpour^{*1}, Ali Asghar Mowlavi², Behnam Azadegan²

¹Department of Physics, Faculty of Science, Payame Noor University, Tehran, Iran

²Department of Physics, Faculty of Science, Hakime Sabzevari University, Sabzevar, Iran

Received: 11.01.2020 Final revised: 21.09.2020 Accepted: 02.11.2020

Doi link: [10.22055/JRMBS.2020.16182](https://doi.org/10.22055/JRMBS.2020.16182)

Abstract

This study aims to investigate changes in radon concentrations in residuals areas, using a sample closed room with the surface area of 12 m². In the room, radon gas emitted from the floor and walls surfaces with different emission rates, and gaps under the door and around the window were the natural ventilation routes. Radon concentrations were measured in different points of the room in different circumstances and times using an accurate radon detector and then compared with the simulation results from Computational Fluid Dynamics (CFD) technique under corresponding conditions and times. The analytical data were used to validate the results of these two techniques. The results indicate that the radon concentration decreases from a relatively uniform distribution of about 81 Bq/m³ to a relative non-uniform distribution in the range from 12 Bq/m³ to 44 Bq/m³ after a very slow natural ventilation. The simulation results demonstrate an appropriate agreement with the experimental data that indicate the accuracy of performed modeling.

Keywords: Radon, Exhalation rates, CFD method, Natural Ventilation, Concentration Distribution

بررسی و مدل‌سازی تغییرات تراکم رادون در داخل یک اتاق نمونه

سید محمد ذبیحین پور^{1*}، علی اصغر مولوی²، بهنام آزادگان²

¹گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

²گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران

دریافت: 1398/10/21 ویرایش نهایی: 1399/06/31 پذیرش: 1399/08/12

Doi link: [10.22055/JRMBS.2020.16182](https://doi.org/10.22055/JRMBS.2020.16182)

چکیده

در این پژوهش به منظور بررسی تغییرات غلظت رادون در محیط‌های مسکونی، از یک اتاق بسته نمونه به مساحت 12 مترمربع استفاده گردید. در این اتاق گاز رادون از سطوح کف و دیوارها با آهنگ مختلفی منتشر و مسیر تهویه طبیعی هوا از زیر درب به سمت پنجره وجود داشت. با بهره‌گیری از یک دستگاه اندازه‌گیری رادون دقیق، غلظت رادون در نقاط مختلف اتاق و برای شرایط و زمان‌های متفاوت اندازه‌گیری گردید و با نتایج شبیه‌سازی حاصل از به‌کارگیری روش دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)، در شرایط و زمان‌های متناظر مقایسه شد. همچنین به منظور اعتبار سنجی نتایج این دو روش، از داده‌های حاصل از روش حل تحلیلی استفاده گردید. این داده‌ها نشان می‌دهند که پس از یک تهویه طبیعی هوای بسیار آرام، غلظت رادون از یک توزیع یکنواخت نسبی با مقدار متوسط 81Bq/m^3 به یک توزیع غیرهمگن نسبی در بازه 12Bq/m^3 تا 44Bq/m^3 کاهش می‌یابد. تطابق مناسب نتایج شبیه‌سازی شده و داده‌های تجربی با نتایج حاصل از حل تحلیلی، صحت مدل‌سازی انجام شده را مشخص می‌سازد.

کلیدواژه‌ها: رادون، تهویه طبیعی، آهنگ انتشار، روش CFD، اندازه‌گیری تراکم

مقدمه

ناشی از تنفس گاز رادون (^{222}Rn) و دختر هسته‌های آن حاصل می‌گردد [2 و 3]. همچنین یافته‌های تحقیقات متعدد دیگری، رابطه قرارگیری در معرض تنفس این گاز با افزایش احتمال ابتلا به سرطان ریه را نشان داده و رادون را بعد از سیگار، بزرگترین عامل ابتلا به این بیماری کشنده معرفی کرده‌اند [4]. یکی از مهمترین عوامل افزایش خطر در محیط‌های سر بسته مسکونی، انتشار دائمی رادون از سطوح و مصالح تشکیل دهنده ساختمان مانند سنگ، آجر، شن، ماسه و سیمان است [5]. این نحوه انتشار باعث می‌گردد که تراکم گاز رادون در محیط‌های سر بسته مانند منازل، مدارس و ... در مقایسه با فضای آزاد در

از زمان پیدایش حیات بر روی زمین، همواره محیط زیست تحت تأثیر عناصر طبیعی رادیواکتیو موجود در سطح و جو آن بوده است. این تأثیر بر سلامت انسان‌ها نیز با پیشرفت تکنولوژی ساخت سکونتگاه‌های انسانی از فضاهای باز و غارها به ساختمان‌های مسکونی با تهویه هوای بسته دچار تغییر شده است [1]. این تغییرات به گونه‌ای است که درصد تأثیر عناصری با نیمه عمر کوتاهتر مانند رادون نسبت به عناصر رادیواکتیوی با نیمه عمرهای بسیار بلند مانند اورانیوم افزایش یافته است؛ تا جایی که پژوهش‌های اخیر نشان داده‌اند که تقریباً نیمی از دوز دریافتی عموم مردم از تابش طبیعی

* نویسنده مسئول: m_zabihin@pnu.ac.ir

عناصر رادیواکتیوی مانند رادون که ممکن است سرطان‌زا باشند، تأکید دارد [5].

بنابراین استفاده از روش‌های حل عددی مناسب همراه با دستگاه‌های اندازه‌گیری دقیقتر به منظور تعیین نحوه توزیع غلظت رادون در ساختمان‌ها ضروری است. مهمترین روش در این زمینه حل عددی به کمک دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) است. در این روش با در نظر گرفتن عوامل متعددی از جمله ضرایب انتشار و ورود رادون از منابع و سطوح مختلف، میزان و نحوه تهویه هوا، ساختار هندسی و همچنین فشار، دما و رطوبت نسبی در محیط داخلی و خارجی ساختمان، تراکم رادون برای زمانهای مورد نظر در نقاط مختلف تخمین زده می‌شود. به عنوان نمونه چوآن و همکاران در 2014، اکبری و آمن در 2015، لی و همکاران در 2016 و رابی و اونی در 2017 و 2018، با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی، نحوه توزیع تراکم رادون بر اساس مشخصات فیزیکی اتاق و تأثیر تهویه مناسب بر کاهش تراکم رادون داخلی را بررسی و گزارش کرده‌اند [12-15].

در کشور ما نیز در سال‌های اخیر پژوهش‌های متعددی در این زمینه انجام گردیده است. به عنوان نمونه در سال 1395، مولوی و جعفری، برآوردی از دُز جذبی مؤثر سالیانه ناشی از گازهای رادون و تورون در مجاورت گسل‌های فعال در شمال شرق ایران را به دست آوردند یا پورایمانی و حیدری پرتوزایی ناشی از مصالح ساختمانی در اراک را بررسی کردند. همچنین در پژوهشی دیگر، ذبیحین پور و همکاران در 1397، بر نقش تهویه طبیعی در کاهش غلظت رادون درون ساختمان‌ها تأکید کردند [16-18].

در پژوهش حاضر نیز تأثیر انتشار دائمی رادون از سطوح کف، سقف و دیوارها و همچنین وجود و یا

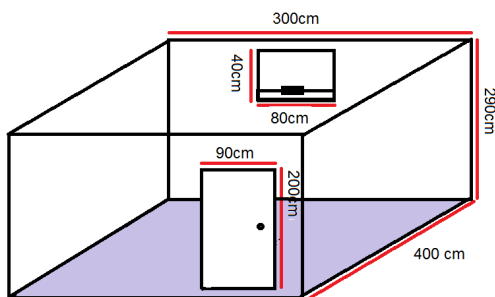
حدود 10 تا 10000 برابر افزایش یابد [6]. از این رو در دو دهه گذشته، پژوهش‌های فراوانی در جهت تعیین متوسط غلظت رادون در داخل ساختمان‌ها و شناسایی اماکن بحرانی انجام شده است. به عنوان نمونه اونی و میصداق در 2001، بر لزوم اندازه‌گیری مداوم غلظت رادون در محیط داخلی ساختمان‌ها و تعیین سطح و نحوه توزیع آن تأکید کردند [7]. مطالعات متعدد دیگری نیز بر تعیین نقش برخی عوامل مهم فیزیکی مانند ساختار و جنس بستر ساختمان و یا شرایط ترمودینامیکی و هواشناسی تمرکز داشته و تأثیر آنها را بر متوسط غلظت رادون در محیط داخلی بررسی کرده‌اند [8-11].

در سال‌های اخیر نیز با درک بیشتر مضرات تجمع رادون در داخل محیط‌های سر بسته بر سلامتی انسان، مخصوصاً با گسترش بیشتر استفاده از سیستم‌های تهویه بسته مانند انواع چیلر، رادیاتور، گرمایش از کف و کولرهای گازی در اماکن مسکونی، اداری و آموزشی به دلایل صرفه‌جویی انرژی، انجام مطالعات دقیقتر در این زمینه لازم به نظر می‌رسد. بر اساس اعلام کمیته علمی اثرات پرتوهای اتمی سازمان ملل متحد، متوسط میزان رادون در محیط داخلی خانه‌های مسکونی در حدود 40Bq/m^3 پیش‌بینی می‌گردد؛ اما نکته بسیار مهم آن است که این مقدار به طور قابل ملاحظه‌ای می‌تواند در مکان‌های مختلف متفاوت باشد [4].

علاوه بر این، با استفاده از روش‌های سنتی اندازه‌گیری غلظت رادون در محیط داخلی، فقط می‌توان مقادیر متوسط خام ارائه شده برای کل یک ساختمان و یا یک اتاق در یک سال را مشاهده کرد. این عدم اطلاعات از نظر اصول حفاظت ایمنی در مورد کیفیت هوای داخل ساختمان چندان قابل قبول نیست. سازمان بهداشت جهانی نیز بر داشتن اطلاعات لازم در مورد سطح

است و با بقیه دیوارهای اتاق تقریباً هم دما فرض شده‌اند. فضای بیرونی این اتاق به قدر کافی بزرگ است تا بتوان در مدت زمان تهویه طبیعی هوای آن از تغییرات دمایی و رطوبت نسبی صرف نظر نمود. مشخصات هندسی این اتاق در جدول 1 فهرست شده است.

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. حجم فضای خالی آن با وجود دستگاه در حدود 0,032 مترمکعب و مساحت وجه باز آن در حدود 0,16 مترمربع است.



شکل 1. شمایی از اتاق نمونه که در طبقه همکف یک ساختمان دو طبقه بدون زیرزمین واقع است.

دستگاه اندازه‌گیری

برای اندازه‌گیری تراکم گاز رادون در این پژوهش از دستگاه رادون‌سنج قابل حمل مدل RTM-1688 ساخت شرکت آلمانی SARAD استفاده گردید. این دستگاه با آنالیز طیفی ذرات آلفای تولیدی از واپاشی رادون، تورون و دختر هسته‌های آنها، قابلیت اندازه‌گیری تراکم رادون در دو مد سریع و کند (دقت بالاتر) و همچنین تورون را دارد. مهمترین مشخصه این دستگاه پاسخ سریع آن به تغییرات تراکم رادون نسبت به سایر دستگاه‌ها و یا روش‌های اندازه‌گیری و همچنین

عدم وجود تهویه طبیعی از منفذهای معمول اطراف درب و پنجره یک اتاق نمونه مسکونی بر تغییرات غلظت رادون در ناحیه‌های مختلف محیط داخلی آن مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور پس از شبیه‌سازی هندسه اتاق مورد نظر، حل عددی با روش CFD نیز با در نظر گرفتن شرایط مرزی و به‌منظور محاسبه غلظت رادون برای هر ناحیه انجام پذیرفت و با داده‌های حاصل از اندازه‌گیری غلظت رادون برای نواحی متناظر و به‌منظور توسعه مدل‌سازی نحوه توزیع رادون در اماکن مسکونی مشابه مقایسه گردید.

مواد و روش‌ها

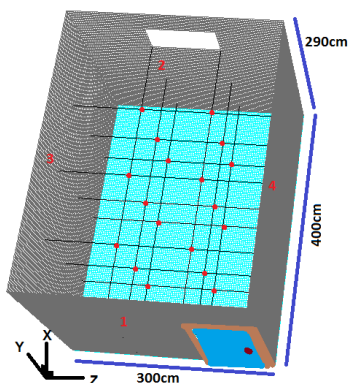
اتاق‌های نمونه

در این پژوهش به‌منظور بررسی اثر تهویه طبیعی بر تراکم رادون داخلی از یک اتاق نمونه واقع در طبقه همکف یک ساختمان دو طبقه فاقد زیرزمین استفاده شد. طول، عرض و ارتفاع این اتاق به ترتیب برابر 3,4 و 2,9 متر است. در این اتاق، دیوارهای مجاور، سمت راست و روبروی درب و همچنین سقف دارای پوشش گچی و دیوار سمت چپ آن سیمانی و کف اتاق نیز با موزاییک ساده فرش شده است. در سرتاسر این سطوح، شکاف‌ها و درزهای کوچک و بزرگ فراوانی دیده می‌شود که منبعی برای انتشار رادون هستند. درب ورودی به عرض 90 سانتی‌متر و ارتفاع 2 متر از جنس چوب است و شکافی هم عرض درب و به ارتفاع 4 سانتی‌متر در زیر آن وجود دارد. پنجره در دیوار روبروی درب قرار گرفته و جنس آن شیشه است (شکل 1). به‌علت اختلاف دمای میان محیط داخل و خارج اتاق، تهویه طبیعی باعث ورود بسیار آرام هوای تازه از زیر درب و خروج آن از شکاف‌های پنجره می‌گردد. در طول این پژوهش برای جلوگیری از اغتشاشات دمایی، سطح پنجره از بیرون عایق‌بندی شده

چندین محدودیت بکار رفته است: از اثر وجود ساکنین و مبلمان در ساختمان صرف نظر شده است، همه گازهای موجود در ساختمان، ایده‌آل فرض شده‌اند، به‌علت عدم دسترسی به تغییرات واقعی دمای دیوارها، کف و سقف در بازه زمانی آزمون، از دمای متوسط آنها به‌صورت ثابت استفاده شده است؛ سرعت تهویه و ضرایب انتشار رادون از سطوح مختلف در طول شبیه‌سازی یکنواخت فرض شده‌اند و از تغییرات آنها به‌علت تغییرات دمایی و فشار صرف‌نظر شده است.

2- روش اندازه‌گیری

به‌منظور مقایسه نتایج حاصل از حل عددی با نتایج اندازه‌گیری غلظت رادون، 18 نقطه در اتاق نمونه در نظر گرفته شد (شکل 2). بر این اساس، غلظت رادون در هر مرحله برای این نقاط نمونه اندازه‌گیری شده و با داده‌های حاصل از حل دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) مقایسه گردید. همچنین کمیت‌های مورد نیاز برای شرایط مرزی، مانند دمای دیوارها، سقف و کف در درون اتاق و فشار و دمای هوا در خارج از ساختمان نیز در هر دوره، برای زمان‌های مورد نیاز، چندین بار اندازه‌گیری و متوسط آنها مورد استفاده قرار گرفته است.



شکل 2 نمایی از 18 نقطه انتخابی برای اتاق نمونه که در سه ارتفاع مختلف در محل تلاقی خطوط ترسیمی قرار دارند. از این نقاط برای مقایسه داده‌های حاصل از اندازه‌گیری با نتایج شبیه‌سازی استفاده گردید.

اندازه‌گیری هم‌زمان فشار، دما و رطوبت نسبی محیط می‌باشد.

روش‌ها

1- روش دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)

با استفاده از قوانین بقا در روش حجم محدود، می‌توان معادلات لازم جهت تعیین توزیع غلظت رادون در اتاق نمونه را به‌کمک نرم افزارهای مناسب رایانه‌ای حل نمود. شکل عمومی قوانین بقا در شار سیالات برای یک حجم کوچک کنترل شده از متغیرهای وابسته C به‌صورت:

$$\frac{\partial(\rho C)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho C V) = \nabla \cdot (\rho D \nabla C) + S_C \quad 1$$

نوشته می‌شود. جمله اول این معادله، آهنگ زمانی تغییرات المان سیال متغیر C (اثر غیر تعادلی) نامیده می‌شود. جمله دوم شار خالص متغیر C در خارج از المان سیال (اثر حرکتی) است و جمله سوم تغییرات آهنگ تغییر C در نتیجه اثر پخش را نشان می‌دهد و نهایتاً جمله آخر، چشمه تولید C است که در واقع آهنگ تغییر شار سیال به‌علت تولید را نشان می‌دهد. تمامی معادلات بکار رفته در این روش از این معادله به‌دست می‌آید. همچنین در حل معادلات، از مدل جریان آرام استفاده شده است. یعنی در مناطق نزدیک دیوارها، نیروهای چسبندگی به دیوارها و در مناطق دور از دیوارها نیروهای ناشی از ویسکوزیته در محاسبات لحاظ می‌گردند. شبکه‌بندی بکار رفته در حل این معادلات، از نوع غیرسازمان‌یافته است. مزیت استفاده از این نوع شبکه، کاهش چشمگیر هزینه محاسباتی نسبت به شبکه‌بندی سازمان‌یافته می‌باشد.

همچنین باید در نظر داشت که برای ساده‌سازی مدل‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی، در این تحقیق

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. با استفاده از این معادله علاوه بر محاسبه غلظت رادون در یک محیط مشخص، می‌توان در صورت مشخص بودن ضرایب تهویه و میزان غلظت اولیه و نهایی رادون و به کمک اتاقک اندازه‌گیری، آهنگ انتشار رادون از سطوح مختلف را نیز به دست آورد.

نتایج

الف- داده‌های اندازه‌گیری

به منظور اندازه‌گیری غلظت رادون در شرایط مختلف در اتاق نمونه، از دستگاه رادون‌سنج مدل RTM-1688 شرکت SARAD و همچنین به منظور تعیین میزان آهنگ انتشار رادون از چهار دیوار، سقف و کف اتاق، از یک اتاقک آزمایش که قبلاً توصیف شد، استفاده گردید، بدین منظور وجه باز اتاقک آزمون به گونه‌ای به سطح مورد نظر چسبانده شد که تا جایی که مقدور بود، روزنه‌ای به بیرون نداشته و تنها کابل کنترل و تغذیه دستگاه رادون‌سنج از آن بیرون آمده بود. برای هر اندازه‌گیری در محل جدید، علاوه بر ثبت غلظت‌های اولیه و نهایی، منحنی تغییرات غلظت رادون برحسب زمان، شبیه منحنی شکل 3 نیز رسم گردید و به کمک معادله 3، ضریب انتشار رادون برای سطوح مختلف به دست آمد. اندازه‌گیری‌ها برای حداقل سه نقطه مختلف در هر سطح اتاق انجام شد و ضریب انتشار نهایی سطوح مختلف، از متوسط گیری نتایج حاصل از این داده‌ها حاصل گردید. داده‌های نهایی در جدول 1 ثبت شده است.

3- روش حل تحلیلی

برای تخمین غلظت رادون در اتاق نمونه، از یک مدل شناخته شده تحلیلی استفاده گردید. در این مدل، غلظت رادون از طریق انتشار رادون از شکاف‌ها و سطوح ساختمان افزایش یافته و فرآیند واپاشی رادیواکتیو رادون و تهویه هوای ساختمان آن را کاهش می‌دهند. بر همین اساس کلاوینسجو و آکربلوم² در 1994 و پیتروپولوس و سیموپولوس³ در 2001، معادله نهایی برای تعیین تراکم رادون داخلی در یک اتاق بسته به حجم V را به صورت زیر ارائه کردند [19,20]:

$$C_i(t) = C_0 e^{-\lambda t} + \frac{EA}{V\lambda} (1 - e^{-\lambda t}) \quad 2$$

که در آن C_i تراکم رادون داخلی در زمان $t(h)$ و C_0 تراکم رادون اولیه در $t=0$ برحسب Bqm^{-3} ، $E(Bqm^{-2}h^{-1})$ شار ورود رادون یا آهنگ انتشار رادون از خاک و مصالح ساختمانی، $A(m^2)$ مساحت سطحی که رادون از آن منتشر می‌شود و $V(m^3)$ حجم اتاق بسته و یا محفظه مورد آزمایش و $\lambda(h^{-1})$ آهنگ کل واپاشی رادون است که برحسب رابطه $\lambda = \lambda_{Rn} + \lambda_v$ به دست می‌آید و در آن λ_{Rn} ضریب واپاشی طبیعی رادیواکتیو رادون و λ_v آهنگ تهویه هوای داخل اتاق یا محفظه است.

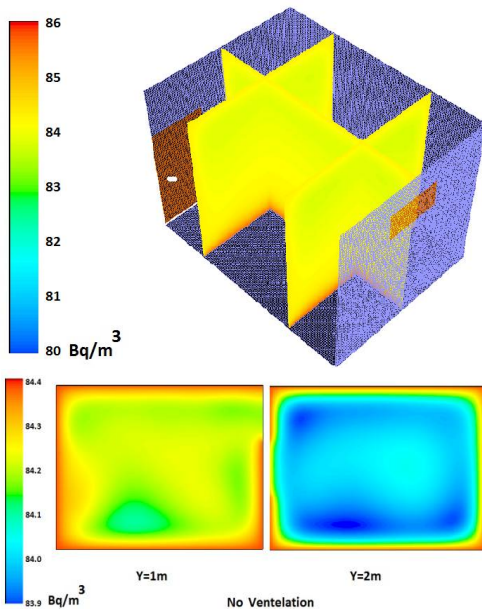
با فرض آن که تهویه هوا بین اتاق مورد نظر و محیط‌های دیگر وجود داشته باشد و از بیرون هوای تازه به محیط داخل وارد شود، می‌توان با اضافه کردن جمله ای به رابطه 1 بر اساس تعریف ضریب تهویه، رابطه تراکم نهایی رادون داخلی پس از تهویه هوا به مدت زمان t را به صورت زیر پیشنهاد کرد:

$$C_2 = C_0 e^{-(\lambda_{Rn} + \lambda_v)t} + (C_1 + \frac{EA}{V(\lambda_{Rn} + \lambda_v)})(1 - e^{-(\lambda_{Rn} + \lambda_v)t}) \quad 3$$

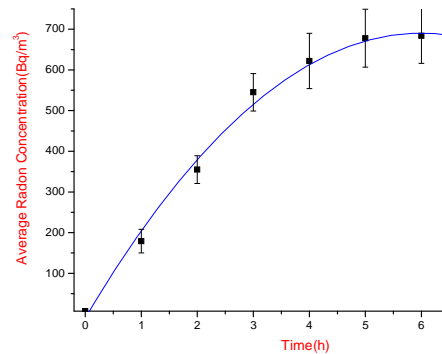
³ Petropoulos & simopoulos

² Clavensjo & Akerblom

همچنین صفحات مدل‌سازی شده با روش دینامیک سیالات محاسباتی در $x=1m$ ، $x=3m$ و $Z=1.5m$ و همچنین $Y=1m$ و $Y=2m$ ، با توجه به شرایط مرزی حالت نمونه و پس از گذشت 10 روز از مسدود نمودن کلیه راه‌های تهویه هوا، در شکل 4 نشان داده شده است. همانگونه که مشخص است تقریباً توزیع غلظت رادون در تمامی نقاط اتاق یکسان است و حداکثر اختلاف غلظت رادون در نقاط مختلف کمتر از $3Bq/m^3$ است. همچنین در جدول 3 متوسط غلظت رادون به دست آمده در ارتفاع یک متری از کف اتاق توسط شبیه‌سازی CFD، با نتایج تجربی حاصل از اندازه‌گیری و نتایج حاصل از حل تحلیلی در همین شرایط مقایسه شده است.



شکل 4. کانتورهای تراکم رادون حاصل از شبیه‌سازی CFD در $X=1m$ ، $x=3m$ و $Z=1.5m$ (بالا) و $Y=1m$ و $Y=2m$ (پایین) پس از 10 روز از مسدود سازی راه‌های تهویه طبیعی اتاق نشان داده شده‌اند.



شکل 3. منحنی تغییرات متوسط غلظت رادون در اتاقک اندازه‌گیری برای یک مکان نمونه در کف اتاق و در شرایط بدون تهویه.

جدول 1. ابعاد و آهنگ انتشار رادون برای سطوح مورد نظر

سطح کمیت	طول (cm)	ارتفاع/عرض (cm)	مساحت (m^2)	$E(Bqm^{-2}h^{-1})$
دیوار 1	300	290	8,7	$0,0 \pm 23,04$
دیوار 2	300	290	8,7	$0,0 \pm 21,03$
دیوار 3	400	290	11,6	$0,0 \pm 43,06$
دیوار 4	400	290	11,6	$0,0 \pm 22,03$
کف	400	300	12	$0,0 \pm 86,09$
سقف	400	300	12	$0,0 \pm 17,03$
شکاف زیر درب	90	1	0,01	-

ب- حالت بدون تهویه

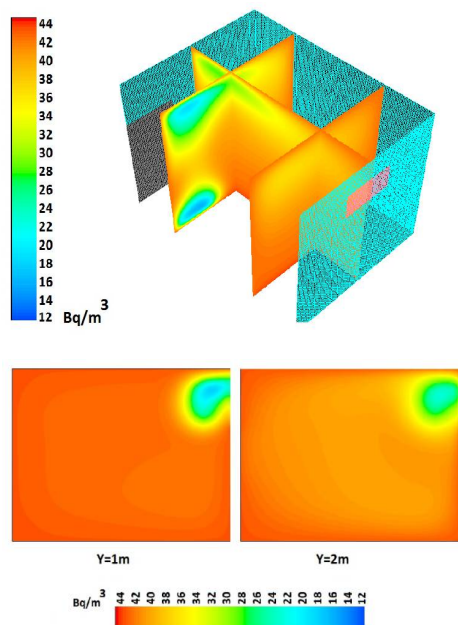
برای بررسی تغییرات غلظت رادون در اتاق نمونه در حالت بدون تهویه برای مدتی در حدود ده شبانه روز ($860000s$)، راه‌های تهویه طبیعی اتاق یعنی شکاف زیر درب و درزهای اطراف پنجره به‌طور کامل مسدود شد و غلظت رادون در 18 نقطه نمونه اندازه‌گیری و با داده‌های حاصل از شبیه‌سازی CFD مقایسه گردید (جدول 2).

ج - اثر تهویه طبیعی

به‌منظور بررسی تأثیر تهویه بر توزیع غلظت رادون در اتاق نمونه، پس از یک دوره زمانی بدون تهویه، شکاف کوچک زیر درب و درزهای اطراف پنجره باز گردید و تغییرات حاصل در مدت زمان حدود 4/5 ساعت بررسی گردید. به‌علت اختلاف دمای بین محیط داخل و خارج از اتاق، یک شارش آرام هوا از هوای تازه و خنک‌تر از زیر درب، وارد اتاق شده و از درز پنجره خارج می‌گردید. با اندازه‌گیری تغییرات دمایی هوای داخل اتاق و استفاده از روابط ترمودینامیکی موجود، میزان حجم هوای جابه‌جا شده به‌دست آمد و با توجه به رابطه:

$$\lambda_v = \frac{\Delta V}{Vt} \quad 4$$

که در آن V حجم اتاق نمونه است، متوسط مقدار ضریب تهویه در این بازه زمانی در حدود $\lambda_v = 0/17 \frac{1}{h}$ محاسبه گردید.



شکل 5. کانتورهای تراکم رادون حاصل از شبیه‌سازی CFD در $x=1m$ ، $x=3m$ و $Z=1.5m$ (بالا) و $Y=1m$ و $Y=2m$ (پایین) پس از 4/5 ساعت تهویه طبیعی نشان داده شده‌اند.

جدول 2: تراکم رادون در 18 نقطه انتخابی برحسب داده‌های حل عددی و اندازه‌گیری در حالت اتاق بسته

ردیف	مختصات (cm)			C(Bq/m ³)	
	X	Y	Z	حل عددی	اندازه‌گیری
1	100	20	100	84,23	83±8
2	100	100	100	83,04	81±9
3	100	200	100	84,74	87±8
4	100	20	200	85,33	78±7
5	100	100	200	84,19	83±9
6	100	200	200	84,06	80±9
7	200	20	100	85,29	91±9
8	200	100	100	84,37	77±8
9	200	200	100	84,22	89±8
10	200	20	200	85,41	93±9
11	200	100	200	84,77	85±9
12	200	200	200	84,18	82±8
13	200	20	100	85,05	86±12
14	200	100	100	84,36	78±8
15	200	200	100	84,23	83±11
16	200	20	200	84,58	89±11
17	200	100	200	84,38	76±8
18	200	200	200	83,44	75±8

جدول 3. داده‌های به‌دست آمده از روش‌های اندازه‌گیری، حل تحلیلی و حل عددی برای تراکم متوسط رادون در اتاق نمونه و پس از 10 روز بدون تهویه.

روش محاسبه	حل عددی	حل تحلیلی	اندازه‌گیری
C(Bq/m ³)	83,19	80,86	80±8

مقایسه شده‌اند. این داده‌ها متناظر با زمانی در حدود 4/5 ساعت پس از شروع تهویه طبیعی و با شرایط توصیفی می‌باشد.

جدول 5. داده‌های به‌دست آمده از روش‌های اندازه‌گیری، حل تحلیلی و حل عددی برای تراکم متوسط رادون در ساختمان پس از 16000 ثانیه تهویه طبیعی.

روش محاسبه	حل عددی	حل تحلیلی	اندازه‌گیری
C(Bq/m ³)	40,51	40,97	4±38

بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش با بهره‌گیری از یک مدل CFD سه بعدی، نحوه توزیع تراکم رادون در یک اتاق نمونه مورد بررسی قرار گرفته و داده‌های حاصل با نتایج اندازه‌گیری و حل تحلیلی در شرایط مشابه مقایسه شده است. بدین منظور ابتدا با استفاده از روش‌ها و روابط موجود، ضرایب انتشار رادون از سطوح مختلف اتاق محاسبه گردید، این داده‌ها همانگونه که در جدول 1 فهرست شده است، نشان می‌دهند که متوسط آهنگ انتشار رادون از کف اتاق حداقل بیش از دو برابر مقادیر آن برای دیگر سطوح اتاق است. این نتیجه با توجه به قرارگیری کف اتاق بر بستر زمین در طبقه همکف و نوع پوشش ضعیف آن طبیعی به نظر می‌رسد و گستره این ضرایب برای سطوح کف، سقف و دیوارهای اتاق با نتایج حاصل از پژوهش‌های دیگر انجام پذیرفته برای تعیین ضرایب انتشار رادون از مصالح ساختمانی مشابه نیز در توافق است [21].

همچنین در حالتی که برای مدتی در حدود ده روز، تمامی راه‌های تهویه ساختمان بسته بود؛ نتایج

همچنین نتایج شبیه‌سازی و حل عددی حاصل از روش دینامیک سیالات محاسباتی (کانتورهای شکل 5) نشان می‌دهند که توزیع یکنواخت غلظت رادون به‌خصوص در قسمت‌های ورودی اتاق به‌هم می‌ریزد؛ به‌گونه‌ای که تفاوت تراکم رادون در نقاط مختلف اتاق که در حالت بدون تهویه به‌حداکثر 3٪ می‌رسید، در این حالت به بیشتر از 260٪ افزایش می‌یابد. کانتورهای غلظت رادون در ارتفاع‌های 1 و 2 متری نیز مشخص می‌سازند که با افزایش ارتفاع از کف اتاق، متوسط غلظت رادون نیز افزایش می‌یابد. در جدول 4 نیز داده‌های حاصل از اندازه‌گیری و نتایج حل عددی حاصل از روش CFD در 18 نقطه نمونه ثبت شده است.

جدول 4. تراکم رادون در 18 نقطه انتخابی در اتاق نمونه و برحسب داده‌های حل عددی و اندازه‌گیری پس از 4/5 ساعت تهویه طبیعی

ردیف	مختصات (cm)			C(Bq/m ³)	
	X	Y	Z	حل عددی	اندازه‌گیری
1	100	20	100	42,67	39±6
2	100	100	100	41,54	43±4
3	100	200	100	39,32	34±4
4	100	20	200	35,71	40±6
5	100	100	200	40,07	37±4
6	100	200	200	38,28	43±6
7	200	20	100	42,19	47±9
8	200	100	100	41,41	37±4
9	200	200	100	30,03	31±6
10	200	20	200	42,58	39±6
11	200	100	200	41,32	38±7
12	200	200	200	39,04	34±5
13	200	20	100	42,51	38±8
14	200	100	100	41,83	39±4
15	200	200	100	39,45	44±7
16	200	20	200	42,38	43±6
17	200	100	200	41,47	38±4
18	200	200	200	40,28	35±4

همچنین در جدول 5، نتایج حاصل از حل عددی، حل تحلیلی و اندازه‌گیری‌های انجام شده برای متوسط غلظت رادون در ارتفاع یک متری از کف اتاق با هم

نشسته در ورودی اتاق، در حدود نصف همین کمیت برای فردی ایستاده در وسط اتاق است. همچنین جهت اعتبارسنجی نتایج تجربی و حل عددی از مقایسه آنها با جواب حل تحلیلی در شرایط مشابه استفاده گردید همانگونه که مشاهده می‌شود آنها تا حدود بسیار خوبی با هم همخوانی داشته و همدیگر را تأیید می‌کنند (جدول 5).

در نهایت می‌توان گفت که اگرچه محدودیت‌های عملی فراوانی در اندازه‌گیری دقیق و لحظه‌ای پارامترهای مورد نیاز وجود دارد و خطاهای اندازه‌گیری در بسیاری از موارد بیشتر از تغییرات مدل دینامیکی حاصل برای غلظت رادون در مناطق مختلف اتاق است، اما نتایج این پژوهش به روشنی بر امکان وجود تفاوت تأثیرگذار سطوح رادون در یک اتاق مسکونی تأکید دارد. نتایج پژوهش‌های اکبری و آمن و همچنین رابی و همکاران نیز این موضوع را تأیید کرده و بر لزوم توسعه تجهیزات، روش‌ها و مدل‌های دقیق‌تر برای شناسایی نقاط بحرانی از لحاظ وجود رادون در ساختمان‌های مسکونی تأکید دارند.

مرجع‌ها

[1] A.J. Khan, R. Prasad, R.K. Tyagi, "Measurement of radon exhalation rate from some building materials." *International Journal of Radiation Applications and Instrumentation. Part D. Nuclear Tracks and Radiation Measurements* 20 4 (1992) 609-610. [https://doi.org/10.1016/1359-0189\(92\)90013-L](https://doi.org/10.1016/1359-0189(92)90013-L)

[2] UNSCEAR Report, *United Nations Scientific Committee on Effects of Atomic Radiation, United Nations, New York, E 88* (1888). https://www.unscear.org/docs/publications/1988/UNSCEAR_1988_Report.pdf

[3] W.M. Lowder, "Natural environmental radioactivity and radon gas." *Radon monitoring*

به‌دست‌آمده (جدول 4) نشان می‌دهد که اگرچه خطای نتایج تجربی در اکثر موارد بیشتر از تغییرات غلظت رادون محاسبه شده برای نقاط مختلف اتاق به‌روش حل عددی است و حتی در دو مورد داده‌های حل عددی خارج از بازه خطای نتایج اندازه‌گیری است، اما حداکثر تفاوت این داده‌ها از 11٪ تجاوز نمی‌کند و تطابق قابل قبولی دارند. اعتبار این داده‌ها به‌کمک مقایسه متوسط آنها در ارتفاع یک متری از کف اتاق با نتیجه حل تحلیلی در همین شرایط در جدول 3 مشخص است و همانگونه که این داده‌ها نشان می‌دهند اختلاف نتایج تجربی و شبیه‌سازی با حل تحلیلی کمتر از 4٪ است. از طرفی دیگر این داده‌ها و کانتورهای شکل 4 نشان می‌دهند که محل و ارتفاع قرارگیری افراد در این اتاق تفاوت معنی‌داری در دز دریافتی آنها ایجاد نمی‌کند.

همچنین داده‌های جدول 6 نشان می‌دهد که اگرچه نتایج مدل‌سازی عددی و داده‌های تجربی پس از 4/5 ساعت تهویه طبیعی که در آن هوا از زیر درب اصلی وارد و از پنجره‌های دیوار مقابل خارج شده است، در 3 مورد از 18 نقطه انتخابی تفاوت داده‌ها از دقت اندازه‌گیری بیشتر است، اما در مجموع انطباق مناسبی بین داده‌ها دیده می‌شود. دقت بیشتر در این داده‌ها و کانتورهای شکل 5 مشخص می‌سازد که اگر چه پس از گذشت 4/5 ساعت از تهویه طبیعی با شرایط توصیفی، غلظت رادون در تمامی نقاط ساختمان در ناحیه مجاز غلظت اعلام شده از طرف کمیته بین‌المللی حفاظت در برابر پرتوها است، اما دز جذبی فردی

- and CFD modeling. *Journal of Environmental Radioactivity* **136** (2014) 105–111.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2014.05.020>
- [12] K. Akbari, R. Oman, Impacts of heat recovery ventilators on energy savings and indoor radon level. *Management of Environmental Quality*, **24** (2013) 682–694.
<https://doi.org/10.1108/MEQ-06-2012-0050>
- [13] J.E. Lee, H.C. Park, H.S. Choi, S.Y. Cho, T.Y. Jeong, S.C. Roh, A numerical study on the performance evaluation of ventilation systems for indoor radon reduction. *Korean Journal of Chemical Engineering* **33** (2016) 782–794.
<https://doi.org/10.1007/s11814-015-0214-8>
- [14] R. Rabi, 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.
<https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2017.04.012>
- [15] R. Rabi, L. Oufni, A theoretical and experimental investigation of spatial distribution of radon in a typical ventilated room, *MAPAN* **33** 2 (2018) 123–130.
<https://doi.org/10.1007/s12647-017-0238-0>
- [16] A.A. Mowlavi, F. Mohammad Jafari, The Estimated Annual Effective Dose Caused By Radon and Thoron Gases in the Vicinity of Active Faults in the North East of Iran *Iranian South Medical Journal* **20** 1 (2017) 70–76.
<http://ismj.bpums.ac.ir/article-1-858-en.html>]
- [17] R. Pourimani, V. Heidari, Investigation of Environmental Radioactivity in the Building Materials in Arak City, *Environmental Science & Technology Environmental Science & Technology* **19** 5 (2017) 488–496.
http://jest.srbiau.ac.ir/article_11381_9fbb70b3bfdff67f96b23348115a3ba2.pdf
- [18] M. Zabihinpour. A.A. Mowlavi, B. Azadegan. The role of natural ventilation on reducing indoor radon concentration. *International journal of Research science and Management* **6** 4 (2018) 1–10.
<http://rsm.kashanu.ac.ir/article-1-298-fa.html>
- in radioprotection, environmental radioactivity and earth sciences. (1990).
https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:23048049
- [4] UNSCEAR, Sources, Effects and Risks of Ionization Radiation, Report to the General Assembly, United Nations, New York, (2000).
https://www.unscear.org/docs/publications/2000/UNSCEAR_2000_Report_Vol.I.pdf
- [5] JP. McLaughlin, Radon in indoor air. *Commission of the European Communities*, (1989). https://www.buildingecology.com/wp-content/uploads/2018/12/ECA_Report15.Pdf
- [6] M.R. Edelstein, WJ Makofske, *Radon's deadly daughters: science, environmental policy, and the politics of risk* (1998) Rowman & Littlefield.
https://books.google.com/books/about/Radon_s_Deadly_Daughters.html?id=uLLc84-XfLgC&printsec=frontcover&source=kp_read_button#v=onepage&q&f=false
- [7] L. Oufni, M.A. Misdaq, Radon emanation in a limestone cave using CR-39 and LR-115 solid state nuclear track detectors. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* **250** 2 (2001) 309–313.
<https://doi.org/10.1023/A:1017951713943>
- [8] K. Singh, M. Singh, S. Singh, H.S. Sahota, Z. Papp, Variation of radon (²²²Rn) progeny concentrations in outdoor air as a function of time, temperature and relative humidity. *Radiation measurements* **39** 2 (2005) 213–217.
<https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2004.06.015>
- [9] V.R.K. Murty, J.G. King, N. Karunakara, V.C.C. Raju. Indoor and outdoor radon levels and its diurnal variations in Botswana, *Nuclear Instruments and Methods in Physics* **619** (2010) 446–448.
<https://doi.org/10.1016/j.nima.2009.10.119>
- [10] X. Dong, M. Liao, H. Wang, 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*, **1** (2016) 1–11.
<https://doi.org/10.1177%2F1420326X16660755>
- [11] N. Chauhan, R.P. Chauhan, M. Joshi. Agarwal, T.K., Aggarwal, P. Sahoo, B.K. Study of indoor radon distribution using measurements

[19] B. Clavensjö. G. Åkerblom. The Radon Book. Stockholm: *The Swedish Council for Building Research* (1994).

[https://books.google.com/books?id=v85VNAAACAAJ&dq=B.+Clavensj%C3%B6.+G.+%C3%85kerblom.+measures+against+radon+book.+Stockholm:+The+Swedish+Council+for+Building+Research,++\(1994\).&hl=en&sa=X&ved=0ahUKEwiXieHQIPvmAhUE2KQKHWEZCTwQ6AEIUTAG](https://books.google.com/books?id=v85VNAAACAAJ&dq=B.+Clavensj%C3%B6.+G.+%C3%85kerblom.+measures+against+radon+book.+Stockholm:+The+Swedish+Council+for+Building+Research,++(1994).&hl=en&sa=X&ved=0ahUKEwiXieHQIPvmAhUE2KQKHWEZCTwQ6AEIUTAG)

[20] N.P. Petropoulos, S.E. Simopoulos. *Building materials radon exhalation rate. The Science of the Total Environment*, **272** (2001) 109–118.

[https://books.google.com/books?id=oJtTDwAAQBAJ&pg=PA61&dq=N.P.+Petropoulos.+S.E.+Simopoulos.+Building+materials+radon+exhalation+rate.+The+Science+of+the+Total+Environment,+272+\(2001\)+109%E2%80%93118.&hl=en&sa=X&ved=0ahUKEwiCyOH5IPvmAhUCCewKHXXSCr4Q6AEIJjAA#v=onepage&q=N.P.%20Petropoulos.%20S.E.%20Simopoulos.%20Building%20materials%20radon%20exhalation%20rate.%20The%20Science%20of%20the%20Total%20Environment%2C%20272%20\(2001\)%20109%E2%80%93118.&f=false](https://books.google.com/books?id=oJtTDwAAQBAJ&pg=PA61&dq=N.P.+Petropoulos.+S.E.+Simopoulos.+Building+materials+radon+exhalation+rate.+The+Science+of+the+Total+Environment,+272+(2001)+109%E2%80%93118.&hl=en&sa=X&ved=0ahUKEwiCyOH5IPvmAhUCCewKHXXSCr4Q6AEIJjAA#v=onepage&q=N.P.%20Petropoulos.%20S.E.%20Simopoulos.%20Building%20materials%20radon%20exhalation%20rate.%20The%20Science%20of%20the%20Total%20Environment%2C%20272%20(2001)%20109%E2%80%93118.&f=false)

[21] N.M. Hassan, M. Hosoda, T. Ishikawa, Sh. Tokonami, M. Fukushi, A.F. Hafez, E. Khalil, 222Rn exhalation rate from Egyptian building materials using active and passive methods, *Japanese Journal of Health Physics*, **44** 1 (2009) 106-111.

https://www.jstage.jst.go.jp/article/jhps/44/1/44_1_106/article/-char/ja/#